

ИНТЕРЭКСПО

ISSN 2618-981X

ГЕО-СИБИРЬ

XVII Международный научный конгресс

Форум № 1 в России

Сборник материалов в 8 т.

Т. 2

Международная научная конференция

**Недропользование. Горное дело.
Направления и технологии поиска,
разведки и разработки месторождений
полезных ископаемых. Экономика.
Геоэкология**

№ 3

Новосибирск
2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XVII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 8 т.

Т. 2

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА.
ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

№ 3

Новосибирск
СГУГиТ
2021

Ответственные за выпуск:

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН, главный научный сотрудник
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск

А. Э. Конторович

Доктор технических наук, академик РАН, академик РАН, главный научный сотрудник
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск

М. И. Эпов

Доктор технических наук, директор Института нефтегазовой геологии и геофизики
им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск

И. Н. Ельцов

Кандидат технических наук, врио директора Института горного дела
им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск

А. П. Хмелинин

Кандидат геолого-минералогических наук, исполнительный директор
АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии,
геофизики и минерального сырья», г. Новосибирск

М. Ю. Смирнов

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу
Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», г. Новосибирск

А. И. Неволько

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г.,
Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 8 т. Т. 2 : Междунар. науч. конф.
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки
и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкологи-
я». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 3. – 367 с. – ISSN 2618-981X

DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-3

В сборнике опубликованы материалы XVII Международного научного конгресса
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разра-
ботки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622.3

© СГУГиТ, 2021

ЛИТОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ГИС В ИНТЕРВАЛАХ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Елена Юрьевна Темникова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, инженер, e-mail: TemnikovaEU@ipgg.sbras.ru

Серафим Игоревич Грубась

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, инженер, e-mail: GrubasSI@ipgg.sbras.ru

Арсений Артемович Федосеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, инженер, e-mail: FedoseevAA@ipgg.sbras.ru

С использованием разработанного вычислительного алгоритма литологической интерпретации данных ГИС на основе искусственных нейронных сетей построены объемные модели относительного содержания порообразующих компонентов баженовской свиты и выделены ее основные типы пород. По результатам литологической интерпретации построены корреляционные схемы баженовской свиты, которые позволили проследить пространственное распределение вещественного состава и основных типов пород баженовской свиты в пределах Салымского месторождения.

Ключевые слова: баженовская свита, геофизические исследования скважин, искусственные нейронные сети

LITHOLOGICAL INTERPRETATION ACCORDING TO WELL-LOGGING DATA FOR THE BAZHENOV FORMATION WITH USAGE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Elena U. Temnikova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Engineer, e-mail: TemnikovaEU@ipgg.sbras.ru

Serafim I. Grubas

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Engineer, e-mail: GrubasSI@ipgg.sbras.ru

Arsenii A. Fedoseev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD student, Engineer, e-mail: FedoseevAA@ipgg.sbras.ru

Using artificial neural networks for lithological interpretation according to well logging data, models of the relative content of rock-forming components of the Bazhenov Formation were constructed and its main types of rocks were identified in accordance with a modern classification. Results of lithological interpretation were used for building correlation schemes, which made it possible

to trace the spatial distribution of the material composition and main types of rocks of the Bazhenov Formation for the Salym field.

Keywords: Bazhenov Formation, well logging, artificial neural networks

Баженовская свита является одновременно как основной нефтепроизводящей толщей, так и региональным глинистым флюидоупором для углеводородных залежей в отложениях оксфорда верхней юры. Ее отличительной особенностью служит высокая степень неоднородности состава [1, 2, 3 и др.], обусловленная изменением содержания в разрезе свиты глинистых, кремнистых, карбонатных породообразующих компонентов и органического вещества. В связи с тем, что разрезы скважин слабо охарактеризованы керновым материалом, необходимо уделять большое внимание развитию методического обеспечения литологической интерпретации данных геофизических исследований в скважинах (ГИС).

Один из широко применяемых подходов к определению вещественного состава терригенных пород основывается на решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [4, 5], который зарекомендовал свое применение для литологической интерпретации данных ГИС в интервалах баженовской свиты [6, 7, 8, 9]. Основным преимуществом описываемого подхода является возможность оперативно определять объемное содержание породообразующих компонентов. Его методическая особенность заключается в линейности связи между сигналами ГИС и искомыми содержаниями компонентов, что является существенным недостатком, поскольку связь сигналов каротажа с литологическим составом пород намного сложнее, особенно для таких объектов, как баженовская свита.

В настоящей работе предлагается применение нелинейного алгоритма интерпретации данных ГИС на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). ИНС являются универсальными аппроксиматорами [10], основное преимущество которых заключается в их гибкости, позволяющей учитывать любого рода априорную информацию или физические законы [11]. Опыт успешного применения ИНС для интерпретации данных ГИС в петрофизических и литологических исследованиях представлен в работах [12, 13].

Для литологической интерпретации ГИС с применением вычислительного алгоритма на основе ИНС рассмотрены пять скважин с расширенным комплексом ГИС в интервалах баженовской свиты, включающего в себя методы радиоактивного, акустического, электрического и электромагнитного каротажей. В дополнение к каротажным данным, для одной из исследуемых скважин проанализированы данные лабораторных литологических и геохимических исследований керна, выполненные в ИНГГ СО РАН [14].

В работе используется нейронная сеть, которая является функцией, зависящей от входных аргументов и внутренних параметров:

$$F(x, \theta) = \{f_1(x, \theta), \dots, f_N(x, \theta)\},$$

где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ – входные аргументы, представленные данными ГИС; n – количество входных данных; Θ – внутренние параметры нейросети, которые подбираются в процессе обучения; $f_1, \dots, f_N$ – набор функций, аппроксимирующих содержание каждого порообразующего компонента; N – общее количество порообразующих компонентов.

Для определения вещественного состава пород баженовской свиты использовалась полносвязная архитектура нейронной сети с 5 скрытыми слоями и 100 нейронами на каждом слое; алгоритм обучения Adam [15] с шагом обучения 0.001. Количество эпох обучения составило 4000, размер обучающей выборки равен количеству образцов керна – 35.

На рисунке 1 представлен результат применения ИНС для оценки вещественного состава баженовской свиты (первые шесть треков), ее объемная модель (седьмой трек) и литологическая колонка (восьмой трек). Выделение основных типов пород проводилось согласно современной классификации, базирующейся на представлении распределения кремнистого, глинистого, карбонатного и органического вещества в баженовской свите [14]. Ошибка на обучающей выборке составила около 7%, что является допустимым в нашей задаче.

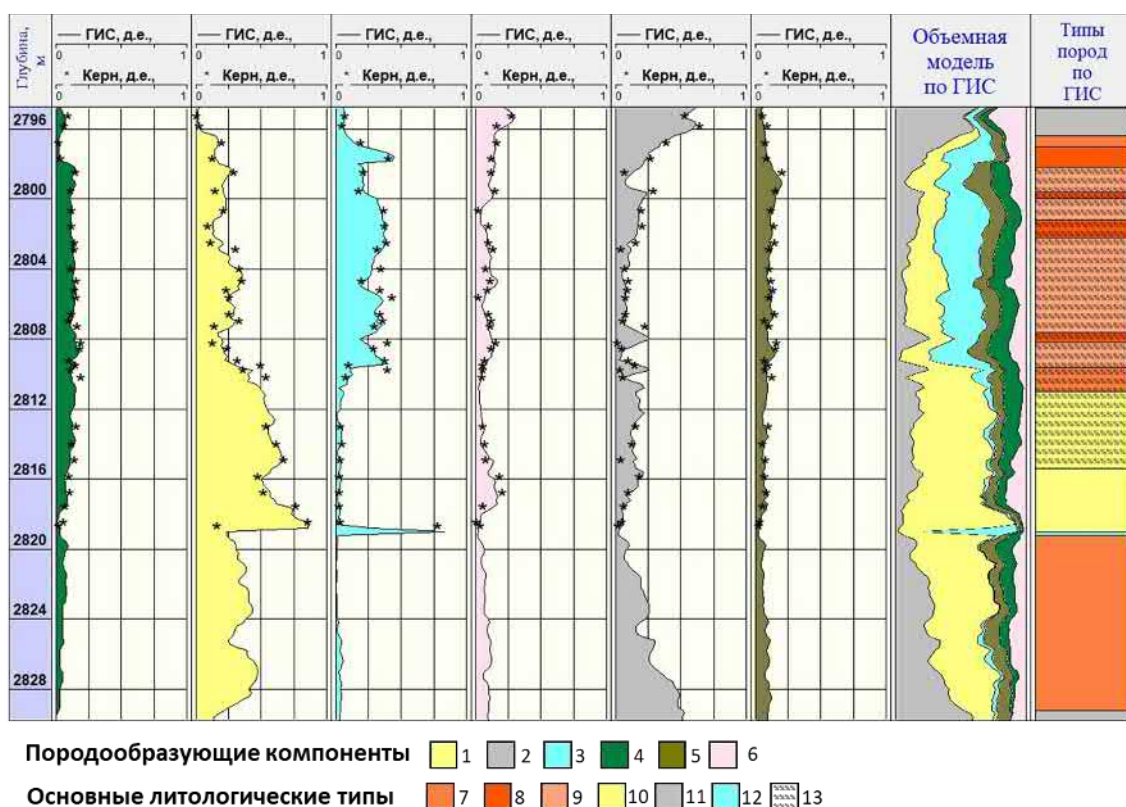


Рис. 1. Литологическая модель баженовской свиты Салымского месторождения, построенная с применением искусственной нейронной сети

Условные обозначения: 1 – кремнистые минералы, 2 – глинистые минералы, 3 – карбонатные минералы, 4 – органическое вещество, 5 – пирит, 6 – альбит, 7 – глинисто-кремнистые микститы, 8 – карбонатно-глинистые микститы, 9 – карбонатно-кремнистые микститы, 10 – силициты, 11 – аргиллиты, 12 – карбонаты, 13 – высокоуглеродистые породы.

На основе результатов применения обученной нейронной сети к исследуемым скважинам построены корреляционные схемы баженовской свиты участка Салымского месторождения и прослежена пространственная изменчивость ее вещественного состава (рис. 2).

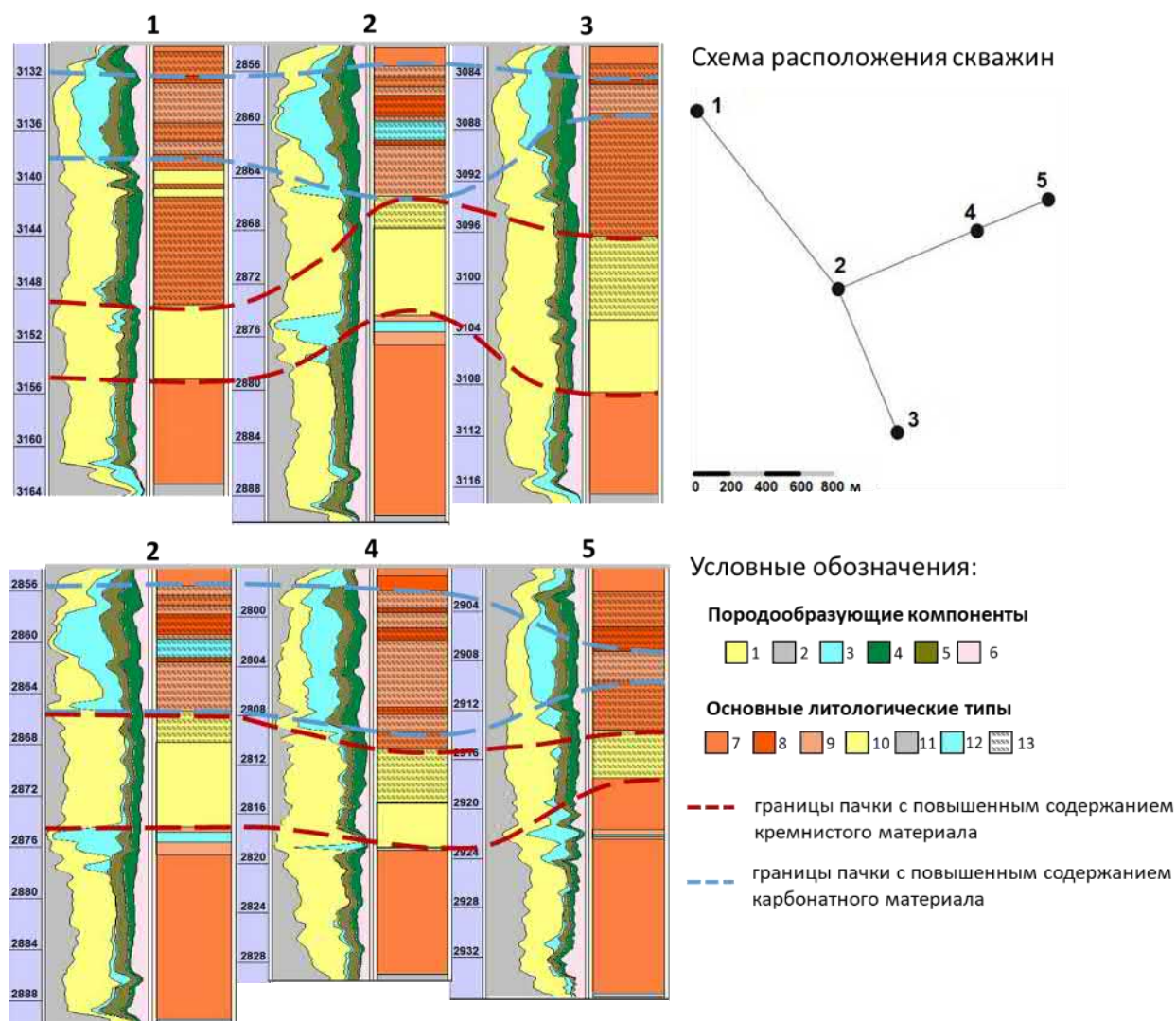


Рис. 2. Субмеридиональная и субширотная корреляционные схемы баженовской свиты участка Салымского месторождения

Условные обозначения: см. рис. 1

Анализируя результаты литологической интерпретации, можно отметить, что карбонатно-кремнистые и высокоуглеродистые породы находятся в верхней части баженовской свиты. Ниже по разрезу наблюдаются относительно мощные силициты, которые подстилаются глинисто-кремнистыми микститами.

На субмеридиональной корреляционной схеме мощность карбонатно-кремнистых пород в кровле баженовской свиты практически не изменяется. Толщины карбонатно-кремнистых и глинисто-кремнистых микститов баженовской свиты максимальны для центральной части участка Салымского месторождения

и уменьшаются в северо-западном и юго-восточном направлениях. Мощность силицитов остается неизменной по разрезу, в то время как толщина высокоуглеродистых силицитов увеличивается с северо-запада на юго-восток.

На субширотной корреляционной схеме в кровле баженовской свиты с юго-запада на северо-восток увеличивается мощность глинисто-кремнистых микститов. Ниже залегают карбонатно-кремнистые породы, мощность которых минимальна на востоке территории. Они подстилаются силицитами, с увеличением мощностей с северо-востока на юго-запад. В подошве свиты залегают глинисто-кремнистые породы, с максимальной мощностью на востоке территории. В нижней части баженовской свиты наблюдается пик с повышенным содержанием карбонатного материала, обладающий максимальной мощностью карбонатных пород в центральной части рассматриваемой территории.

Из оценки средних концентраций породообразующих компонентов баженовской свиты Салымского месторождения следует, что наибольшего содержания достигают кремнистые минералы, 34%. Глинистые и карбонатные минералы составляют 20% и 15% соответственно. При этом наблюдаются относительно пониженные средние содержания органического вещества – 9%. Близкие по значениям концентрации приходятся на альбит (11%) и пирит (9%).

Таким образом, в работе показан опыт реализации разработанного алгоритма на основе ИНС для литологической интерпретации данных ГИС применительно к изучению вещественного состава баженовской свиты. С применением разработанного вычислительного алгоритма на основе ИНС рассчитаны относительные содержания породообразующих компонентов баженовской свиты и выделены ее основные литологические типы пород. Используя полученные литологические модели, были построены корреляционные схемы баженовской свиты, прослежена изменчивость ее вещественного состава и мощностей литологических типов пород в пределах Салымского месторождения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-77-20130. «Фундаментальные основы импульсного электромагнитного зондирования с управляемым спектром: теоретическое обоснование инновационного геофизического метода геологоразведки с использованием высокопроизводительных вычислений на базе Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зарипов В.А., Ушатинский И.Н. Особенности формирования, строения и состава битуминозных отложений баженовской свиты в связи с их нефтеносностью // Труды ЗапСибНИГРИ, вып.113. – Тюмень, 1976. – С.53-71.
2. Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г. Некоторые аспекты формирования баженовской свиты в центральных районах Западно-Сибирского осадочного бассейна // Литосфера. – 2005. – № 4. – С. 118-135.
3. Немова В.Д. Многоуровневая литологическая типизация пород баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 8. – С. 13-17.
4. Moss B., Harrison R. Statistically Valid Log Analysis Method Improves Reservoir Description // SPE 13981. – 1985.

5. Петерсилье В.И., Пороскун В.И., Яценко Г.Г. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом // Москва-Тверь, ВНИГНИ, НПЦ “Тверьгеофизика”. – 2003. – 130 с.
6. Куляпин П.С., Соколова Т.Ф. Прогноз коллекторов в разрезе баженовской свиты по материалам керна и геофизических исследований скважин // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т.326. – №1. – С. 118–133.
7. Калмыков Г.А. Строение баженовского нефтегазоносного комплекса как основа прогноза дифференцированной нефтепродуктивности // Диссертация д.г.-м.н. М: МГУ. – 2016. – 391 с.
8. Федосеев А. А., Глинских В. Н., Казаненков В. А. Относительное содержание породообразующих компонентов и основные литологические типы пород баженовской свиты и её стратиграфических аналогов по данным геофизических исследований скважин и керна // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2018. – Т. 13. – №. 2. – С. 5-5.
9. Temnikova E. Y., Fedoseev A. A., Glinskikh V. N. The material composition and dispersion properties of unconventional reservoir according to electromagnetic sounding // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2020. – Society of Exploration Geophysicists, 2020. – С. 1170-1174.
10. Cybenko G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function // Mathematics of control, signals and systems. – 1989. – Т. 2. – №. 4. – С. 303-314.
11. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. – 2019. – Т. 378. – С. 686-707.
12. Lee S. H., Datta-Gupta A. Electrofacies characterization and permeability predictions in carbonate reservoirs: role of multivariate analysis and nonparametric regression // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 1999.
13. Al-Mudhafar W. J. Integrating well log interpretations for lithofacies classification and permeability modeling through advanced machine learning algorithms // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2017. – Т. 7. – №. 4. – С. 1023-1033.
14. Конторович А.Э., Ян П.А., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Эдер В.Г. Классификация пород Баженовской свиты // Геология и геофизика. – 2016. – Т.57. – №11. – С. 2034–2043.
15. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980.

REFERENCES

1. Zaripov V.A., Ushatinskij I.N. Osobennosti formirovaniya, stroeniya i sostava bituminoznyh otlozhenij bazhenovskoj svity v svyazi s ih neftenosnost'yu // Trudy ZapSibNIGRI, vyp.113. – Tyumen', 1976. – S. 53-71.
2. Zanin YU.N., Zamirajlova A.G., Eder V.G. Nekotorye aspekty formirovaniya bazhenovskoj svity v central'nyh rajonah Zapadno-Sibirskogo osadochnogo bassejna // Litosfera. – 2005. – № 4. – S. 118-135.
3. Nemova V.D. Mnogourovnevaya litologicheskaya tipizaciya porod bazhenovskoj svity // Neftyanoe hozyajstvo. – 2019. – № 8. – S. 13-17.
4. Moss B., Harrison R. Statistically Valid Log Analysis Method Improves Reservoir Description // SPE 13981. – 1985.
5. Petersil'e V.I., Poroskun V.I., YAcenko G.G. Metodicheskie rekomendacii po podschetu geologicheskikh zapasov nefti i gaza ob'emnym metodom // Moskva-Tver', VNIIGNI, NPC “Tver'geofizika”. – 2003. – 130 s.
6. Kulyapin P.S., Sokolova T.F. Prognoz kollektorov v razreze bazhenovskoj svity po materialam kerna i geofizicheskikh issledovanij skvazhin // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2015. – Т. 326. – №1. – S.118–133.

7. Kalmykov G.A. Stroenie bazhenovskogo neftegazonosnogo kompleksa kak osnova prognoza differencirovannoj nefteproduktivnosti // Dissertaciya d.g.-m.n. M: MGU. – 2016. – 391 s.
8. Fedoseev A. A., Glinskih V. N., Kazanenko V. A. Otnositel'noe sodержanie porodoobrazuyushchih komponentov i osnovnye litologicheskie tipy porod bazhenovskoj svity i eyo stratigraficheskikh analogov po dannym geofizicheskikh issledovaniy skvazhin i kerna // Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika. – 2018. – T. 13. – №. 2. – S. 5-5.
9. Temnikova E. Y., Fedoseev A. A., Glinskikh V. N. The material composition and dispersion properties of unconventional reservoir according to electromagnetic sounding // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2020. – Society of Exploration Geophysicists, 2020. – S. 1170-1174.
10. Cybenko G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function // Mathematics of control, signals and systems. – 1989. – T. 2. – №. 4. – S. 303-314.
11. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. – 2019. – T. 378. – S. 686-707.
12. Lee S. H., Datta-Gupta A. Electrofacies characterization and permeability predictions in carbonate reservoirs: role of multivariate analysis and nonparametric regression // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 1999.
13. Al-Mudhafar W. J. Integrating well log interpretations for lithofacies classification and permeability modeling through advanced machine learning algorithms // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2017. – T. 7. – №. 4. – S. 1023-1033.
14. Kontorovich A.E., YAn P.A., Zamirajlova A.G., Kostyreva E.A., Eder V.G. Klassifikaciya porod Bazhenovskoj svity // Geologiya i geofizika. – 2016. – T.57. – №11. – S. 2034–2043.
15. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980.

© Е. Ю. Темникова, С. И. Грубасъ, А. А. Федосеев, 2021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ДАМБЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ АТМОСФЕРНЫМИ ВОДАМИ

Кристина Юрьевна Тулисова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, аспирант, e-mail: TulisovaKY@ipgg.sbras.ru

Татьяна Алексеевна Кулешова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, e-mail: KuleshovaTA@ipgg.sbras.ru

Алексей Михайлович Янников

Институт «Якутнипроалмаз», Россия, 678174, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Ленина, 39, к.г.-м.н., заведующий лабораторией, e-mail: YannikovAM@alrosa.ru

Наталья Викторовна Юркевич

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.г.-м.н., заведующий лабораторией эколого-экономического моделирования техногенных систем, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

В статье приведены результаты проточного эксперимента, моделирующего процесс растворения грунтов основания дамбы гидротехнического сооружения грунтовыми водами. Объектом исследования является хвостохранилище обогатительной фабрики, за время эксплуатации которой произошло растепление многолетнемерзлых грунтов береговых примыканий ограждающей дамбы, зафиксированы утечки значительных объёмов оборотных вод в расположенную ниже манёвровую ёмкость. Развитие фильтрационных каналов в трещиноватых тектонических зонах, слагающих прибортовой горный массив, не прекращается. По завершению эксперимента, который длился 20 недель, был получен массив измеренных показателей растворов на выходе из колонок: pH, удельная электропроводность и элементный состав. Полученные данные позволили оценить скорость растворения грунтов основания дамбы.

Ключевые слова: дамба, хвостохранилище, гидротехническое сооружение, растворение грунтов, кинетический эксперимент

MODELING OF THE PROCESS OF DISSOLUTION OF SOILS IN THE BASE OF A HYDRAULIC STRUCTURE BY ATMOSPHERIC WATER

Kristina Y. Tulisova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD Student, e-mail: TulisovaKY@ipgg.sbras.ru

Tatyana A. Kuleshova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Researcher, e-mail: KuleshovaTA@ipgg.sbras.ru

Alexey M. Yannikov

Institute "Yakutniproalmaz", Russia, 678174, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Lenin st., 39, Cand. Sc., Senior Researcher, e-mail: YannikovAM@alrosa.ru

The article presents the results of a flow-through experiment simulating the process of dissolution of soils of the foundation of a dam of a hydraulic structure by groundwater. The object of the study is the tailing dump of the concentrating plant, during the operation of which the permafrost soils of the coastal abutments of the enclosing dam thawed, significant volumes of circulating water leaked into the shunting tank located below. The development of filtration channels in fractured tectonic zones that make up the near-rock massif does not stop. Upon completion of the experiment, which lasted 20 weeks, an array of measured parameters of solutions at the exit from the columns was obtained: pH, specific conductivity and elemental composition. The data obtained made it possible to estimate the rate of dissolution of the soils of the dam foundation.

Keywords: dam, tailing dump, hydraulic structure, soil dissolution, kinetic experiment

Введение

Проблема складирования отходов горнорудного производства в криолитозоне стоит особо остро, что связано с деградацией вечной мерзлоты в результате техногенного растепления. В настоящее время в районах добычи твёрдых полезных ископаемых (Россия, Китай, Канада и др.) складированы миллионы кубометров промышленных отходов и пустой породы. В криолитозоне проблема складирования отходов обостряется за счет слабости экосистемы, водоупорных свойств мерзлых пород, развития деструктивных криогенных процессов [1, 2]. Ситуация осложняется трендами к потеплению климата, что особенно актуально для регионов, где в законсервированном (замороженном) состоянии хранятся несколько сотен миллионов кубометров отходов [3, 4]. Кроме того, процессы взаимодействия воды с отходами в условиях Крайнего Севера зачастую приводят к растеплению многолетнемерзлых грунтов, формированию техногенных таликов, утечкам техногенных вод, что в случае наличия разломных зон приводит к развитию фильтрационных каналов [5].

Исследуемый объект расположен в Западной Якутии. Хвостохранилище (ХХ) обогатительной фабрики алмазодобывающего предприятия введено в эксплуатацию в 1996 году, является гидротехническим сооружением I класса капитальности, по месту расположения – балочным, по способу заполнения – намытым. Емкость хвостохранилища при конечном уровне 605 м составляет 230,2 млн м³. За время эксплуатации ХХ произошло растепление многолетнемерзлых грунтов береговых примыканий ограждающей дамбы как по левому, так и по правому борту ХХ, через которые, начиная с 2000-2001 годов, зафиксированы утечки значительных объемов оборотных вод в расположенную ниже маневровую ёмкость. Развитие фильтрационных каналов в трещиноватых тектонических зонах, слагающих прибортовой горный массив, не прекращается [6].

Целью работы является оценка скорости растворения пород основания дамбы хвостохранилища.

Методы

В ходе работы экспедиционного отряда были отобраны пробы керн из скважин на территории ХХ.

Для эксперимента были взяты пробы из всех шести скважин. Образцы грунтов представлены тремя типами пород (известняк, мергель и хвостовой материал).

Полученные пробы пород были раздроблены, тщательно гомогенизированы многократным перемешиванием, расквартованы. Характеристика геохимического состава пород проводилась на основании определения оксидов силикатной группы, примесных элементов, форм серы (общая, сульфидная, сульфатная) и CO_2 .

Оценка скорости растворения грунтов основания дамбы в результате взаимодействия «вода-грунты» проводилась при помощи кинетических экспериментов.

Выбор проб для кинетических экспериментов был сделан, исходя из значений рН пасты, основного оксидного, микроэлементного и минералогического состава. Для получения объективной картины взаимодействия воды с грунтами основания дамбы ХХ ОФ № 14 отбирались мергели, известняки и хвостовые продукты как с низкими, так и с высокими значениями рН пасты и различными содержаниями пирита. Сделанный таким образом выбор проб для экспериментов обеспечил получение наиболее адекватной картины процессов растворения пород.

Условия экспериментов:

1. Использовались стандартные колонки размером 10 см (высота), 8 см (внешний диаметр) - 6.5 см (внутренний диаметр) (рис. 1).

2. Выщелачивание проводилось дистиллированной водой в атмосферных условиях.

3. Методика выщелачивания соответствует в общих положениях [7]:

а) образцы весом 0.3 кг загружаются в колонку;

б) заливается дистиллированная вода в количестве, достаточном для заполнения порового пространства (120 мл). Выдерживается 4 часа для растворения солей, присутствующих в пробе изначально (образовавшихся *in situ*);

в) сливается раствор, слив маркируется как проба «Неделя 0», определяется рН, УЭП, концентрации анионов (сульфат, карбонат, хлориды), основных катионов и металлов;

г) начинаются следующие двадцать недель.



Рис.1. Схема эксперимента

В каждой неделе образец продувался ежедневно сухим воздухом (Air Pump, Output 0.0098С.С./Min), на седьмой день производился смыв дистиллятом в объеме 50 мл и определялись все вышеуказанные характеристики раствора.

Ионный и микроэлементный состав растворов в каждой пробе определяли методом ICP-MS и капиллярного электрофореза.

Результаты

Силикатный состав пород варьирует в широком диапазоне. Согласно данным опробования проанализированная коллекция представлена семью типами пород: известняками, мергелями, глинами, суглинками, супесями, псефитами и метаморфитом. Вертикальное распределение оксидов силикатной группы по скважинам очень неравномерно.

По данным анализа оксидов силикатной группы техногенные прослои характеризуются накоплением SO_3 , MgO , P_2O_5 , Fe , Cr , Ni , Ba , а промытые известняки – снижением концентраций наиболее подвижных при взаимодействии «вода-порода» химических элементов.

Рассмотрим динамику полученных данных спустя двадцать недель эксперимента на примере пробы 2/55 (известняк).

При взаимодействии с дистиллированной водой значения pH смывов образца повышается от ~7.5 в начале эксперимента до ~8.5 уже на третьей неделе (рис. 3). Значения УЭП смывов понижается с ~2500 мкСм/см до ~500 мкСм/см. На 3 неделе УЭП повышается до ~1250 мкСм/см, но на четвертой неделе снова снижается до ~500 мкСм/см и остается в диапазоне этого значения до конца эксперимента (рис. 2).

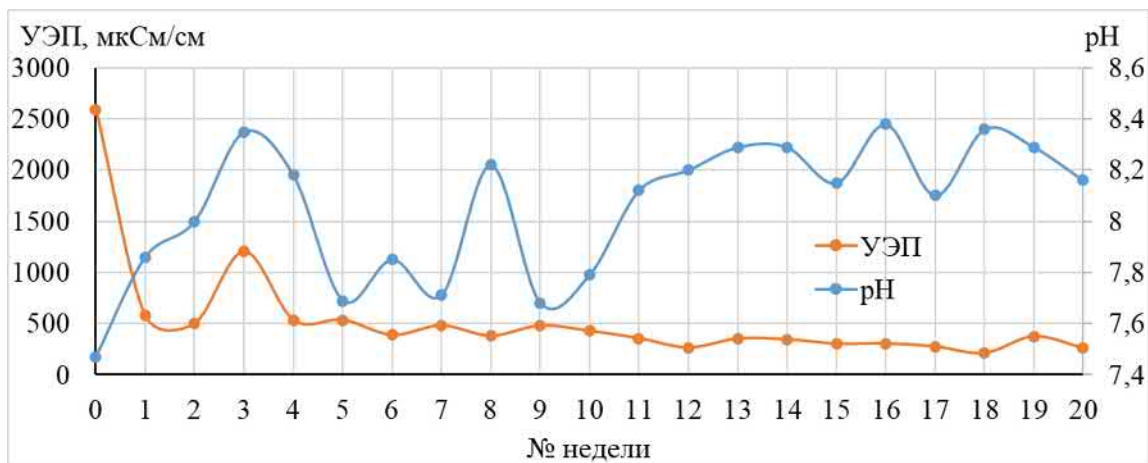


Рис. 2. Графики изменения значений pH и УЭП (проба 2/55)

После исследования динамики концентраций SO_4^{2-} , Cl^- , Ca , Mg , K и Na , значений pH и удельной электропроводности в ходе динамического эксперимента были рассчитаны доли элементов, перешедших из грунтов в раствор (табл. 1).

Пробы из скважины №4 (4/11 и 4/25) соответствуют хвостовому материалу. Доли элементов, перешедших в раствор, в них выше, чем в остальных образцах: Na - 35.76 и 37.37 %, K 12.43 и 8.21% для проб 4/11 и 4/25 соответственно.

Таблица 1

Доли элементов (% от общего содержания в колонке),
перешедших из грунтов в раствор

<i>Проба\Элемент</i>	<i>Ca, %</i>	<i>Mg, %</i>	<i>K, %</i>	<i>Na, %</i>
2/55	2.0	2.3	1.3	17
3/60	0.35	1.6	5.1	18
4/11	0.47	1.3	12	36
4/25	0.88	1.3	8.2	37
5/65	2.2	4.7	3.6	8.1
6/38	0.12	0.72	5.4	14

Результаты кинетических экспериментов с принудительной продувкой воздухом указывают на растворение около 0.1 % известняков (по кальцию). Если рассматривать реакции взаимодействия вода-порода в зоне фильтрации (активного тепло- и массопереноса) в право- и левобережном примыканиях, то по нашим оценкам процессам растворения подвергается 0.01 % известняков. В объёмной выражении, с учётом расхода обходной фильтрации это составляет порядка 250 м³ известняка (по кальциту) в год. Плановое расположение растворяемого известняка сложно прогнозируемо и может быть принято равномерным в нижней трети пути массопереноса фильтрата (зона активного водо- массового обмена).

Взаимодействие известняков с водой в проточном режиме с принудительной продувкой воздухом приводит к растворению 0.38 % соединений кальция, 0.70 % магния, что на 2 порядка выше, чем в статичном варианте. Аналогичные оценки были сделаны для мергелей и хвостов. Хвосты являются поставщиками водорастворимых соединений серы (прежде всего, сульфат-ионов) и кальция (на том же уровне, что известняки).

Исследование выполнено по программе ФНИ (проект № 0266-2019-0008).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шерстюков А. Б. Многолетняя мерзлота России в условиях глобального потепления климата // Проблемы региональной экологии. – 2007. – №. 4. – С. 6-10.
2. Гребенец В. И. и др. Проблема размещения отходов в арктических регионах России // Проблемы региональной экологии. – 2019. – №. 5.

3. Шевчук А. В. Вопросы развития Арктики и экологическая безопасность // Современные производительные силы. – 2015. – №. 3. – С. 59-73.
4. Данилов П. П. Почвенный покров пригородной зоны г. Мирного и воздействие на него Объектов алмазодобывающей промышленности: дис. – Улан-Удэ : [Ин-т прикл. экологии Севера АН Респ. Саха (Якутия)], 2005.
5. Гребенец В. И. Негативные последствия деградации мерзлоты // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2007. – №. 3. – С. 18-21.
6. Отчёт о НИР «Комплексное изучение целостности массива дамбы и ложа хвостохранилища геохимическими методами» – ИНГГ СО РАН. – Новосибирск. – 2020. – 130 с.
7. ASTM (2020) D3987-12: Standard Practice for Shake Extraction of Solid Waste with Water. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

REFERENCES

1. SHerstyukov A. B. Mnogoletnyaya merzlota Rossii v usloviyah global'nogo potepleniya klimata // Problemy regional'noj ekologii. – 2007. – №. 4. – С. 6-10.
2. Grebenec V. I. i dr. Problema razmeshcheniya othodov v arkticheskikh regionah Rossii // Problemy regional'noj ekologii. – 2019. – №. 5.
3. SHEvchuk A. V. Voprosy razvitiya Arktiki i ekologicheskaya bezopasnost' // Sovremennye proizvoditel'nye sily. – 2015. – №. 3. – С. 59-73.
4. Danilov P. P. Pochvennyj pokrov prigorodnoj zony g. Mirnogo i vozdejstvie na nego Ob"ektovalmazodobyvayushchej promyshlennosti: dis. – Ulan-Ude : [In-t prikl. ekologii Severa AN Resp. Saha (YAkutiya)], 2005.
5. Grebenec V. I. Negativnye posledstviya degradacii merzloty // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. – 2007. – №. 3. – С. 18-21.
6. Otchyot o NIR «Kompleksnoe izuchenie celostnosti massiva damby i lozha hvostohranilishcha geohimicheskimi metodami» – INGG SO RAN. – Novosibirsk. – 2020. – 130 s.
7. ASTM (2020) D3987-12: Standard Practice for Shake Extraction of Solid Waste with Water. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

© К. Ю. Тулисова, Т. А. Кулешова, А. М. Янников, Н. В. Юркевич, 2021

РАЗРАБОТКА И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПАКТНОЙ МАЛОГЛУБИННОЙ АППАРАТУРЫ ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Денис Игоревич Фадеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, e-mail: FadeevDI@ipgg.sbras.ru

В статье описаны экспериментальные работы по выявлению характеристик и закономерностей зависимости уровня сигнала от параметров разрабатываемой новой компактной аппаратуры индукционных электромагнитных исследований. Показана применимость разработанного аппаратно программного комплекса для решения не типичных задач электроразведки.

Ключевые слова: аппаратура электромагнитных исследований, компактные индукционные приборы, малоглубинная геофизика

DEVELOPMENT AND EXPERIENCE OF APPLICATION OF COMPACT NEAR SURFACE EQUIPMENT FOR INDUCTION ELECTROMAGNETIC RESEARCH

Denis I. Fadeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuga Ave., Researcher, e-mail: FadeevDI@ipgg.sbras.ru

The article describes experimental work to identify the characteristics and patterns of the dependence of the signal level on the parameters of the new compact near surface equipment being developed for induction electromagnetic research. The applicability of the developed hardware-software complex for solving non-typical problems of electrical prospecting is shown.

Key words: equipment for electromagnetic research, compact induction instruments, near surface geophysics

Актуальность работы обусловлена необходимостью развития геофизических методов изучения первых метров геологической среды. Эта область верхней части разреза наиболее подвержена антропогенному и техногенному воздействию, и потому, зачастую неоднородна, при этом являясь объектом научных и инженерных изысканий по всему миру. Несмотря на близость области изучения наиболее употребительными остаются прямые методы исследований (вскрытие, экскавация), как самые простые и не требующие специальных технологий. Решением задачи бесконтактного изучения первых метров разреза может являться индукционная электроразведка. Принципы малоглубинных индукционных исследований нашли отражение в целом ряде приборов (например, линейки приборов Geonics Limited: EM-31, 34, 38; Geophex Ltd: GEM-2, 3, 5 и другие). Среди компактных устройств для индукционных исследований известна российская аппаратура ЭМС, разработанная в ИНГГ СО РАН [Манштейн и др., 2000; Манштейн и др., 2008], среди зарубежных - GEM-2, DUALEM, CMD-Explorer [Won et al., 1996; Taylor, 2000]. Но, несмотря на достаточно длительное развитие

данной геофизической отрасли, выпускаемая компактная аппаратура имеет недостатки, а сама эффективность применения малоглубинных индукционных зондирований является предметом споров [Gebbers and Lück, 2005; Clay, 2006]. Если не выполняется компенсация прямого поля (двухкатушечный зонд), то это уменьшает информативность сигнала, так как сигнал от первичного поля (генераторная петля) выступает в качестве помехи. Схемы с компенсацией первичного поля работают лучше, но их настройка и калибровка требуют применения сложных электротехнических схем и конструктивных решений. Остро встал вопрос о нахождении альтернативного метода компенсации поля генератора. В результате исследований было обнаружено наличие поверхности, на которой вертикальная компонента магнитного поля меняет знак, проходит через ноль. Данный результат дал предпосылки к созданию прибора, у которого регистрирующая катушка расположена в зоне минимального прямого поля.

Для определения оптимальной конструкции разрабатываемой аппаратуры необходимо определить зависимости между ее характеристиками и измеряемым сигналом, а также наложить ограничения. Измеряемая в аппаратуре э.д.с. зависит от вертикальной компоненты напряженности магнитного поля H_z , эта компонента напряженности магнитного поля, источником которого является вертикальный магнитный диполь, расположенный на поверхности немагнитной (магнитная проницаемость принята всюду постоянной и равной значению в вакууме) горизонтально-слоистой среды, и измеряемая приемным диполем выглядит следующим образом:

$$1. H_z = \frac{M_t M_R}{2\pi} \int_0^\infty \lambda^3 J_0(\lambda r) X_N d\lambda \quad (1)$$

где N – количество слоёв, X_N – слоистая функция, которая вычисляется рекурсивным алгоритмом, приведенным в следующих источниках [Могилатов, 1993]. Как мы видим из уравнения (1) напряженность поля прямо пропорциональна моменту генераторного (M_t) и приемного магнитного диполя (M_R). Таким образом возможно добиться улучшения качества собираемой о геоэлектрическом разрезе информации увеличив момент передающей и регистрирующей катушек.

Полный момент источника вычисляется следующим образом:

$$2. M_t(f) = I \cdot S \cdot n \quad (2)$$

где $S = \pi R^2$ – площадь генераторной петли, R – радиус генераторной петли, n – число витков генераторной петли, I – сила тока в генераторе. Так как частота свободных колебаний является частотой резонанса контура, реактивное сопротивление индуктивности равно реактивному сопротивлению ёмкости:

$$3. R_L = 2\pi f L = R_C = 1/(2\pi f C) \quad (3)$$

Таким образом емкость подбирается такой чтобы соблюдалось условие резонанса, ее значение определяется индуктивностью контура.

Для расчета индуктивности многослойной катушки воспользуемся эмпирической формулой [Wheller, 1982]:

$$4. L = 0.02 \frac{R^2 n^2}{6R + 9l + 10c} \quad (4)$$

где R – средний радиус намотки, l – длина намотки, c – толщина намотки. Получаем что индуктивность пропорциональна квадрату числа витков $L \propto n^2$.

Для решения задачи повышения эффективности результатов малоглубинных индукционных исследований необходимо добиться наибольших значений момента генераторной и приемной катушек. При этом диаметр генераторной петли должен быть выбран таким, чтобы была возможность рассмотрения источника в виде магнитного диполя, расположенного на границе воздух-земля. Дополнительное ограничение на параметры петли накладывает условие резонанса (3)(3), так как необходимо подобрать конденсатор номиналом меньше 4 мкФ в связи с ограничениями по габаритам схемы и их температурной стабильности. Важно отметить необходимость применения конденсаторов способных проводить ток. В нашем случае это К73-17 – металлизированные пленочные конденсаторы группы диэлектрика полиэтилентерефталат (конденсатор, изготавливается из двух лент фольги, оксидированной и неоксидированной, между которыми размещается прокладка из бумаги пропитанная электролитом). Таким образом индуктивность должна быть больше $5.5 \cdot 10^{-5}$ Гн. Задача сводится к максимизации момента при варьировании параметров: R – радиус генераторной петли, n – число витков. При этом остаются постоянными параметры намотки катушки индуктивности и режима измерений.

Рисунок 1 демонстрирует результаты расчетов момента и тока в генераторной катушке для частоты 12.3 кГц, в зависимости от количества витков и их радиуса. Мы можем наблюдать некоторые зависимости, а именно: рост момента с увеличением радиуса катушки и уменьшение момента при наращивании числа витков, что связано с ростом индуктивности катушки (пропорционально квадрату числа витков) и как следствие падением уровня тока. Ток в генераторной катушке также обратно пропорционален радиусу витка (4). Следуя приведенным закономерностям, учитывая ограничения, накладываемые дипольным приближением и условием резонанса, с учетом опытных работ по изучению реальных объектов при помощи прототипа (Балков и др., 2014) возможно определить оптимальные параметры для аппаратуры.

Для любой аппаратуры важным параметром является время его работы без подзарядки. В случае многократного повторения измерений основной вклад в энергопотребление вносит генератор. Создание сигнала с необходимой частотой происходит в две фазы: первая генерирует короткий импульс шириной $\tau = \frac{T}{8}$, и расстоянием между импульсами – T . На втором этапе генерируется импульс с такой же амплитудой, но противоположный по знаку. Его характеристики аналогичны предыдущему. Тем самым получаем, что время работы генератора за

период времени равно $\frac{3T}{8}$. Кроме непосредственно генератора, необходимо учесть потребление управляющего модуля. Он затрачивает энергию сразу после включения прибора, в постоянном режиме. В таком режиме прибору необходим ток 0.32 А. Время работы АЦП составляет примерно $80 \cdot 10^{-3}$ с. Общее время цикла работы порядка 0.1 с.

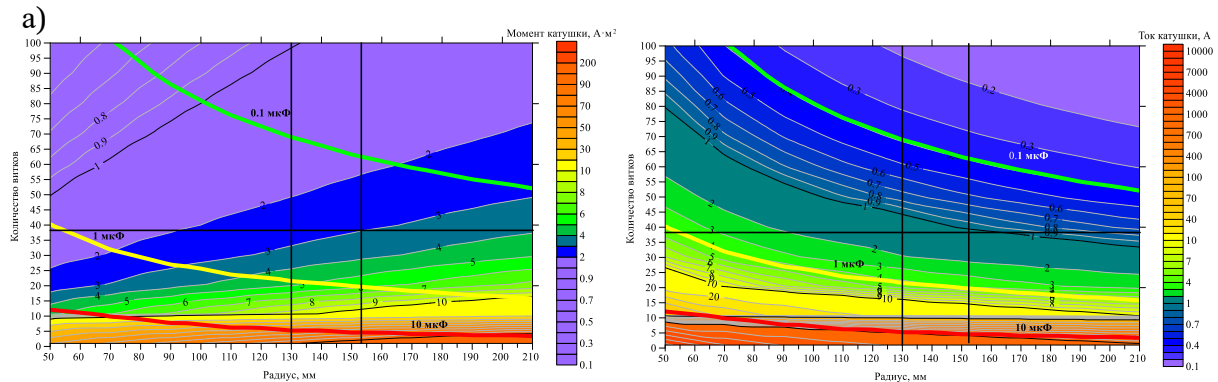


Рис. 1 Распределение момента катушки (а) и тока в генераторе (б) в зависимости от числа витков и их радиуса

Были проведены эксперименты по измерению тока потребления непосредственно при работе прибора. Измерения проводились на широком ряде частот с тремя повторениями и дальнейшим осреднением (Таблица 1). Измеренные данные достаточно приемлемо укладываются в тренд степенной функции, и могут быть интерполированы на больший диапазон частот (Рисунок 2). Используемая в аппаратуре батарея способна обеспечивать такой режим потребления тока в течение 10 часов без изменения технических характеристик.

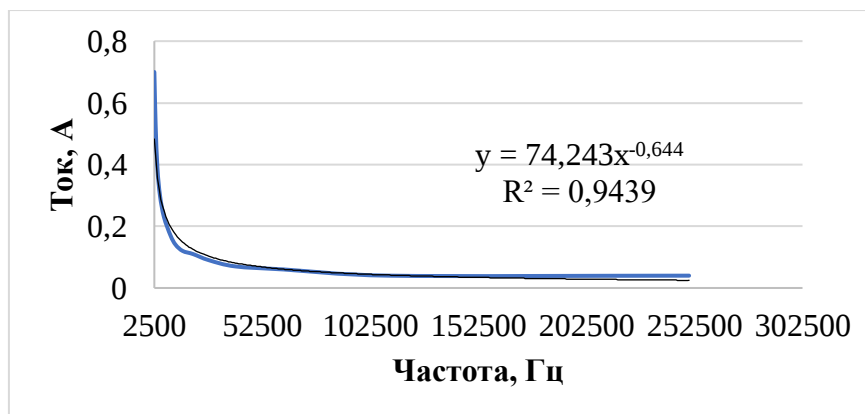


Рис. 21 График зависимости тока потребления, за вычетом постоянной добавки холостого хода, от частоты

Результаты эксперимента по нахождению тока потребления

Ток потребления				В холостом режиме, А
#F	f, Гц	I, А	I-I _{холост}	0,32
1	2501	1,02	0,7	
2	3081	0,85	0,53	
3	3907	0,71	0,39	
4	5103	0,62	0,3	
5	6945	0,55	0,23	
6	10001	0,49	0,17	
7	12346	0,46	0,14	
8	15620	0,44	0,12	
9	20409	0,43	0,11	
10	27779	0,41	0,09	
11	40001	0,39	0,07	
12	62502	0,38	0,06	
13	111113	0,36	0,04	
14	250004	0,36	0,04	

Чувствительность аппаратуры к изменениям УЭС среды дает основания для применения при изучении сложно построенных сред, значительно отличающихся от горизонтально слоистой. Решающее значение в формировании аномалий в такой среде являются антропогенные и техногенные мишени. Малоглубинность и высокая разрешающая способность разрабатываемого аппаратно-программного комплекса позволяют находить его применение в областях недоступных другим методам. Применение аппаратуры для решения не профильных задач - один из способов ее развития. Проведение опытных и пилотных работ помогает определить параметры, улучшение которых, необходимо для успешного решения конкретного типа задач.

Не многие геофизические методы могут применены в зданиях. Безоговорочным лидером тут являются георадары. Но разрабатываемая аппаратура может выступать альтернативным способом решения задачи определения структуры балочных перекрытий. Были проведены опытные экспериментальные исследования балочных перекрытий в рамках работы выставки Инженерная геофизика 2019 (г. Геленджик, Россия). Рисунок 3

Рис. демонстрирует пример профильной кривой, на которой виде локальных минимумов выделяются 7 балок. Увеличение уровня сигнала к центру зала связано с находящимися по этой прямой коммуникациями. Проведённая следом георадарная съемка подтвердила определенную аппаратурой структуру. Таким образом, несмотря на наличие постоянных и периодических помех в зданиях, применение аппаратуры с достаточной достоверностью помогает решать такой тип задач. Так как уровень полезного сигнала от балок порядка 2000 ед. эффективность использования аппаратуры может быть значительно увеличена за счет снижения ее чувствительности. Это позволит убрать значительную часть издержек при ее производстве и повысить рентабельность ее использования.

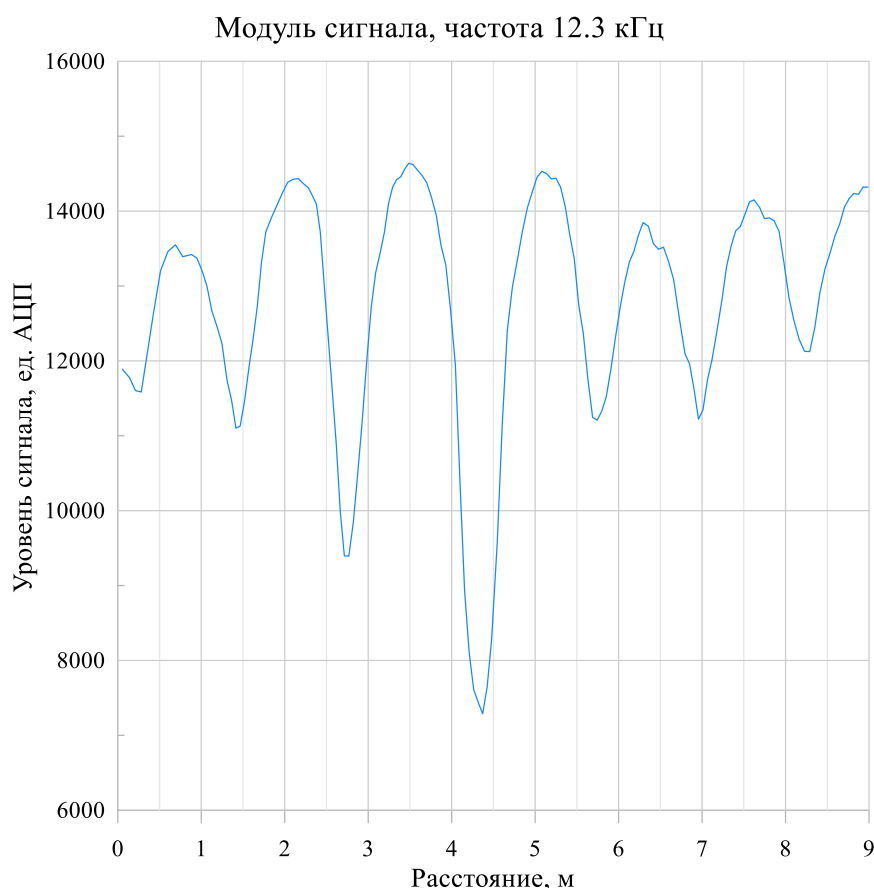


Рис. 3 Профильная кривая измерений, проведенных в стенах здания.
В виде локальных минимумов ярко выражаются металлические балки в полу

Рассматривать задачу локализации пустот можно в рамках поиска ограниченного объема, заполненного воздухом, в более проводящей вмещающей среде. Разрешимость задачи в таком случае явно зависит не только от геометрических размеров и глубины до кровли, но и сопротивления вмещающей среды. В случае пород умеренной проводимости ($УЭС\ 50-150\ Ом\cdot м$) удастся решить задачу при глубине залегания кровли объекта до 2 м. Рисунок 4 отображает результаты проведенных изысканий по поиску погребенного бункера. В структуре сооружения нет армированных элементов, соответственно поисковым признаком будет повышенное сопротивление по сравнению со вмещающей средой. На картах распределения кажущего $УЭС$ можно выделить две области, начинающиеся проявляется с 1.5 метров глубины на интервале 2-4 метра по оси X и 1.5-2.5 метра по оси Y. На дневной поверхности асфальтовое покрытие до 14 метра по оси X. Эскавация обозначенного участка подтвердила наличие искомого объекта на 2-4 метрах. Аномалия, выделяемая на 7 метре, не нашла отражения при вскрытии, возможно она связана с выемкой и последующим возвратом грунта при строительстве сооружения.

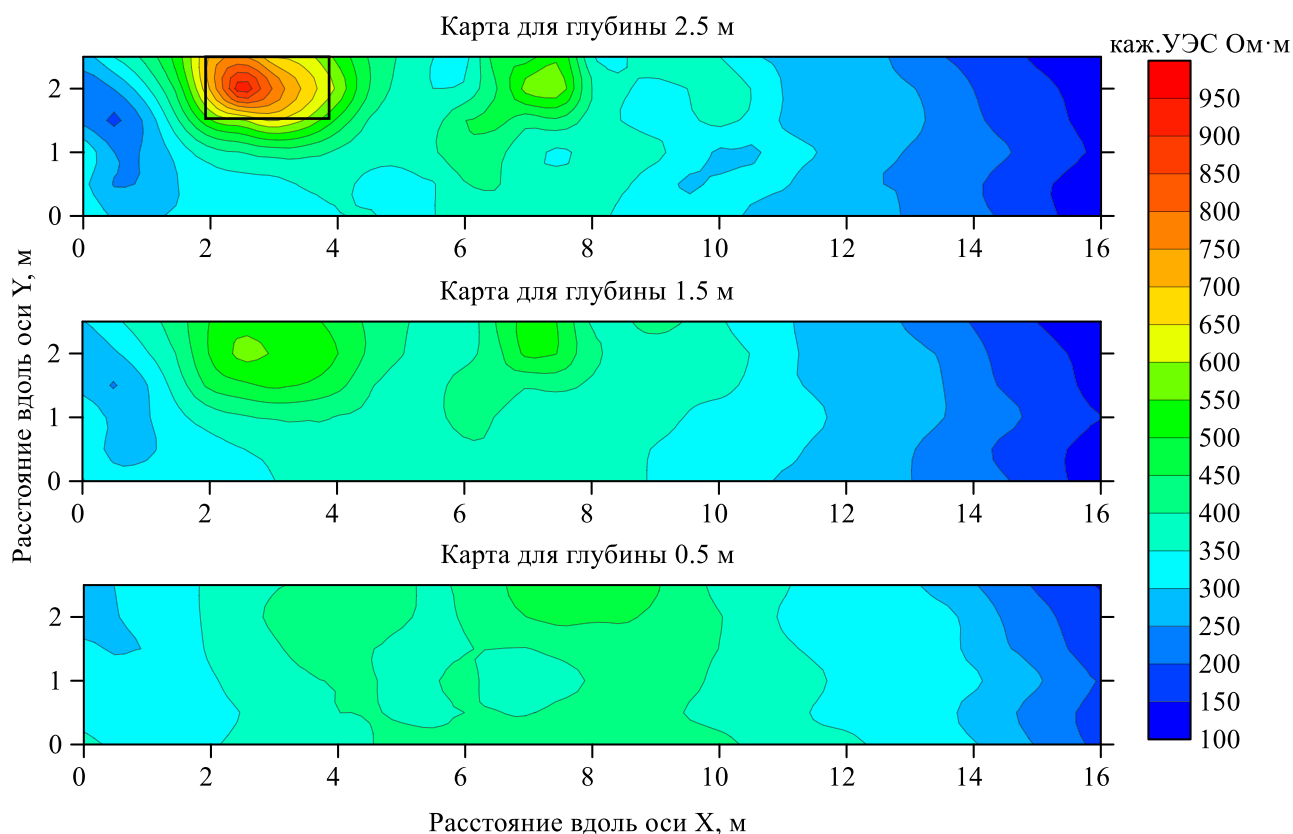


Рис. 4 Карты распределения кажущегося удельного электрического сопротивления для трех частот аппаратуры Геовизер. Задача локализации полости. Подтверждено ее наличие на 2-4 метрах по оси X

В результате проведенных исследований установлены некоторые технические характеристики аппаратуры и зависимости, позволяющие подобрать оптимальные параметры компактного индукционного прибора под конкретные ограничения и задачи. Опытные работы по изучению не типичных задач электроразведки показали возможность применения разработанного аппаратурно программного комплекса при их решении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балков Е.В., Халатов С.Ю., Манштейн А.К., Панин Г.Л. Малоглубинное электромагнитное профилирование компактной аппаратурой: теоретические оценки и результаты экспериментальных работ [Электронный ресурс] // Инженерная геофизика 2014: 10-я юбилейная конференция и выставка (г. Геленджик, 21-25 апреля 2014 г.). – 2014.
2. Манштейн А.К., Панин Г.Л., Тикунов С.Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования “ЭМС” // Геология и геофизика. – 2008. – № 6. – С. 571–579.
3. Манштейн А.К., Эпов М.И., Воевода В.В., Сухорукова К.В. Способ индукционного частотного зондирования: пат. 2152058 Российская федерация, МПК G01V 3/10 / заявитель и патентообладатель ИНГГ СО РАН; заявл. 24.06.1998, опубл. 2000, Бюл. № 18.
4. Могилатов В.С. Об одном способе решения основной прямой задачи электроразведки ЗС // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34. – № 3. – С. 108-117.

5. Clay R.B. Conductivity (EM) survey: A survival manual // Remote Sensing in Archaeology—An Explicit North American Perspective; Johnson, K., Ed.; University of Alabama: Tuscaloosa, AL, USA, 2006, P. 79–107.
6. Gebbers R. and Lück E. Comparison of geoelectrical methods for soil mapping // 5th European Conference on Precision Agriculture (5ECPA) and Precision Livestock Farming (2ECPLF), Uppsala, Sweden, 9–12 June 2005.
7. Taylor R.S. Mapping sites of environmental contamination with a dual-geometry electromagnetic (EM) system. Proceeding of the Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting, Expanded Abstracts. –2000. – E12.
8. Wheller H.A. Inductance formulas for circular and square coils // Proc. IEEE. – 1982. – Vol. 70. – № 12. – P. 1449-1450.
9. Won I.J., Keiswetter D.A., Fields G.R.A., Sutton L.C. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1996. – V. 2(1). – P. 129-138.

REFERENCES

1. Balkov E.V., Halatov S.YU., Manshtejn A.K., Panin G.L. Maloglubinnoe elektromagnitnoe profilirovanie kompaktnoj apparaturoj: teoreticheskie ocenki i rezul'taty eksperimental'nyh rabot [Elektronnyj resurs] // Inzhenernaya geofizika 2014: 10-ya yubilejnaya konferenciya i vystavka (g. Gelendzhik, 21-25 aprelya 2014 g.). – 2014.
2. Manshtejn A.K., Panin G.L., Tikunov S.YU. Apparatura chastotnogo elektromagnitnogo zondirovaniya “EMS” // Geologiya i geofizika. – 2008. – № 6. – С. 571–579.
3. Manshtejn A.K., Epov M.I., Voevoda V.V., Suhorukova K.V. Sposob indukcionnogo chastotnogo zondirovaniya: pat. 2152058 Rossijskaya federaciya, MPK G01V 3/10 / заявитель i патентообладатель INGG SO RAN; заявл. 24.06.1998, опубли. 2000, Бюл. № 18.
4. Mogilatov V.S. Ob odnom sposobe resheniya osnovnoj pryamoj zadachi elektrorazvedki ZS // Geologiya i geofizika. – 1993. – Т. 34. – № 3. – С. 108-117.
5. Clay R.B. Conductivity (EM) survey: A survival manual // Remote Sensing in Archaeology—An Explicit North American Perspective; Johnson, K., Ed.; University of Alabama: Tuscaloosa, AL, USA, 2006, P. 79–107.
6. Gebbers R. and Lück E. Comparison of geoelectrical methods for soil mapping // 5th European Conference on Precision Agriculture (5ECPA) and Precision Livestock Farming (2ECPLF), Uppsala, Sweden, 9–12 June 2005.
7. Taylor R.S. Mapping sites of environmental contamination with a dual-geometry electromagnetic (EM) system. Proceeding of the Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting, Expanded Abstracts. –2000. – E12.
8. Wheller H.A. Inductance formulas for circular and square coils // Proc. IEEE. – 1982. – Vol. 70. – № 12. – P. 1449-1450.
9. Won I.J., Keiswetter D.A., Fields G.R.A., Sutton L.C. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1996. – V. 2(1). – P. 129-138.

© Д. И. Фадеев, 2021

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА НА СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИИ

Константин Владимирович Федин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, старший преподаватель каф. геофизики; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса 20, доцент каф. геофизики.

Елизавета Эдуардовна Косякина

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса 20, студент Физико-технического факультета, кафедры геофизических систем, e-mail: lilavati21@mail.ru

В статье приведены результаты натурных экспериментов по изучению влияния собственных частот в грунте и постоянного внешнего воздействия с течением времени на устойчивость инженерных сооружений. Показано, что частотно-амплитудный спектр собственных колебаний исследуемого многоэтажного жилого здания с течением времени не изменяется.

Ключевые слова: сейсмобезопасность, собственные колебания здания, резонансные свойства приповерхностных грунтов, сезонные изменения, пассивные сейсмические наблюдения

ASSESSMENT OF THE SEISMIC SAFETY OF ENGINEERING STRUCTURES BASED ON ACOUSTIC NOISE

Konstantin V. Fedin

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Koptuyga 3, PhD, Senior Researcher, e-mail: fedinkv@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Senior Lecturer of the Department of Geophysics; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Avenue 20, Associate Professor of the Department of Geophysical Systems

Elizaveta E. Kosyakina

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Avenue 20, Student of the Faculty of Physics and Technology, Department of Geophysical Systems, e-mail: lilavati21@mail.ru

The article presents the results of field experiments on the influence of the natural frequencies in the soil and constant exposure to the outside over time for stability engineering structures. It is shown that the frequency-amplitude spectrum of the natural oscillations of the investigated multi-storey residential building does not change over time.

Keywords: seismic safety, natural oscillations of the building, resonance properties of near-surface soils, seasonal changes, passive seismic observations

Инженерная сейсмология содержит методы исследований реакции сооружений на сейсмическое воздействие. В них входят: тестирование ударом [1], когда измеряется отклик системы на удар, снабжённый датчиком для записи колебаний; испытания зданий с мощными вибраторами, где силовая камера центробежного вибратора устанавливается на крыше и в монохроматическом режиме с набором заданных интенсивностей осуществляется раскачивание здания до разрушения, а также вибрационное тестирование здания источником, размещённым за пределами инженерного сооружения [2]; исследование колебаний здания под воздействием промышленных взрывов [3]; исследование реакций инженерных сооружений на землетрясения [4,5,6,7]; исследование инженерных сооружений на базе изучения микросейсмических колебаний [8].

В процессе эксплуатации инженерных объектов также могут происходить изменения собственных частот вследствие различных изменений их конструкции (возникновения дефектов, естественного старения и прочего) [9,10]. Небольшие изменения собственных частот могут происходить и в течение относительно коротких временных отрезков, например, под влиянием сезонных изменений климатических условий [11, 12]. Поэтому при обследовании и мониторинге технического состояния зданий и сооружений, значительная роль отводится экспериментальным методам определения собственных частот и форм колебаний таких объектов.

Авторами работы [8] было проведено исследование о зависимости устойчивости инженерных сооружений от резонанса приповерхностных грунтов. Результаты проведённых в данной работе экспериментов по выявлению собственных частот жилого десятиэтажного здания и верхнего слоя земной поверхности определялись по данным сейсмоакустических измерений. В итоге при накоплении амплитудных спектров шумовых записей (без активных источников), зарегистрированных на несущей стене здания, и регистрации собственных частот приповерхностных грунтов вблизи сооружения, была определена зависимость влияния собственных частот в грунте на собственные частоты здания. Также было установлено, что резонанс приповерхностных грунтов зависит от сезонных изменений температур.

Поскольку одна из низших мод (3.17 Гц) собственных колебаний здания зимой совпала с собственными частотами в грунте в зимний период (летом совпадения отсутствуют), были проверены измерения частотно-амплитудного характера исследуемого объекта с течением времени, т.к. существует вероятность, что в случае землетрясения здание может войти в резонанс (т.к. его собственная частота колебаний может совпасть с одной из частот собственных колебаний верхней поверхности грунта). А также на определенной частоте, в зависимости прочности материалов конструкции, может произойти образование трещин в местах пучностей на частотно-амплитудном распределении вдоль несущей стены здания, что в свою очередь может привести к обрушению конструкции здания.

В связи с этим в рамках данной работы проведено повторное исследование для оценки постоянного внешнего воздействия (со стороны железнодорожных

путей и автомагистрали М52) на сейсмобезопасность конструкции исследуемого сооружения, находящегося по адресу г. Новосибирск, ул. Разъездная, д.10.

Ранее, при обследовании этого здания нами была использована методика, которая заключается в том, что мы производим регистрацию акустических шумов, образованных от внешних источников на несущей стене. Затем акустические шумы разбиваются на фрагменты (блоки). В нашем случае один фрагмент состоит из 8192 отсчёта. Время регистрации данных составляет 30 мин, после этого времени амплитудные характеристики не меняются. Исследования проводились в два периода времени года: летом и зимой.

В каждом таком фрагменте считаются амплитудные спектры, затем они суммируются, в результате получается усреднённый амплитудный спектр, на котором видны резкие когерентные пики, которые соответствуют собственным частотам исследуемого здания. Пример такого спектра приведён на рис. 1.

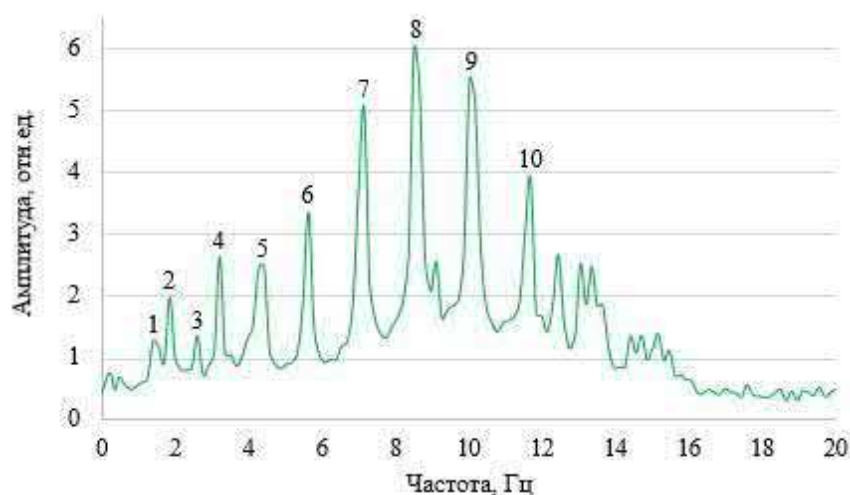


Рис. 1. Усреднённый амплитудный спектр шумовых записей, зарегистрированных в здании летом 2020 года

При построении частотно-амплитудного распределения вдоль стены для каждой точки измерения считается усреднённый спектр. В программе Surfer с помощью метода интерполяции “Triangulation with Linear Interpolation” строится частотно-амплитудное распределение по высоте здания.

Измерения проводились с помощью одноканальных цифровых регистраторов Texan (RefTek-125A) с горизонтальными геофонами GS-20DX. Частота дискретизации при регистрации составляла 1 кГц. Следует отметить, что чувствительность геофонов на частотах ниже 10 Гц резко снижается. Однако, как было показано в работе [8], накопление большого количества амплитудных спектров шумовых записей позволяет выделять стоячие волны даже с более низкими частотами.

Также стоит отметить, что уровень шумового воздействия на находящиеся вблизи от железнодорожных путей инженерные сооружения находится в

диапазоне частот приблизительно от 1 до 300 Гц [13]. Шумовое воздействие в таком диапазоне частот позволяет при регистрации данных получать все интересные нас когерентные пики.

По результатам измерений, наглядно видно резкое увеличение амплитудных составляющих, которое чётко можно наблюдать из сравнения построенных обобщённых амплитудных спектров в здании (рис. 2, а, б).

На частотно-амплитудном распределении вдоль несущей стены наблюдается резкое увеличение амплитуды начиная с 5 до 7 этажа, которое может быть связано с несколькими факторами:

- воздействие акустического шума от железнодорожных путей дало изменение картины распределения амплитудных спектров исследуемого сооружения;
- есть вероятность того, что при ремонтных работах, проведённых в период с 2018 по 2020 год, была повреждена несущая строительная конструкция здания.

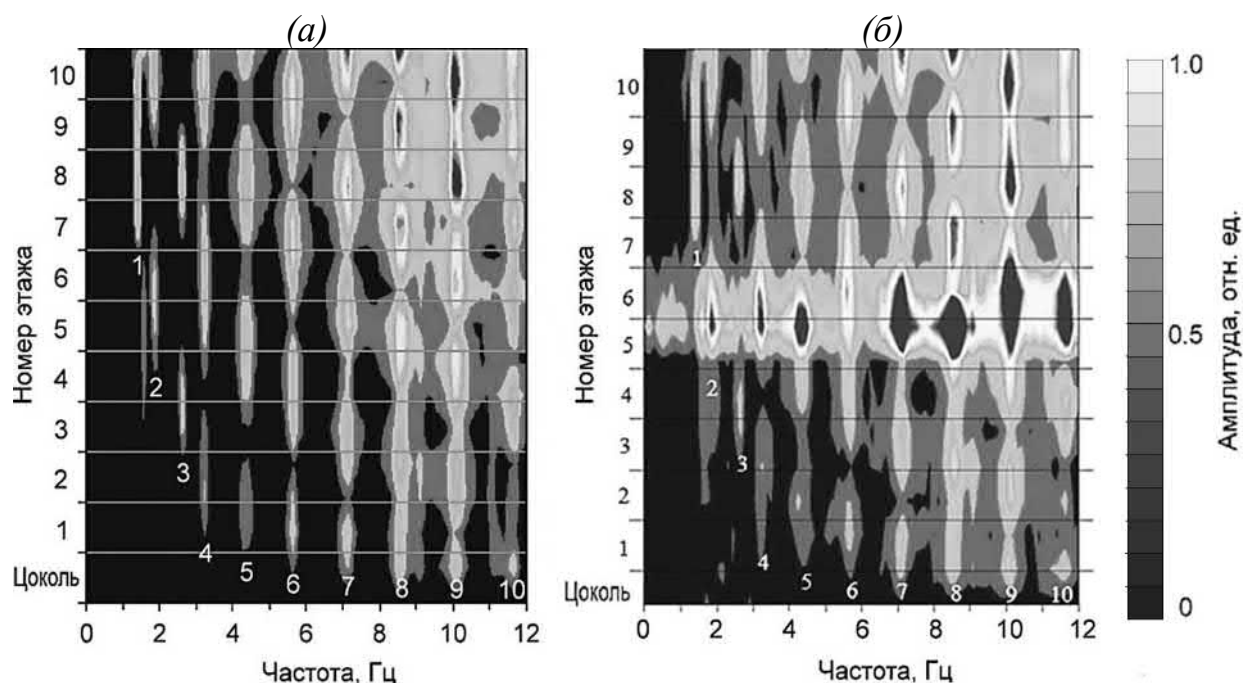


Рис. 2. Сравнение распределений амплитудных спектров по высоте здания, измеренных в 2018 (а) и 2020 (б) годах

Были построены нормированные обобщенные амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных в доме, и проведено их сравнение за 2018 и 2020 года (рис. 3).

Совместная визуализация распределения амплитудных спектров по высоте здания и обобщенного нормированного амплитудного спектра шумовых записей даёт нам более полную картину для оценки, а также позволяет убедиться, что наблюдаемые на амплитудных спектрах пики соответствуют именно стоячим волнам. Аналогичные результаты были получены при физическом и численном моделировании столбчатого типа здания.

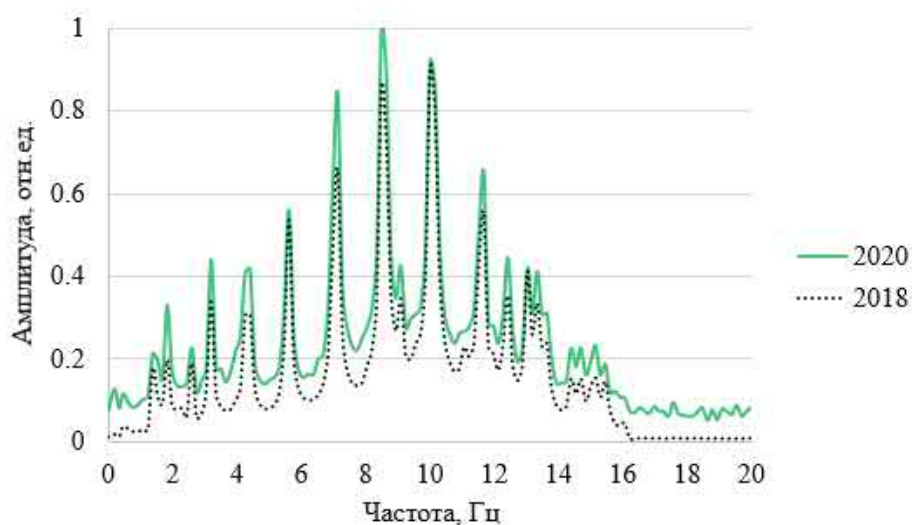


Рис. 3. Нормированные обобщённые амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных в здании летом 2018 и 2020 годах

Что же касается колебаний верхнего разреза грунта, то по полученным зимой данным (рис. 4) первая сильная мода появляется на частоте 3,22 Гц, ранее она находилась на частоте равной 3,17 Гц.

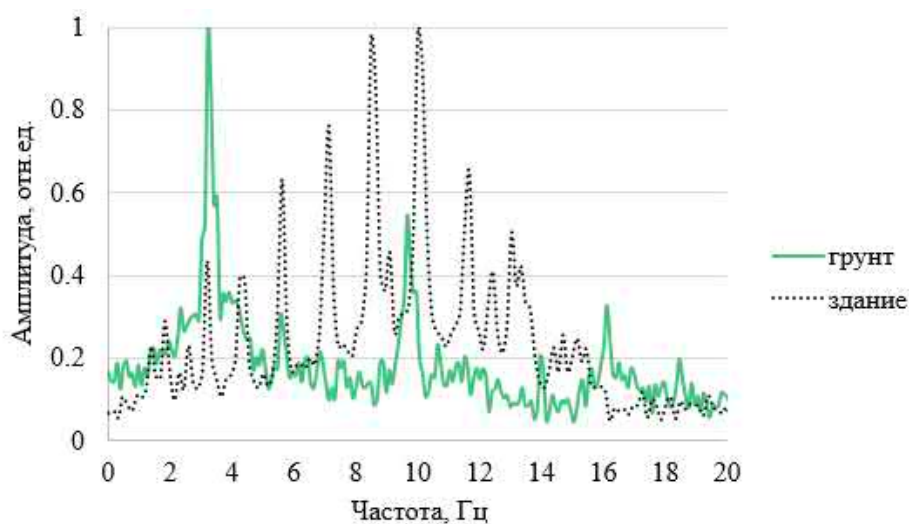


Рис. 4. Нормированный обобщённый амплитудный спектр шумовых записей, зарегистрированных в грунте и в здании зимой в 2020 году

Частота грунта меняется в течении года, т.к. зависит от климатических условий, и в какой-то период часть мод будут воздействовать гораздо сильнее на здание, т.к. частоты дома будут совпадать с грунтовыми характеристиками.

В зависимости от типа инженерных сооружений бывают разные формы колебаний. По строительным нормам и правилам [14] рекомендуется обращать внимание на низшие моды собственных колебаний (предпочтительно на горизонтальный тип колебаний).

В зимний период частота (3,22 Гц) одной из низших мод частотно-амплитудного спектра грунта практически совпадает с частотой четвертой моды здания, что приводит к усилению возможных резонансных воздействий на данной частоте. В случае землетрясения существует вероятность, что здание может войти в резонанс и в зависимости прочности материалов конструкции, возможно образование трещин в местах пучностей на частотно-амплитудном распределении вдоль несущей стены здания, что в свою очередь может привести к обрушению здания.

Результаты проведенных измерений наглядно показали, что частотно-амплитудный спектр собственных колебаний исследуемого здания не изменился с течением времени. При этом в зимний период частота одной из низших мод колебаний приповерхностных грунтов практически совпадает с собственной частотой здания. По сравнению с 2018 годом в 2020 году было замечено резкое увеличение амплитудного спектра с 5 по 7 этажи здания, что свидетельствует о снижении устойчивости данной области. Следовательно, накопление амплитудных спектров может наглядно демонстрировать определение ослабленных зон в конструкции инженерного сооружения.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что необходимо при проектировании различных сооружений учитывать влияние колебаний приповерхностных грунтов и постоянное внешнее воздействие, особенно в районах с ярко выраженной сезонностью и в сейсмоопасных регионах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Есенина Н.А., Ларионов В.И., Нигметов Г.М., Ситников И.В., Сотин В.Н., Суцев С.П., Шахрамьян М.А. Способ динамических испытаний зданий и сооружений и устройство для его осуществления // Патент на изобретение RU 2141635 C1, 20.11.1999. Заявка № 99105726/28 от 30.03.1999.
2. Румянцев А.А., Сергеевцев Е.Ю. Вибрационные испытания 16-этажного жилого дома объемно-блочной конструкции // Вестник МГСУ. – 2012. – № 5. – С. 98—102.
3. Шеметова Е.О., Ваганова-Вилькинс Е.А., Филипова Е.О. Оценка уровня сейсмического воздействия промышленных взрывов на окружающую застройку // Вологодские чтения. – № 5. – 2008. – С. 83-86.
4. Pioldi F., Ferrari R., Rizzi E. Seismic FDD modal identification and monitoring of building properties from real strong-motion structural response signals // Structural Control & Health Monitoring. – 2017. – V.24. – I.11. – № e1982.
5. Brunelli A., de Silva F., Piro A. et al. Numerical simulation of the seismic response and soil-structure interaction for a monitored masonry school building damaged by the 2016 Central Italy earthquake // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2021. – V19. – I2. – PP.1181-1211.

6. Clemente P., Bongiovanni G., Buffarini G. et al. Monitored Seismic Behavior of Base Isolated Buildings in Italy // *Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications*. – 2019. – PP. 115-137.
7. Fujino Yozo, Siringoringo Dionysius M., Kikuchi Masaru et al. Seismic Monitoring of Seismically Isolated Bridges and Buildings in Japan-Case Studies and Lessons Learned // *Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications*. – 2019. – PP.407-447.
8. Колесников Ю.И., Федин К.В., Нгомайезве Л. О влиянии сезонных изменений резонансных свойств приповерхностных грунтов на сейсмобезопасность сооружений // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. – 2019. – № 3. – С. 57-64.
9. Carden E.P., Fanning P. Vibration based condition monitoring: a review // *Structural Health Monitoring*. – 2004. – Vol. 3, Iss. 4. – P. 355–377.
10. Clinton J.F., Bradford S.C., Heaton T.H., Favela J. The observed wander of the natural frequencies in a structure // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2006. – Vol. 96, No. 1, P. 237–257.
11. Марченков А.Ю., Капустян Н.К., Смирнов В.Б. Опыт регистрации сейсмического воздействия на высотное здание МГУ // *Геофизические исследования*. – 2015. – Т. 16, № 3. – С. 31–42.
12. Корепанов В.В., Цветков Р.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2014. – № 2. – С. 153–167.
13. ГОСТ Р ИСО 14837-1-2007. Вибрация. Шум и вибрация, создаваемые движением рельсового транспорта. Часть 1. Общее руководство. М.: Стандартинформ, 2008. – 39 с.
14. Ведяков И.И., Чернов Ю.Т., Арутюнян М.В., Крылова О.В., Арутюня А.М. СП 413.1325800.2018 Здания и сооружения, подверженные динамическим воздействиям. Правила проектирования // М.: Стандартинформ, 2019.

REFERENCES

1. Esenina N.A., Larionov V.I., Nigmatov G.M., Sitnikov I.V., Sotin V.N., Sushhev S.P., Shahrman'jan M.A. Sposob dinamicheskikh ispytaniy zdaniy i sooruzhenij i ustrojstvo dlja ego osushhestvleniya // *Patent na izobretenie RU 2141635 C1*, 20.11.1999. Zajavka № 99105726/28 ot 30.03.1999.
2. Rumyanцев А.А., Сергеевцев Е.Ю. Вибрационные испытания 16-этажного жилого дома об"емно-блочной конструкции // *Vestnik MGSU*. – 2012. – № 5. – С. 98—102.
3. SHemetova E.O., Vaganova-Vil'kins E.A., Filipova E.O. Ocenka urovnya sejsmicheskogo vozdejstviya promyshlennyh vzryvov na okruzhayushchuyu zastrojku // *Vologdinskie chteniya*. – № S. – 2008. – S. 83-86
4. Pioldi F., Ferrari R., Rizzi E. Seismic FDD modal identification and monitoring of building properties from real strong-motion structural response signals // *Structural Control & Health Monitoring*. – 2017. – V.24. – I.11. – № e1982
5. Brunelli A., de Silva F., Piro A. et al. Numerical simulation of the seismic response and soil-structure interaction for a monitored masonry school building damaged by the 2016 Central Italy earthquake // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2021. – V19. – I2. – PP.1181-1211
6. Clemente P., Bongiovanni G., Buffarini G. et al. Monitored Seismic Behavior of Base Isolated Buildings in Italy // *Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications*. – 2019. – PP. 115-137
7. Fujino Yozo, Siringoringo Dionysius M., Kikuchi Masaru et al. Seismic Monitoring of Seismically Isolated Bridges and Buildings in Japan-Case Studies and Lessons Learned // *Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications*. – 2019. – PP.407-447
8. Kolesnikov Ju.I., Fedin K.V., Ngomajezve L. O vlijanii sezonnyh izmenenij rezonansnyh svojstv pripoверхnostnyh gruntov na sejsmbezopasnost' sooruzhenij // *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. – 2019. – № 3. – С. 57-64

9. Carden E.P., Fanning P. Vibration based condition monitoring: a review // Structural Health Monitoring. – 2004. – Vol. 3, Iss. 4. – P. 355–377.
10. Clinton J.F., Bradford S.C., Heaton T.H., Favela J. The observed wander of the natural frequencies in a structure // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2006. – Vol. 96, No. 1, P. 237–257.
11. Marchenkov A.Yu., Kapustyan N.K., Smirnov V.B. Opyt registracii sejsmicheskogo vozdejstviya na vysotnoe zdanie MGU // Geofizicheskie issledovaniya. – 2015. – T. 16, № 3. – S. 31–42.
12. Korepanov V.V., Cvetkov R.V. Sezonnye izmeneniya sobstvennykh chastot kolebaniy zdaniya na svajnom fundamente // Vestnik PNIPU. Mehanika. – 2014. – № 2. – S. 153–167.
13. GOST R ISO 14837-1-2007. Vibracija. Shum i vibracija, sozdavaemye dvizheniem rel'sovogo transporta. Chast' 1. Obshhee rukovodstvo. M.: Standartinform, 2008. – 39 s.
14. Vedjakov I.I., Chernov Ju.T., Arutjunjan M.V., Krylova O.V., Arutjunja A.M. SP 413.1325800.2018 Zdaniya i sooruzheniya, podverzhennye dinamicheskim vozdejstvijam. Pravila proektirovaniya // M.: Standartinform, 2019

© К. В. Федин, Е. Э. Косякина, 2021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛОННЫ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ

Константин Владимирович Федин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга. 3, научный сотрудник, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, старший преподаватель каф. геофизики; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса 20, доцент каф. геофизики

Антон Александрович Гриценко

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант, каф. геофизики, e-mail: a.gritsenko3@g.nsu.ru

В статье представлены результаты исследований, показывающих возможность определения потери устойчивости обсадной колонной газовой скважины с помощью пассивного метода выделения стоячих волн из сейсмоакустических шумов. Показано, что зарегистрированные на колоннах газовых скважин амплитудные спектры собственных колебаний позволяют надежно диагностировать неустойчивость обсадной колонны.

Ключевые слова: стоячие волны, газовые скважины, устойчивость обсадной колонны

DETERMINATION OF THE STABILITY LOSING OF A GAS WELL CASING BY ACOUSTIC NOISE

Konstantin V. Fedin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., PhD, Researcher, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Senior Lecturer of the geophysical department; Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue Novosibirsk 630073, Russia, Associate professor of the geophysical department

Anton A. Gritsenko

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Student. e-mail: a.gritsenko3@g.nsu.ru

The article presents the results of research, showing the possibility of determining the stability losing of gas well casing using the passive method of standing waves determination from seismo-acoustic noise. It is shown that the amplitude spectrum of natural vibrations recorded on the gas well casing make it possible to reliably diagnose the instability of the casing.

Keywords: standing waves, gas wells, casing stability

На северных газовых месторождениях, где верхняя часть геологического разреза, сложена многолетнемерзлыми породами давно существует проблема оттаивания пород в которых находятся газодобывающие скважины из-за температурного воздействия скважин при добыче газа, температура которого может достигать 80 градусов Цельсия, сезонных изменений, вибрационных воздействий и

прочих, как естественных, так и техногенных факторах. Оттаивание многолетне-мерзлых пород неизбежно ведет к ослаблению закрепления верхней части колонны газовой скважины, что ведет к её разбалтыванию и увеличению нагрузки на обсадные трубы и их резьбовые соединения.

Так, на сегодняшний день мониторинг потери устойчивости колонн газовых скважин ведется опосредованно, через контроль состояния и определение величины просадок грунтов с помощью методов геодезии, электрометрии (электротомография [1,2,3] и индукционные методы [4,5,6]) и георадиолокации [7,8,9,10].

В настоящей работе используется пассивный сейсмический метод, разработанный коллективом авторов ИНГГ СО РАН, позволяющий выделять стоячие волны из шумового поля и решать различные инженерные задачи [11,12,13,14].

Разработанная методика выделения стоячих волн из микросейсм состоит в следующем:

1. Регистрация когерентных паразитных шумов, для последующего учета при обработке полученных данных.
2. Регистрация шумовых записей на исследуемом объекте для выделения в них стоячих волн с использованием двух датчиков – статично зафиксированного в одной точке и перемещаемого.
3. Нормировка уровня шумов перемещаемого датчика на уровень опорного для каждого измерения.
4. Разбиение шумовых записей на блоки по 8192 отчета.
5. Преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудных спектров путем их суммирования.
6. Построение карт амплитудно-частотного распределения на исследуемой площади или профиле.

Важно отметить, что отсутствие источника, возбуждающего колебания в исследуемой среде и использование метода накопления в дальнейшей обработке накладывает ограничения на использование регистрирующей аппаратуры. Так, важно чтобы используемая аппаратура отличалась отсутствием собственных шумов, которые будут накапливаться в процессе регистрации что напрямую повлияет на качество данных. Подбор такой аппаратуры следует проводить экспериментально с помощью измерения собственных шумов регистратора [15]. Так для проведения эксперимента на колоннах газовых скважин был выбран комплекс из цифрового регистратора Texan (RefTek-125A) и геофонов GS-20DX (рис. 1).



Рис. 1 Вертикальные и горизонтальные геофоны GS-20DX и одноканальные автономные цифровые регистраторы Texan (RefTek-125A) на кусте колонны газовой скважины.

В результате накопления большого количества амплитудных спектров, построенных для шумовых записей, получается выделить регулярные пики, являющиеся когерентными при суммировании, соответствующие стоячим волнам. Для упругих стоячих волн в геометрически ограниченных телах характерна связь между собственными частотами и расстоянием от местоположения регистратора до границы тела, от которой происходит отражение волны и описываемая следующим соотношением:

$$f_n = \frac{nV}{2l},$$

где n – номер моды стоячей волны, V – скорость распространения упругих волн, l – расстояние между от регистратора до отражающей границы.

В случае колонны газовой скважины такой отражающей границей будут являться как нижняя граница обсадной колонны, так и какие-либо дефекты, будут характеризоваться появлением дополнительного семейства мод, частоты которых будут соответствовать расстоянию от регистратора на устье скважины до дефекта. Принимая во внимание геометрию расположения регистрирующих датчиков (рис.1). Моды стоячих волн, описываемые таким распределением, будут проявляться при обработке вертикальной компоненты шумовой записи.

На полученных в результате полевого эксперимента данных были выделены пики, соответствующие модам упругих стоячих волн. На (рис. 2) видно, что частоты мод для каждой из скважин идут с равным интервалом и, следовательно, соответствуют одному и тому же расстоянию от регистратора, до отражающей границы.

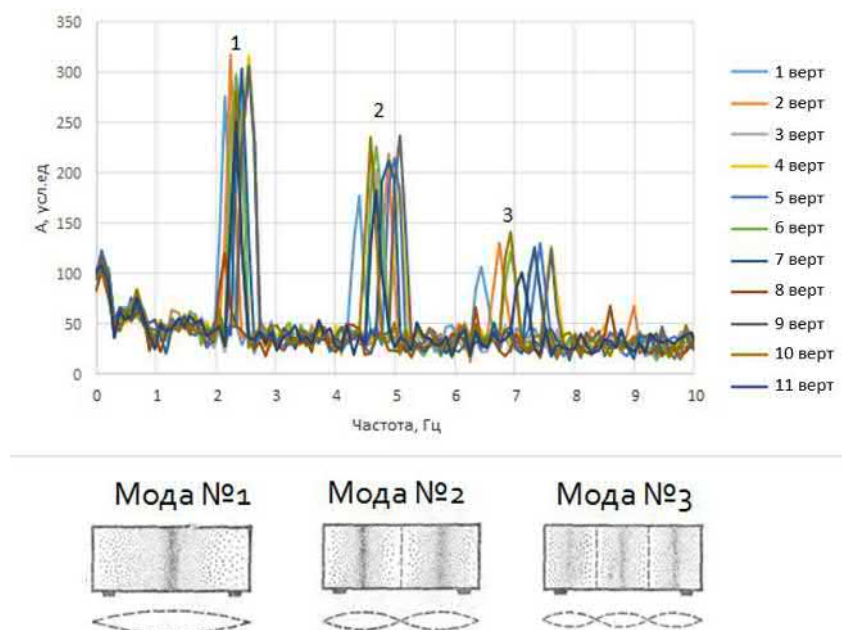


Рис. 2. Амплитудный спектр стоячих волн в обсадных колоннах ГС.
Цифрами обозначены номера мод.

Например, для скважины 2 частоты с первой по третью моду соответствуют 2.246, 4.491 и 6.738 Гц соответственно. Если предположить, что скорость продольных волн в КГС равна примерно 5000 м/с, а длина 1200 м, то согласно формуле (1) эти моды соответствуют всей длине колонны ($2.24 \text{ Гц} = 1 \times 5000 \text{ (м/с)} / (2 \times 1200) \text{ (м)}$).

Появление же на амплитудном спектре семейства дополнительных мод будет свидетельствовать о наличии дефекта на определенной глубине.

Так, на (рис.3) демонстрируется пример накопленного амплитудно-частотного спектра, где цифрами 1,2,3 (значения частот 2.539, 5.078, 7.61 Гц) обозначены моды стоячих волн, соответствующие проектной длине скважины в 1200 м, а моды I, II, III (значения частот 3.125, 6.25, 9.375 Гц) соответствуют длине скважины в 800 метров (см. формулу 1), что означает нарушение на этой глубине.

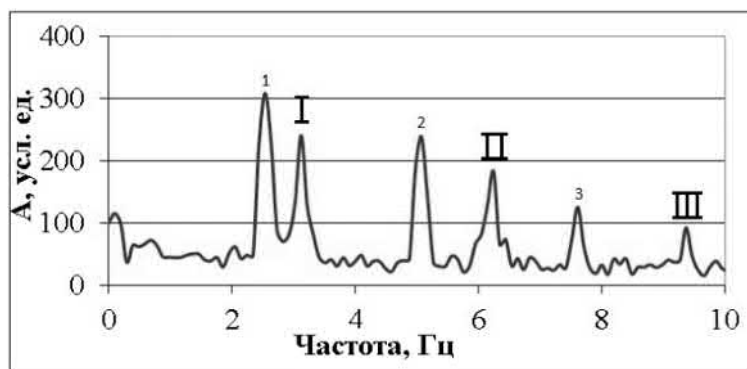


Рис. 3. Выделение нарушенного участка КГС дополнительными модами упругих стоячих волн

При рассмотрении горизонтальной компоненты зарегистрированных шумов на их амплитудном спектре можно видеть, что на газовых скважинах 6, 7 и 8, в отличие от остальных наблюдаются семейства квазирегулярных пиков, которые, как было установлено в следствии математического моделирования, относятся к изгибному типу колебаний (рис. 4).

По результатам физического моделирования, путем эксперимента на макете обсадной колонны газовой скважины установлено, что такое распределение квазирегулярных пиков свидетельствует об отсутствии закрепления в верхней её части. На (рис.5) видно, что при отсутствии закрепления на модели КГС на полученном амплитудном спектре выделяется группа квазирегулярных пиков, аналогичная тем, что были зарегистрированы на ГС 6, 7, 8.

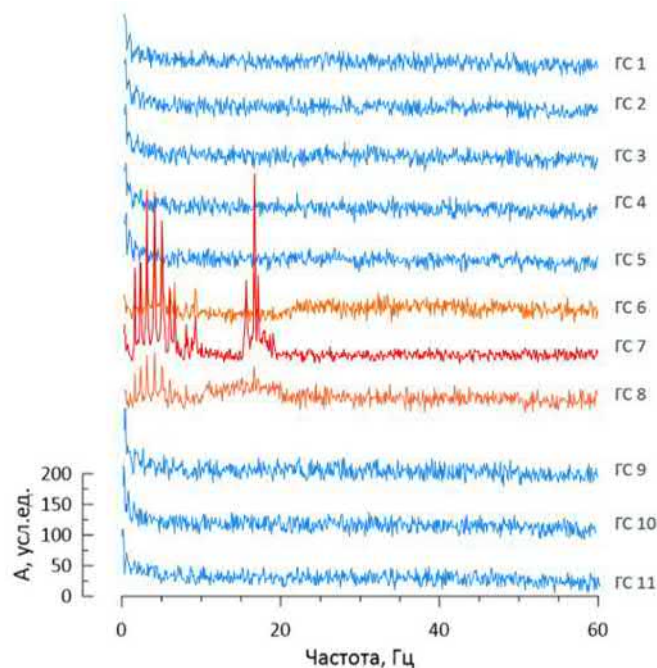


Рис.4 Амплитудные спектры стоячих волн в обсадных колоннах ГС.
Горизонтальная составляющая



Рис. 5 Наличие или отсутствие квазирегулярных пиков изгибных мод, свидетельствующее о качестве закрепления макета КГС

В свою очередь наличие или отсутствие таких пиков, получаемых при регистрации шумовых данных на кусте газовой скважины может являться надежным диагностическим критерием потери устойчивости обсадной колонной, по причине ухудшения качества закрепления в верхней её части.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобачев А. А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – Т. 2. – С. 14–17.
2. Beck M.S., Williams R.A. Process tomography: principles, techniques and applications. – Butterworth-Heinemann, 2012. – 384 p.
3. Gunn D. A., Chambers J.E., Uhlemann S., Wilkinson P.B., Meldrum P.I., Dijkstra T.A., Haslam E., Kirkham M., Wragg J., Holyoake S., Hughes P.N., Hen-Jones R., Glendinning S. Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography // Construction and Building Materials. – 2015. – Т.92. – С. 82-94
4. Тригубович Г. М., Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г. 3D-электроразведка становлением поля. – 2009
5. Тригубович Г.М. и др. Применение площадных технологий и трехмерной интерпретации данных зондирования становлением поля при построении объемных геоэлектрических моделей сложнопостроенных сред // Записки горного института. – 2009. – Т. 183.
6. Семинский И.К., Буддо И.В., Суров Л.В., Агафонов Ю.А. Опыт 3D-моделирования сигналов становления электромагнитного поля в условиях осадочного чехла юга Сибирской платформы // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – №.6. (65).
7. Ermakov A.P., Starovoitov A. V. The use of the Ground Penetration Radar (GPR) method in engineering-geological studies for the assessment of geological-cryological conditions // Moscow University Geology Bulletin. – 2010. – Т. 65. – №.6. – С. 422–427.
8. Campbell S., Afflec R.T., Sinclair S. Ground-penetration radar studies of permafrost, periglacial and near-surface geology at McMurdo Station, Antarctica // Cold Regions Science and Technology. – 2017.
9. Scott W. J., Sellmann P., Hunter J. A. Geophysics in the study of permafrost // Geotechnical and environmental geophysics. – 1990. – Т. 1. – С. 355–384.
10. Munroe J.S., Doolittle J.A., Kanevskiy M., Hinkel K.M., Nelson F.E., Jones B.M., Shur Y., Kimble J.M. Application of ground-penetrating radar imagery for three-dimensional visualization of near-surface structures in ice-rich permafrost, Barrow, Alaska // Permafrost and Periglacial Processes. – 2007. – Т. 18. – №.4. – С. 309–321
11. Колесников Ю.И., Федин К.В., Нгомайезве Л. О влиянии сезонных изменений резонансных свойств приповерхностных грунтов на сейсмобезопасность сооружений. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2019. – №.3. – С. 56–64.
12. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment. // Geophys Prospect. – 2018. – 66:342-53
13. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomayezwe L. Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 125. – 2019. – 105739
14. Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л. Определение пустот под бетонными плитами крепления верховых откосов плотины Новосибирской ГЭС по акустическим шумам // Процессы в геосредах. – 2020. – № 4 (26). – С. 970-975
15. Eponechnikova L., Dergach P., Duchkov A. Reducing the Cost of Microseismic Monitoring for Ensuring Safety in Mining // 82nd EAGE Annual Conference and Exhibition Workshop Programme (Amsterdam, The Netherlands, December 8-11, 2020): Abstracts. – Amsterdam, 2020. – 2020. – P. 1-5.

REFERENCES

1. Bobachev A.A., Gorbunov A.A., Modin I.N., Shevnin V.A. Jeletrotomografija metodom soprotivlenij i vyzvannoj poljarizacii // *Pribory i sistemy razvedochnoj geofiziki*. – 2006. – T. 2. – S. 14–17.
2. Beck M.S., Williams R.A. *Process tomography: principles, techniques and applications*. – Butterworth-Heinemann, 2012. – 384 p.
3. Gunn D. A., Chambers J.E., Uhlemann S., Wilkinson P.B., Meldrum P.I., Dijkstra T.A., Haslam E., Kirkham M., Wragg J., Holyoake S., Hughes P.N., Hen-Jones R., Glendinning S. Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography // *Construction and Building Materials*. – 2015. – T.92. – C. 82-94
4. Trigubovich G.M., Persova M.G., Solovejchik Ju.G. 3D-jelektrozvedka stanovleniem polja. – 2009.
5. Trigubovich G.M. i dr. *Primenenie ploshhadnyh tehnologij i trehmernoj interpretacii dannyh zondirovanija stanovleniem polja pri postroenii obemnyh geojelektricheskikh modelej slozhnopostroyennyh sred* // *Zapiski gornogo instituta*. – 2009. – T. 183.
6. Seminckij I.K., Buddo I.V., Surov L.V., Agafonov YU.A. Opyt 3D-modelirovanija signalov stanovlenija jeletromagnitnogo polja v usloviyah osadochnogo chehla juga Sibirkoy platformy // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. – 2012. – №.6. (65).
7. Ermakov A.P., Starovoitov A. V. The use of the Ground Penetration Radar (GPR) method in engineering-geological studies for the assessment of geological-cryological conditions // *Moscow University Geology Bulletin*. – 2010. – T. 65. – №.6. – C. 422–427.
8. Campbell S., Afflec R.T., Sinclair S. Ground-penetration radar studies of permafrost, periglacial and near-surface geology at McMurdo Station, Antarctica // *Cold Regions Science and Technology*. – 2017.
9. Scott W. J., Sellmann P., Hunter J. A. Geophysics in the study of permafrost // *Geotechnical and environmental geophysics*. – 1990. – T. 1. – C. 355–384.
10. Munroe J.S., Doolittle J.A., Kanevskiy M., Hinkel K.M., Nelson F.E., Jones B.M., Shur Y., Kimble J.M. Application of ground-penetrating radar imagery for three-dimensional visualization of near-surface structures in ice-rich permafrost, Barrow, Alaska // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2007. – T. 18. – №.4. – C. 309–321.
11. Kolesnikov Ju.I., Fedin K.V., Ngomajezve L. O vlijanii sezonnyh izmenenij rezonansnyh svoystv pri poverhnostnyh gruntov na seismobezopasnost' ooruuzhenij. // *Sejmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. – 2019. – №.3. – S. 56–64.
12. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment. // *Geophys Prospect*. – 2018. – 66:342-53
13. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomajezve L. Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume* 125. – 2019. – 105739
14. Fedin K.V., Kolesnikov Y.I., Ngomajezve L. Opređenje pustot pod betonnymi plitami krepjenja verhovyh otkosov plotiny Novosibirskoj GJeS po akusticheskim shumam // *processes in geomedica*. – 2020. – № 4 (26). – S. 970-975.
15. Eponeshnikova L., Dergach P., Duchkov A. Reducing the Cost of Microseismic Monitoring for Ensuring Safety in Mining // *82nd EAGE Annual Conference and Exhibition Workshop Programme (Amsterdam, The Netherlands, December 8-11, 2020): Abstracts*. – Amsterdam, 2020. – 2020. – P. 1-5.

© К. В. Федин, А. А. Гриценко, 2021

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ БУГРИНСКОГО МОСТА МЕТОДОМ ВЫДЕЛЕНИЯ СТОЯЧИХ ВОЛН ИЗ МИКРОСЕЙСМ

Константин Владимирович Федин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, старший преподаватель каф. геофизики; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла маркса 20, доцент каф. геофизики

Антон Александрович Гриценко

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант, каф. геофизики e-mail: a.gritsenko3@g.nsu.ru

Елизавета Эдуардовна Косякина

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса 20, студент Физико-технического факультета, кафедры геофизических систем, e-mail: lilavati21@mail.ru

В статье показано применение технологии инженерно-сейсмологического обследования конструктивного состояния инженерных сооружений с целью обнаружения в них аномальных зон на примере обследования Бугринского моста г. Новосибирска.

Ключевые слова: сейсмостойкость мостов, стоячие волны, неразрушающий контроль (NDT)

STABILITY DIAGNOSTICS OF THE BUGRINSKY BRIDGE BY THE METHOD OF STANDING WAVES DETERMINATION FROM MICROSEISM

Konstantin V. Fedin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptiuga Ave., PhD, Researcher, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Senior Lecturer of the geophysical department; Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue Novosibirsk 630073, Russia, Associate professor of the geophysical department

Anton A. Gritsenko

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, MD Student. e-mail: a.gritsenko3@g.nsu.ru

Elizaveta E. Kosyakina

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Avenue 20, Student of the Faculty of Physics and Technology, Department of Geophysical Systems, e-mail: lilavati21@mail.ru

The article shows the use of a low-cost technology of engineering and seismological examination of the structural state of engineering structures in order to detect anomalous zones in them by the example of the survey of the Bugrinsky bridge in Novosibirsk.

Keywords: seismic resistance of bridges, standing waves, nondestructive testing (NDT)

Огромное количество важных инженерных сооружений за долгий период эксплуатации, рано или поздно будут скрывать в себе опасные дефекты. В свою очередь, большинство мостов было спроектировано и построено 30 лет назад. Тогда, используемая при проектировании сооружения, плотность транспортного потока была значительно ниже современной, что неизбежно ведет к повышенной скорости износа конструкций мостов. В свою очередь поддержание исправного технического состояния мостов важно, как для нормального функционирования транспортной сети государства, так и для безопасности людей, использующих транспортную инфраструктуру.

Так, следует проводить периодический осмотр состояния конструкции мостов на предмет выявления дефектов, однако важным ограничением, помимо требований к высокой точности метода диагностики, является то, что работы по обследованию сооружения необходимо проводить непосредственно во время эксплуатации объекта.

На сегодняшний день для оценки и мониторинга состояния мостов используются различные методы, позволяющие проводить периодическое их обследование. Однако большинство из используемых методов являются дорогостоящими, предусматривают стационарное размещение аппаратуры на мосте или имеют ряд технических ограничений, связанных с воздействием внешней среды, таким как постоянная вибрация от транспорта, изменение освещения, температуры и прочих факторов. Так, одними из новейших методов, применяемых для мониторинга состояния мостов являются оптические методы, основанные на системах распознавания образов для расчета смещений и деформаций конструкции [1,2,3], различного масштаба радиолокационные методы (георадарная и интерферометрическая радарная съемка) [4,5], методы, основанные на регистрации смещений и деформаций конструкции [6,7].

В настоящей работе предлагается использование пассивного сейсмического метода, разработанного коллективом авторов ИНГГ СО РАН, позволяющего выделять стоячие волны из шумового поля и решать различные инженерные задачи [8,9,10,11].

Разработанная методика выделения стоячих волн из микросейсм состоит в следующем:

1. Регистрация когерентных паразитных шумов, для последующего учета при обработке полученных данных.
2. Регистрация шумовых записей на исследуемом объекте для выделения в них стоячих волн с использованием двух датчиков – статично зафиксированного в одной точке и перемещаемого.

3. Нормировка уровня шумов перемещаемого датчика на уровень опорного для каждого измерения.

4. Разбиение шумовых записей на блоки по 8192 отчета.

5. Преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудных спектров путем их суммирования.

6. Построение карт амплитудно-частотного распределения на исследуемой площади или профиле.

Важно отметить, что отсутствие источника, возбуждающего колебания в исследуемой среде и использование метода накопления в дальнейшей обработке накладывает ограничения на использование регистрирующей аппаратуры. Так, важно чтобы используемая аппаратура отличалась отсутствием собственных шумов, которые будут накапливаться в процессе регистрации, что напрямую повлияет на качество данных. Подбор такой аппаратуры следует проводить экспериментально с помощью измерения собственных шумов регистратора [12]. Так для проведения эксперимента на Бугринском мосте был выбран комплекс из цифрового регистратора Texan (RefTek-125A) и геофонов GS-20DX (рис. 1).



Рис. 1 Вертикальные и горизонтальные геофоны GS-20DX и одноканальные автономные цифровых регистраторов Texan (RefTek-125A)

В результате накопления большого количества амплитудных спектров, построенных для шумовых записей, получается выделить регулярные пики, являющиеся когерентными при суммировании, соответствующие стоячим волнам. Для стоячих волн сжатия-расширения в геометрически ограниченных телах характерна связь между собственными частотами и расстоянием от местоположения регистратора до границы тела, от которой происходит отражение волны и описываемая следующим соотношением:

$$f_n = \frac{nV}{2l},$$

где n – номер моды стоячей волны, V – скорость распространения упругих волн, l – расстояние между от регистратора до отражающей границы.

Непосредственно во время исследования объекта регистрация шумовых данных происходит с помощью использования пары датчиков, один из которых располагается статично на объекте, далее будем называть его опорным, а второй перемещается, покрывая всю исследуемую площадь. Опорный датчик применяется нормировки уровня шумовой записи переносного датчика, убирая различия в шумовых трассах, вызванные уровнем внешних шумов. Вместо этого можно использовать единовременную регистрацией данных с использованием большого количества регистраторов, однако такой подход в ряде случаев может оказаться более затратным и трудоемким, нежели использование всего двух сейсμο-приемников.

Так с использованием этой технологии были выделены изгибные моды колебаний Бугринского моста и построено их амплитудно-частотное распределение (рис. 2).

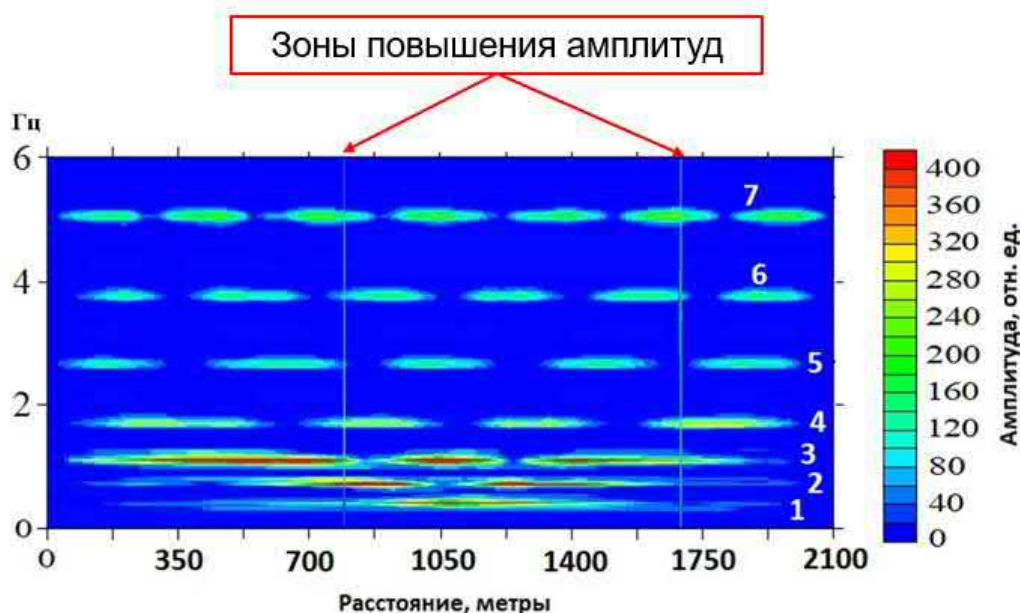


Рис. 2 Распределение амплитудных спектров шумовых записей вдоль Бугринского моста (по ширине), цифрами обозначены номера мод изгибных колебаний

На рисунке отчетливо выделяются две области повышенных амплитуд колебаний, наблюдаемые на всех частотах. При сравнении с результатами компьютерного моделирования (рис. 3), установлено, что данные зоны повышения амплитуд являются аномальными и, вероятно, связаны с наличием дефектов в конструкции.

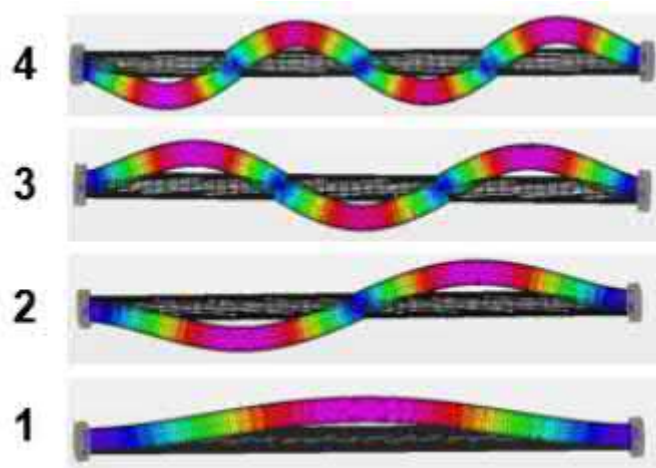


Рис.3 Изгибные моды собственных колебаний Бугринского моста, полученные в результате компьютерного моделирования

Немаловажным является тот факт, что пространственное местоположение левой зоны повышенных амплитуд (рис.2), соответствует зоне падения детали моста на автомобиль в 2017 г (рис.4), что также позволяет верифицировать возможность применения используемой методики выделения стоячих волн из сейсмоакустических шумов к обследованию мостов.



Рис. 4. Место отлома и упавшая деталь конструкции моста (2017 г)

Работа выполнена в рамках гранта, по итогам конкурса мэрии города Новосибирска на предоставление грантов в форме субсидий в сфере научной и инновационной деятельности

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ngeljaratan L., Moustafa M.A. Structural health monitoring and seismic response assessment of bridge structures using target-tracking digital image correlation // Engineering Structures. – 2020. – Vol. 213. – ISSN 0141-0296.

2. Wang Y., Tumbeva M.D., Thrall A.P., Zoli T.P. Pressure-activated adhesive tape pattern for monitoring the structural condition of steel bridges via digital image correlation // *Struct Control Health Monit.* – 2019. – Vol. 26 – Is. 8. – e2382.
3. Xiao P., Wu Z.Y., Christenson R, Lobo-Aguilar S. Development of video analytics with template matching methods for using camera as sensor and application to highway bridge structural health monitoring // *Civil Struct Health Monit.* – 2020. – 10. – P.405–424.
4. Alani A.M., Tosti F., Ciampoli L.B., Gagliardi V., Benedetto A. An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies // *NDT & E International.* – 2020. – Vol. 115. – ISSN 0963-8695.
5. Selvakumaran S., Rossi C., Marinoni A., Webb G., Bennetts J., Barton E., Plank S., Middleton C. Combined InSAR and Terrestrial Structural Monitoring of Bridges // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2020. – Vol. 58. – Is. 10. – P. 7141-7153.
6. Kaloop M. R., Hwang W.S., Elbeltagi E., Beshr A., Hu J.W. Evaluation of Dorim-Goh bridge using ambient trucks through short-period structural health monitoring system. // *Structural Engineering and Mechanics.* – 2019. – 69(3). – P.347–359.
7. Kaloop M.R., Kim K.H., Elbeltagi E., Jin X., Hu J.W. Service-Life Evaluation of Existing Bridges Subjected to Static and Moving Trucks Using Structural Health Monitoring System: Case Study. // *KSCE Civ Eng.* – 2020. – 24. – P.1593–1606.
8. Колесников Ю.И., Федин К.В., Нгомайезве Л. О влиянии сезонных изменений резонансных свойств приповерхностных грунтов на сейсмобезопасность сооружений. // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений.* – 2019. – №.3. – С. 56–64.
9. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment. // *Geophys Prospect.* – 2018. – 66:342-53.
10. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomayezwec L. Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 125.* – 2019. – 105739.
11. Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л. Определение пустот под бетонными плитами крепления верховых откосов плотины Новосибирской ГЭС по акустическим шумам // *Процессы в геосредах.* – 2020. – № 4 (26). – С. 970-975.
12. Eponeshnikova L., Dergach P., Duchkov A. Reducing the Cost of Microseismic Monitoring for Ensuring Safety in Mining // 82nd EAGE Annual Conference and Exhibition Workshop Programme (Amsterdam, The Netherlands, December 8-11, 2020): Abstracts. – Amsterdam, 2020. – 2020. – P. 1-5.

REFERENCES

1. Ngeljaratan L., Moustafa M.A. Structural health monitoring and seismic response assessment of bridge structures using target-tracking digital image correlation // *Engineering Structures.* – 2020. – Vol. 213. – ISSN 0141-0296.
2. Wang Y., Tumbeva M.D., Thrall A.P., Zoli T.P. Pressure-activated adhesive tape pattern for monitoring the structural condition of steel bridges via digital image correlation // *Struct Control Health Monit.* – 2019. – Vol. 26 – Is. 8. – e2382.
3. Xiao P., Wu Z.Y., Christenson R, Lobo-Aguilar S. Development of video analytics with template matching methods for using camera as sensor and application to highway bridge structural health monitoring // *Civil Struct Health Monit.* – 2020. – 10. – P.405–424.
4. Alani A.M., Tosti F., Ciampoli L.B., Gagliardi V., Benedetto A. An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies // *NDT & E International.* – 2020. – Vol. 115. – ISSN 0963-8695.
5. Selvakumaran S., Rossi C., Marinoni A., Webb G., Bennetts J., Barton E., Plank S., Middleton C. Combined InSAR and Terrestrial Structural Monitoring of Bridges // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2020. – Vol. 58. – Is. 10. – P. 7141-7153.

6. Kaloop M. R., Hwang W.S., Elbeltagi E., Beshr A., Hu J.W. Evaluation of Dorim-Goh bridge using ambient trucks through short-period structural health monitoring system. // *Structural Engineering and Mechanics*. – 2019. – 69(3). – P.347–359.
7. Kaloop M.R., Kim K.H., Elbeltagi E., Jin X., Hu J.W. Service-Life Evaluation of Existing Bridges Subjected to Static and Moving Trucks Using Structural Health Monitoring System: Case Study. // *KSCE Civ Eng*. – 2020. – 24. – P.1593–1606.
8. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomajezve L. O vlijanii sezonnyh izmenenij rezonansnyh svojstv pripoverhnostnyh gruntov na sejsmobeзопасnost' oорuzhenij. // *Sejsmostojkoe stroitl'stvo. Bezopанost' sooruzhenij*. – 2019. – №.3. – S. 56–64.
9. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment. // *Geophys Prospect*. – 2018. – 66:342-53.
10. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Nogomayezwec L. Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 125*. – 2019. – 105739.
11. Fedin K.V., Kolesnikov Ju.I., Ngomajezve L. Opredelenie pustot pod betonnymi plitami kreplenija verhovyh otkosov plotiny Novosibirskoj GJeS po akusticheskim shumam // *processes in geomedia*. – 2020. – № 4 (26). – S. 970-975 (In Russian).
12. Eponeshnikova L., Dergach P., Duchkov A. Reducing the Cost of Microseismic Monitoring for Ensuring Safety in Mining // 82nd EAGE Annual Conference and Exhibition Workshop Programme (Amsterdam, The Netherlands, December 8-11, 2020): Abstracts. – Amsterdam, 2020. – 2020. – P. 1-5.

© К. В. Федин, А. А. Гриценко, Е. Э. Косякина, 2021

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФЛЮИДА С ПОРОДОЙ НА МАСШТАБЕ ПОР

Татьяна Станиславовна Хачкова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Коптюга, 3, научный сотрудник, e-mail: KhachkovaTS@ipgg.sbras.ru

Вадим Викторович Лисица

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Коптюга, 3, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией, e-mail: lisitsavv@ipgg.sbras.ru

В статье представлен численный алгоритм моделирования потока химически активного вещества в пористой среде на масштабе пор. Целью исследования является изучение изменения геометрии порового пространства при химическом взаимодействии флюида с породой. Сначала в поровом пространстве моделируется течение жидкости и распространение химически активных компонентов. Затем для расчета их взаимодействия с породой используются гетерогенные реакции. После чего определяется изменение интерфейса между жидкостью и твердым телом с помощью метода установки уровня (level-set method в англ. литературе), позволяющего обрабатывать изменения топологии порового пространства. Алгоритм основан на методе конечных разностей и реализован на GP-GPU.

Ключевые слова: цифровая физика горных пород, химическое взаимодействие флюида с породой, пористые материалы, топология порового пространства

NUMERICAL SIMULATING THE CHEMICAL INTERACTION OF FLUID WITH ROCK AT THE PORE SCALE

Tatyana S. Khachkova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, e-mail: KhachkovaTS@ipgg.sbras.ru

Vadim V. Lisitsa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, DSc, Head of Laboratory, e-mail: lisitsavv@ipgg.sbras.ru

The article presents a numerical algorithm for modeling the chemically reactive transport in a porous medium at a pore scale. The aim of the study is to research the change in the geometry of the pore space during the chemical interaction of the fluid with the rock. First, fluid flow and transport of chemically active components are simulated in the pore space. Heterogeneous reactions are then used to calculate their interactions with the rock. After that, the change in the interface between the liquid and the solid is determined using the level-set method, which allows to handle changes in the topology of the pore space. The algorithm is based on the finite-difference method and is implemented on the GP-GPU.

Keywords: digital rock physics, chemical interaction of the fluid with rock, porous materials, topology of the pore space

Моделирование течения химически активного флюида в пористой среде и его химического взаимодействия с породой является эффективным средством для исследования самых разных процессов, происходящих в подземных толщах: секвестрации (геологического захоронения) углекислого газа в карбонатных коллекторах [1], биоцементации [2], осаждения солей [3], закачки неконденсируемых газов в геотермальные поля [4] и т. д. Основным механизмом, вызывающим изменения геометрии и морфологии порового пространства, являются гетерогенные реакции, происходящие на поверхности раздела жидкости и твердого тела, которые могут привести либо к растворению матрицы, либо к осаждению минералов, то есть к изменению порового пространства и структуры породы в масштабе пор, что в конечном итоге влияет на макроскопические свойства горных пород, включая пористость, гидравлическую проницаемость [5], [6], упругие модули [7], удельное электрическое сопротивление [8] и т.д. Поскольку численное моделирование позволяет изменять входные параметры, такие как входное давление потока, скорость реакции и т.д., то можно оценить их влияние как на изменение геометрии и морфологии порового пространства, так и на макроскопические параметры горных пород в масштабе коллектора.

При моделировании химического взаимодействия мы предполагаем, что при небольших изменениях геометрии порового пространства поток жидкости мгновенно становится устойчивым. В таком случае целесообразно использовать разбиение численного алгоритма по физическим процессам. Сначала можно смоделировать течение жидкости в масштабе пор, для этого необходимо решить уравнения Стокса или Навье-Стокса. Затем решением уравнения конвекции-диффузии можно получить распределение активных компонентов. Последний и наиболее интересный этап – это моделирование перемещения поверхности раздела между жидкостью и твердым телом [9]. Причем для решения этой задачи есть несколько известных подходов.

В методах первого типа для аппроксимации всех уравнений используются правильные прямоугольные сетки. Относительная масса флюида вводится для «граничных» ячеек сетки и изменяется по дополнительному закону, который связан с истинной скоростью реакции [10], [11]. Эти методы легко реализовать, но закон, определяющий скорость относительного изменения массы, является эмпирическим.

Метод второго типа – фронтальной трассировки – основан на явном представлении интерфейса между флюидом и матрицей. Этот подход обычно сочетается с методом конечных объемов с усеченными ячейками [9]. Однако его довольно сложно реализовать, если топология и геометрия порового пространства сложны, как в случае реальных горных пород, и особенно, если топология области постоянно меняется.

Методы третьего типа основаны на неявном представлении поверхности раздела, на которой указаны точные граничные условия. К ним относятся методы установки уровня (level-set method) [12] и фазового поля (phase-field method) [13]. Эти методы, с одной стороны, позволяют использовать оригинальные отношения химической кинетики на масштабе пор, с другой стороны, их легко

реализовать даже в случае непрерывного изменения топологии порового пространства. Кроме того, в них используются регулярные прямоугольные сетки для аппроксимации уравнений в поровом пространстве, а граничные условия аппроксимируются с использованием метода погруженных границ [14], [15].

Постановка задачи

Чтобы смоделировать течение химически активного флюида в масштабе пор, мы предполагаем, что граница раздела движется с самой медленной скоростью, что обычно определяет временной масштаб задачи. Расход жидкости также невисок и мгновенно стабилизируется при небольшом изменении геометрии порового пространства. Таким образом, задача разделяется на три этапа: решение уравнения Стокса для определения потока в поровом пространстве, решение уравнения конвекции-диффузии для моделирования распространения химических веществ и корректировка геометрии порового пространства, изменившейся вследствие растворения.

Рассмотрим задачу, сформулированную в ограниченной области $D \subset \mathbb{R}^3$, которая представляет собой объединение двух непересекающихся, зависящих от времени подобластей $D_p(t)$ и $D_m(t)$, соответствующих поровому пространству и матрице, соответственно. Граница этой области – объединение граней: $\partial D = S_{outlet} \cup S_{inlet} \cup S_{nf}$ (Рисунок 1). Обозначим поверхность раздела между поровым пространством и матрицей как $\bar{D}_p(t) \cap \bar{D}_m(t) = S(t)$, которая представляет собой пересечение достаточно гладких поверхностей.

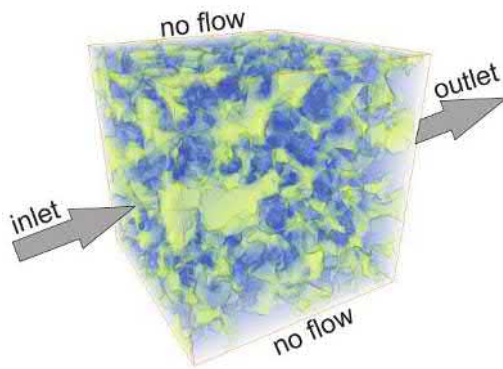


Рисунок 1. Пример модели с границей $\partial D = S_{outlet} \cup S_{inlet} \cup S_{nf}$.

Чтобы вычислить поток жидкости в поровом пространстве $D_p(t)$, решается стационарное уравнение Стокса:

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p &= 0, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in S(t) \cup S_{nf}, \quad (2)$$

$$p(\mathbf{x}) = p_{bc}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in S_{inlet} \cup S_{outlet},$$

где μ – динамическая вязкость, $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)^T \in R^3$ – вектор скорости, p – давление, $p_{bc}(\mathbf{x})$ – давление на входе и выходе, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$ – вектор пространственных координат.

Чтобы смоделировать распространение химических веществ в поровом пространстве $D_p(t)$, решается уравнение конвекции-диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}C - D\nabla C) = 0 \quad (3)$$

с граничными условиями:

$$D \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} = k_r(C - C_s), \quad \mathbf{x} \in S(t), \quad (4)$$

$$C = C_{in}, \quad \mathbf{x} \in S_{inlet},$$

$$\frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad \mathbf{x} \in S_{outlet} \cup S_{nf},$$

где C – концентрация реагента, D – коэффициент диффузии, $\mathbf{n}$ – внутренний нормальный вектор (по отношению к $D_p(t)$), k_r – коэффициент скорости реакции. Мы рассматриваем только реакции первого порядка, один активный реагент и никаких других источников реагента внутри расчетной области, поэтому правая часть в формуле (3) равна нулю.

Наконец, чтобы учесть перемещение поверхности раздела между флюидом и породой в результате химической реакции, необходимо удовлетворить уравнению:

$$v_n(\mathbf{x}, t) = \frac{K_c k}{\rho} (C - C_s), \quad \mathbf{x} \in S(t), \quad (5)$$

где v_n – нормальная составляющая скорости поверхности раздела, ρ – массовая плотность минерала, составляющего скелет породы, K_c – стехиометрический коэффициент и C_s – концентрация реагента в состоянии равновесия.

Метод установки уровня

Для решения уравнений (1) и (3) используется метод конечных разностей, при этом поверхность раздела $S(t)$ изменяется и в конкретный момент времени может не совпадать с линиями сетки. Чтобы справиться с такой нерегулярной

геометрией интерфейса, используется метод установки уровня, в котором интерфейс $S(t)$ неявно определяется как линия постоянного уровня функции $\varphi(\mathbf{x}, t)$:

$$S(t) = \{\mathbf{x} \mid \varphi(\mathbf{x}, t) = 0\}.$$

Тогда подобласти D_p и D_m определяются как

$$D_p(\mathbf{x}, t) = \{\mathbf{x} \mid \varphi(\mathbf{x}, t) > 0\}, \quad D_m(\mathbf{x}, t) = \{\mathbf{x} \mid \varphi(\mathbf{x}, t) < 0\}.$$

Кроме того, функция установки уровня $\varphi(\mathbf{x}, t)$ строится как расстояние со знаком до поверхности раздела, т.е. $\|\nabla_{\mathbf{x}}\varphi(\mathbf{x}, t)\| = 1$. Это приводит к естественному определению вектора нормали

$$\mathbf{n} = \nabla_{\mathbf{x}}\varphi(\mathbf{x}, t).$$

Используя функцию установки уровня, можно переписать уравнение для перемещения интерфейса следующим образом [12], [16]:

$$\frac{\partial \varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + v_n(\mathbf{x}, t) = 0, \quad (6)$$

$$\varphi(\mathbf{x}, 0) = \varphi_0,$$

где v_n – нормальная скорость интерфейса, определяемая уравнением (5).

Численные эксперименты

Применимость алгоритма к моделям реальных горных пород мы демонстрируем на примере данных компьютерной томографии образцов карбоната из Ближнего Востока, представленных в [5]. В данной работе четыре различных образца подвергнуты насыщению CO_2 , которое привело к растворению их карбонатной матрицы. Различия между образцами заключались в структуре исходного порового пространства и скорости насыщения. Во время этого процесса, чтобы проследить изменение порового пространства, для каждого образца получены по десять томографических изображений, которые предоставлены в базе данных [18]. В своей работе мы используем образец под названием АН из набора. Чтобы смоделировать химическое взаимодействие потока флюида с карбонатом, используется объем образца в 200^3 вокселей, физический размер которого при разрешении КТ-сканов в 5,2 мкм на воксель составляет около 1 мм³.

При моделировании используются параметры матрицы и жидкости, указанные в работе [5]. Так, основная матрица представляет собой кальцит с массовой плотностью $\rho = 2710$ кг/м³ и стехиометрическим коэффициентом реакции, равным единице, т.е. $K = 1$. Флюид представляет собой пластовую воду в предположении, что изменения концентрации реагента не влияют на физические свойства

флюида. Таким образом, динамическая вязкость фиксируется как $\mu = 0,00028$ Па·с, коэффициент диффузии равен $7,5 \cdot 10^{-9}$ м² / с, скорость реакции $k_r = 0,08$, а перепад давления 4 Па. Активным компонентом являются катионы H^+ с равновесной концентрацией $pH = 7$, а кислотность на входящей грани $pH = 3$ в соответствии с лабораторными экспериментами, представленными в работе [7].

На рис. 2 представлены линии тока в три разных момента времени. Видно, что в процессе растворения матрицы формируется основной путь потока, что приводит к образованию червоточины. Чтобы показать, как изменение порового пространства влияет на гидродинамические свойства породы, мы представляем графики пористости и проницаемости в зависимости от времени моделирования (Рисунок 3). И пористость, и проницаемость со временем увеличиваются, но относительно небольшое увеличение пористости приводит к значительному увеличению проницаемости из-за образования червоточин. При этом извилистость немного уменьшается, поскольку предпочтительный путь потока уже существовал в исходной модели. На графике проницаемости в зависимости от пористости (Рисунок 4) видно ее быстрое увеличение с увеличением пористости.

Численное моделирование химического взаимодействия потока флюида с карбонатом с использованием GeForce RTX 2080 Ti заняло 5,3 часа.

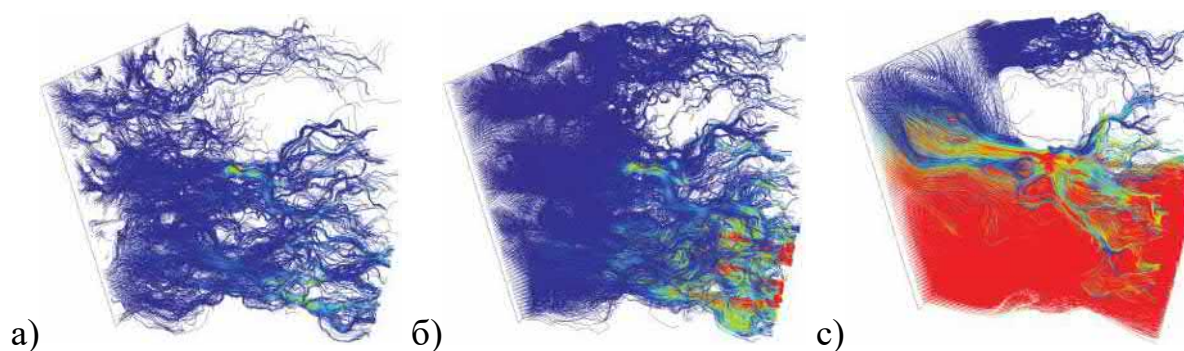


Рис. 2. Линии тока в цифровой модели породы в разные моменты времени при растворении карбонатной матрицы

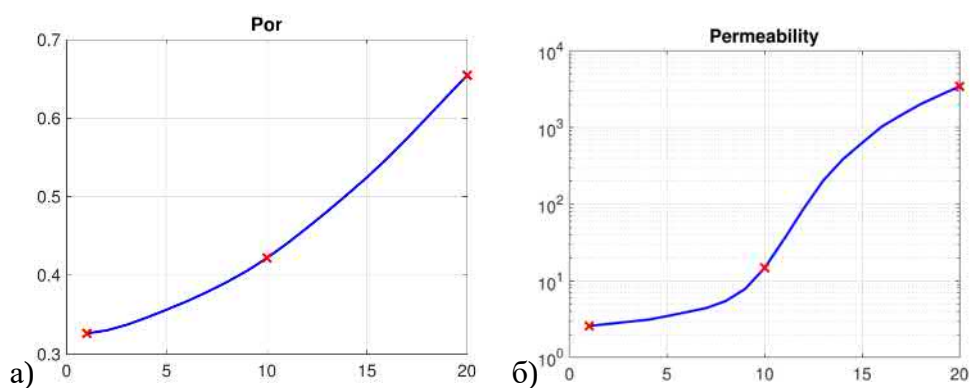


Рис. 3. Зависимость пористости (а) и проницаемости (б) от времени моделирования.

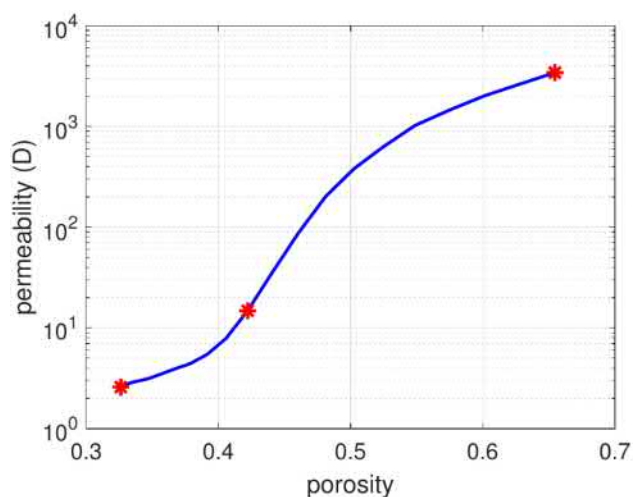


Рис. 4. Зависимость проницаемости от пористости при моделировании взаимодействия химически активного реагента с карбонатом.

Заключение

В работе представлен численный алгоритм для моделирования химического взаимодействия потока флюида с матрицей породы на масштабе пор в трехмерной постановке. Мы предполагаем, что при небольших изменениях геометрии порового пространства поток жидкости мгновенно становится устойчивым. В этом случае алгоритм можно реализовать с использованием разбиения по физическим процессам. Сначала, поскольку скорость потока флюида мала, он моделируется решением стационарного уравнения Стокса. Затем для моделирования распространения химических веществ с использованием граничных условий Робина решается уравнение конвекции-диффузии. Наконец, для определения поверхности раздела между поровым пространством и матрицей, используется неявный метод установки уровня, а для аппроксимации граничных условий используется метод погруженных границ. Применимость алгоритма к моделям реальных горных пород проиллюстрирована численным экспериментом с моделями карбонатов, построенными на основе данных компьютерной томографии образцов горных пород. Алгоритм основан на методе конечных разностей и реализован на GP-GPU.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 20-45-540004. Моделирование проводилось с использованием вычислительных ресурсов Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Miller K, Vanorio T., Keehm Y. Evolution of permeability and microstructure of tight carbonates due to numerical simulation of calcite dissolution // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2017. – V. 122. – № 6. – P. 4460-4474.

2. Dadda, A., Geindreau, C. et al. Characterization of microstructural and physical properties changes in biocemented sand using 3D X-ray microtomography // *Acta Geotechnica*. – 2017. – V. 12. – I. 5. – P. 955–970.
3. Alizadeh A. H. et al. Salt precipitation in ultratight porous media and its impact on pore connectivity and hydraulic conductivity // *Water Resources Research*. – 2018. – T. 54. – № 4. – P. 2768-2780.
4. Kaya E., Zarrouk S. J. Reinjection of greenhouse gases into geothermal reservoirs // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2017. – V. 67. – P. 111-129.
5. Al-Khulaifi Y. et al. Pore-scale dissolution by CO₂ saturated brine in a multimineral carbonate at reservoir conditions: Impact of physical and chemical heterogeneity // *Water Resources Research*. – 2019. – V. 55. – № 4. – P. 3171-3193.
6. Lisitsa V., Bazaikin Y., Khachkova T. Computational topology-based characterization of pore space changes due to chemical dissolution of rocks // *Applied Mathematical Modelling*. – 2020. – V. 88. – P. 21-37.
7. Lebedev M. et al. Carbon geosequestration in limestone: Pore-scale dissolution and geomechanical weakening // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2017. – V. 66. – P. 106-119.
8. Khachkova T. et al. GPU-based algorithm for evaluating the electrical resistivity of digital rocks // *Computers & Mathematics with Applications*. – 2021. – V. 82. – P. 200-211.
9. Molins S. et al. Pore-scale controls on calcite dissolution rates from flow-through laboratory and numerical experiments // *Environmental science & technology*. – 2014. – V. 48. – № 13. – P. 7453-7460.
10. Kang Q. et al. Pore-scale study of dissolution-induced changes in permeability and porosity of porous media // *Journal of Hydrology*. – 2014. – V. 517. – P. 1049-1055.
11. Yoon H. et al. Pore-scale simulation of mixing-induced calcium carbonate precipitation and dissolution in a microfluidic pore network // *Water Resources Research*. – 2012. – V. 48. – № 2.
12. Osher S., Fedkiw R. P. Level set methods: an overview and some recent results // *Journal of Computational physics*. – 2001. – V. 169. – № 2. – P. 463-502.
13. Xu Z., Meakin P. Phase-field modeling of solute precipitation and dissolution // *The Journal of chemical physics*. – 2008. – V. 129. – № 1. – P. 014705.
14. Peskin C. S. Flow patterns around heart valves: a numerical method // *Journal of computational physics*. – 1972. – V. 10. – № 2. – P. 252-271.
15. Sotiropoulos F., Yang X. Immersed boundary methods for simulating fluid–structure interaction // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2014. – V. 65. – P. 1-21.
16. Gibou F., Fedkiw R., Osher S. A review of level-set methods and some recent applications // *Journal of Computational Physics*. – 2018. – V. 353. – P. 82-109.
17. Bazaikin Y. et al. Effect of CT image size and resolution on the accuracy of rock property estimates // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2017. – V. 122. – № 5. – P. 3635-3647.
18. Al-Khulaifi Y. et al. Pore-scale dissolution by CO₂ saturated brine in a multimineral carbonate at reservoir conditions: Impact of physical and chemical heterogeneity // <https://doi.org/10.5285/52b08e7f-9fba-40a1-b0b5-dda9a3c83be2>.

REFERENCES

1. Miller K, Vanorio T., Keehm Y. Evolution of permeability and microstructure of tight carbonates due to numerical simulation of calcite dissolution // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2017. – V. 122. – № 6. – P. 4460-4474.
2. Dadda, A., Geindreau, C. et al. Characterization of microstructural and physical properties changes in biocemented sand using 3D X-ray microtomography // *Acta Geotechnica*. – 2017. – V. 12. – I. 5. – P. 955–970.

3. Alizadeh A. H. et al. Salt precipitation in ultratight porous media and its impact on pore connectivity and hydraulic conductivity // *Water Resources Research*. – 2018. – T. 54. – № 4. – P. 2768-2780.
4. Kaya E., Zarrouk S. J. Reinjection of greenhouse gases into geothermal reservoirs // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2017. – V. 67. – P. 111-129.
5. Al-Khulaifi Y. et al. Pore-scale dissolution by CO₂ saturated brine in a multimineral carbonate at reservoir conditions: Impact of physical and chemical heterogeneity // *Water Resources Research*. – 2019. – V. 55. – № 4. – P. 3171-3193.
6. Lisitsa V., Bazaikin Y., Khachkova T. Computational topology-based characterization of pore space changes due to chemical dissolution of rocks // *Applied Mathematical Modelling*. – 2020. – V. 88. – P. 21-37.
7. Lebedev M. et al. Carbon geosequestration in limestone: Pore-scale dissolution and geomechanical weakening // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2017. – V. 66. – P. 106-119.
8. Khachkova T. et al. GPU-based algorithm for evaluating the electrical resistivity of digital rocks // *Computers & Mathematics with Applications*. – 2021. – V. 82. – P. 200-211.
9. Molins S. et al. Pore-scale controls on calcite dissolution rates from flow-through laboratory and numerical experiments // *Environmental science & technology*. – 2014. – V. 48. – № 13. – P. 7453-7460.
10. Kang Q. et al. Pore-scale study of dissolution-induced changes in permeability and porosity of porous media // *Journal of Hydrology*. – 2014. – V. 517. – P. 1049-1055.
11. Yoon H. et al. Pore-scale simulation of mixing-induced calcium carbonate precipitation and dissolution in a microfluidic pore network // *Water Resources Research*. – 2012. – V. 48. – № 2.
12. Osher S., Fedkiw R. P. Level set methods: an overview and some recent results // *Journal of Computational physics*. – 2001. – V. 169. – № 2. – P. 463-502.
13. Xu Z., Meakin P. Phase-field modeling of solute precipitation and dissolution // *The Journal of chemical physics*. – 2008. – V. 129. – № 1. – P. 014705.
14. Peskin C. S. Flow patterns around heart valves: a numerical method // *Journal of computational physics*. – 1972. – V. 10. – № 2. – P. 252-271.
15. Sotiropoulos F., Yang X. Immersed boundary methods for simulating fluid–structure interaction // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2014. – V. 65. – P. 1-21.
16. Gibou F., Fedkiw R., Osher S. A review of level-set methods and some recent applications // *Journal of Computational Physics*. – 2018. – V. 353. – P. 82-109.
17. Bazaikin Y. et al. Effect of CT image size and resolution on the accuracy of rock property estimates // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2017. – V. 122. – № 5. – P. 3635-3647.
18. Al-Khulaifi Y. et al. Pore-scale dissolution by CO₂ saturated brine in a multimineral carbonate at reservoir conditions: Impact of physical and chemical heterogeneity // <https://doi.org/10.5285/52b08e7f-9fba-40a1-b0b5-dda9a3c83be2>.

© Т. С Хачкова, В. В. Лисица, 2021

ВОЗМОЖНОСТЬ ИНТЕГРАЦИИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА С ДРУГИМИ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НА ПРИМЕРЕ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Екатерина Евгеньевна Хогоева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, e-mail: KhogoevaEE@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, ассистент каф. геофизики

Евгений Андреевич Хогоев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, e-mail: HoguevEA@ipgg.sbras.ru; СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, программист

Данное исследование посвящено анализу микросейсм, зарегистрированных на территории газоконденсатного месторождения. Показано присутствие эффекта сейсмической эмиссии на части профилей площади. Оконтурирована аномалия микросейсм в северо-восточной части площади, подтверждаемая тремя профилями и интерпретируемая как залежь УВ. Результаты специальной обработки сопоставлены с результатами ряда других геофизических методов. Показана корреляция найденной аномалии микросейсм с аномалией, полученной методом аэрогамма-спектрометрии. Результаты исследования микросейсмической эмиссии могут использоваться в комплексной интерпретации геофизических данных при поиске залежей УВ, в том числе неструктурных.

Ключевые слова: поиск углеводородов, микросейсмичность, сейсмограммы ОГТ, спектральный анализ

INTEGRATION POTENTIAL OF MICROSEISMIC ANALYSIS AND GEOPHYSICAL METHODS. GAS CONDENSATE FIELD CASE STUDY

Ekaterina E. Khogoeva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., Researcher, e-mail: KhogoevaEE@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Assistant

Evgeny A. Khogoev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., PhD, Senior Researcher, e-mail: HoguevEA@ipgg.sbras.ru; SEF of Geophysical Survey RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., Programmer

This study is devoted to an analysis of microseisms registered on gas-condensate field area. Presence of seismic emission effect on a part of the area is demonstrated. A microseismic anomaly is outlined in NW part of the area and proves correct by 3 seismic CDP profiles and interpreted as a reservoir. The results of the special processing was compared to the results of a set of other geophysical methods. Correlation between the found anomaly and an anomaly found with aerogamma-

spectrometry is shown. The results can be used in an integrated interpretation of geophysical data for oil and gas reservoirs of both structural as nonstructural types.

Keywords: oil and gas prospecting, microseismicity, CDP gathers, spectral analysis

Introduction

An analysis of microseismic spectra over an oilfield provides advanced nonstructural information on geological media. Often such analysis requires additional resources and observations with special devices. SanMcs technology [1], applied in this study, is based on raw seismograms observed in common depth point survey and represents a calculation of mean microseismic spectra at receiver points along a profile. Case studies showing this technology aimed to oil and gas prospecting are published [2–4].

The Chaykinskaya area is located on the East of the Nepa-Botuoba antecline, on the SE Nepa anticline plunge, at the area of its jointing with the Predpatomsky deflection. This region is included in a number of objects, studied by SRIGGMIM specialists [5]. Under their supervision, complex geophysical survey was conducted, which included 2D common depth point seismic survey, near-field time-domain electromagnetic sounding, geochemical and aero geophysical survey. The results were compiled by A.S. Efimov, M.Yu. Smirnov et al to the prognostic map of the area [6].

There are two parametric wells drilled on the area 24 km apart. Well №279 revealed a layer comprised of gas-saturated breccia dolomite. Well №367 showed non-commercial oil flow.

Results

The obtained seismic data was provided for special processing. Fig. 1 demonstrates the results of microseismic spectral analyses along line №5 in two different time windows 0.512 s length and corresponding time section. Fig. 1, a represents the result for a chosen time window including intervals before the obtained first brakes, Fig. 1, b – at the end of the recorded traces – after 3.5 s. Comparison of both results shows mid-frequencies microseismic noise enhancement at the end of the line. Fig. 1, a demonstrates some weak midfrequency anomalies at the end of the profile, while Fig. 1, b shows common amplification of low frequency microseisms. The value of the integrated spectra (Fig. 1, c) in frequency range 0–30 Hz at $T_0=3.5$ s exceeds the same value at $T_0=0$ on 39–51 km of the profile by 3–4 times. Such increase of the spectral anomaly at low frequencies corresponds to the emission response of saturated media, induced with the source pulse, which proves the presence of hydrocarbons.

Except line №5, intense microseismic emission is shown on parallel profiles №7, №8 and №9 across the line №5. Fig. 2 demonstrates microseismic spectra along the profiles, the intersection points are shown as black marks. Some parts of line №7 demonstrating high microseismic energy, and strong intervals 9–13 km of line №8, 8–12 km of line №9 outlines the main microseismic anomaly at the same frequency about 10 Hz.

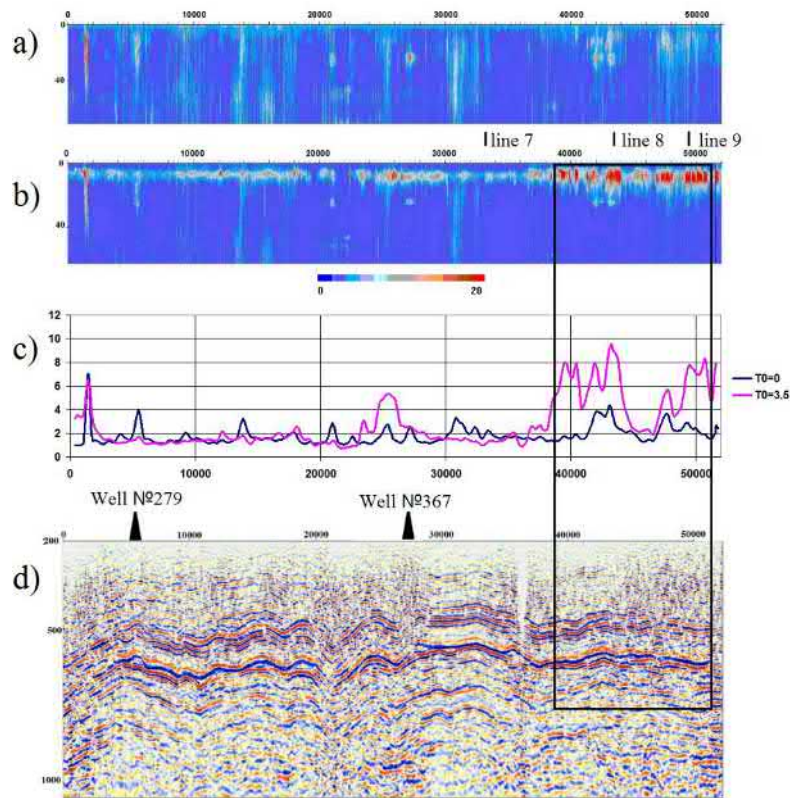


Fig. 1. Line №5 at Chaykinskaya area. Mean spectra at 2km+ offsets:
a – early times, $T_0 = 0$; b – $T_0 = 3,5$ s; c – mean spectra at 0–30 Hz at same time windows; d – time-domain seismic section

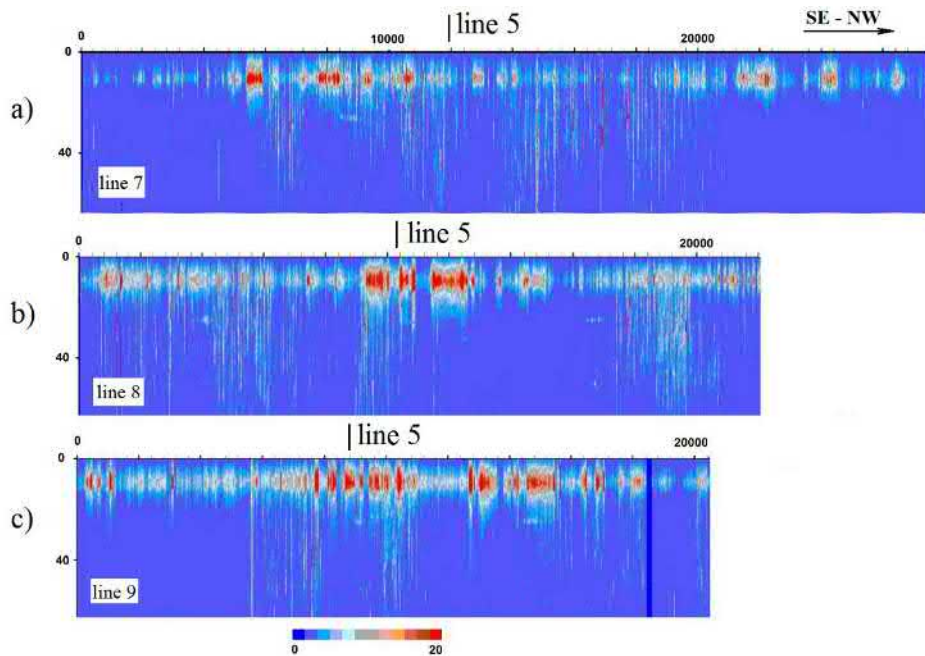


Fig. 2. Lines №7, №8, №9 at Chaykinskaya area. Mean spectra at 2km+ offsets at $T_0 = 3,5$ s; a) line №7; b) line №8; c) line №9. Y – frequency, Hz, X – coordinate. Black ticks show line №5 crossing point

Thus, we can conclude that in the northeast of the area, there is a stable anomaly of mid frequency microseisms, presumably associated with hydrocarbon deposits. The available profile material was interpolated over the entire area using the kriging procedure. The resulting map was used to contour the anomaly along the 0.65 isoline of the normalized microseismic spectrum. The anomaly is demonstrated on fig.3 along with the results of A.S. Efimov et al. study.

The integrated geophysical analysis reveals nine reservoir traps. Prospectivity of the reservoir is shown with colour, dark brown corresponds to high prospectivity, blue corresponds to least prospective reservoirs. Found large anomaly of microseisms in the NW of the area correlates to the trap outlined with aerogamma survey (№5, yellow line). It is important to note, that this survey is based on different indicator of hydrocarbon deposit exposed in radioactive field, i.e. does not relate directly to ambient microseismic noise.

Lyaschenko et al. in their study [7] found that at the South of the Siberian platform all abnormal correlation halos of radioactive elements (mainly of the uranium group) were revealed over all dome structures consisting hydrocarbons, within its water-gas-oil contacts.

To sum up, the prediction based on the study of seismic emission is confirmed by the prediction method based on another feature of the reservoir, presented in different physical field.

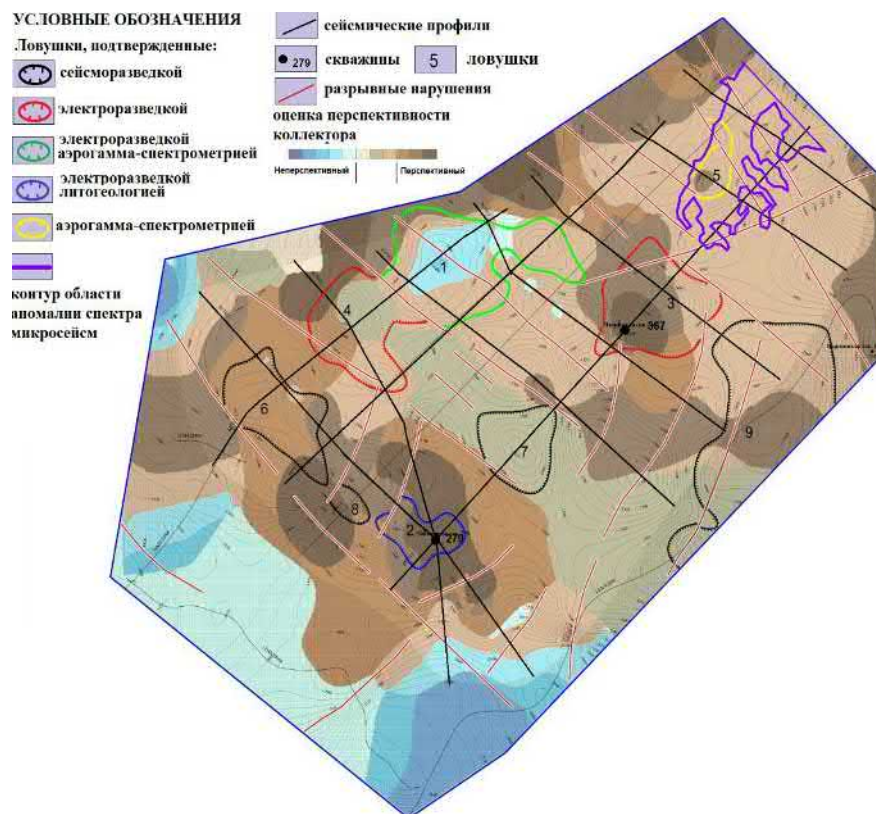


Fig.3 Chaykinskaya field. Detail of the prognostic map of perspective objects built with geophysical complex survey. Based on A.S. Efimov, M.Yu. Smirnov et al. [6].

Blue line on NE of the area shows the main anomaly of microseismic spectra

Conclusion

As a result of our research it was established, that mid-frequency range of ambient microseismic noise, registered in the wavefield at later times than source waves, correlates to mid-frequency ambient noise from the beginning of the seismic record. The difference lies in the more prominent mid-frequency noise at later recording times: its amplitude increases 3–4 times (Fig. 1, d).

Length of the anomaly of microseisms along the line significantly exceeds weak anomalies found in microseismic field at earlier times before the first brakes, which shows an effect of seismic emission induced by source waves. Preferable parameters of the analysis window for microseisms are following – offsets larger than 2 km, times T_0 more than 3.5 s.

In the result of testing our method on seismic material of the Chaykinskaya area, we observe the anomaly of the spectrum of medium frequency microseisms located in the northeastern part of the area. Presence of the anomaly on two parallel adjacent lines №8 and №9 lay 7 km apart and on the transversal line №5 (Fig.2) demonstrates its reliability. Characteristic size of the anomaly shown on lines №8 and №9 is about 2.5 km and is more than 10 km on line №5. Stability of the anomaly and its high contrast prove aerogamma prognosis of hydrocarbon deposit presence on this certain part of Chaykinskaya field.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хогоев Е. А. Программа для ЭВМ «SanMcs»: Свидетельство о программе № 2008613961, опубл. 19.08.08. – М.: Роспатент, 2008.
2. Хогоев Е.А., Хогоева Е.Е., Шемякин М.Л. Результаты численного анализа микросейсм по сейсмограммам МОГТ в районе Пайяхского нефтяного месторождения // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2018. – № 2 (34). – С. 93–99.
3. Хогоев Е.А., Шемякин М.Л. Микросейсмическое районирование Берябинской площади по данным 2D сейсмической разведки // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2017. – № 2 (30). – С. 104–111.
4. Хогоев Е.А., Хогоева Е.Е., Шемякин М.Л. О микросейсмическом отклике среды и возможности его использования при разведке месторождений углеводородов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2019. – № 3 (39). – С. 80–84
5. А. В. Мигурский, В. С. Старосельцев, Н. В. Мельников Опыт изучения Чайкинского поднятия – крупного объекта нефтепоисковых работ на Сибирской платформе // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2010. – № 4. – С. 14–25.
6. Ефимов А.С., Смирнов М.Ю., Старосельцев В.С., Тригубович Г.М. Эффективность прогноза нефтегазоперспективных локальных объектов на территории широкого развития траппового магматизма на Сибирской платформе [Электронный ресурс] URL: <http://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/2576.pdf>
7. Лященко Н. Г., Махнач Е. И., Тригубович Г. М., Карпухин М. И. Результаты интерпретации материалов аэрогамма-спектрометрической съемки в южной части сибирской платформы разведки // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2010. – № 2. – С. 39–48

REFERENCES

1. Hoguev E. A. Programma dlya EVM «SanMcs»: Svidetel'stvo o programme № 2008613961, opubl. 19.08.08. – M.: Rospatent, 2008.
2. Hoguev E.A., Hogueva E.E., SHemyakin M.L. Rezul'taty chislennogo analiza mikroseyism po seismogrammam MOGT v rajone Pajyahskogo neftyanogo mestorozhdeniya // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri. – 2018. – № 2 (34). – S. 93–99.
3. Hoguev E.A., SHemyakin M.L. Mikroseyismicheskoe rajonirovanie Beryambinskoj ploschadi po dannym 2D seysmicheskoy razvedki // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri. – 2017. – № 2 (30). – S. 104–111.
4. Hoguev E.A., Hogueva E.E., SHemyakin M.L. O mikroseyismicheskom otklike sredy i vozmozhnosti ego ispol'zovaniya pri razvedke mestorozhdenij uglevodorodov // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri. – 2019. – № 3 (39). – S. 80–84
5. A. V. Migurskij, V. S. Starosel'cev, N. V. Mel'nikov Opyt izucheniya CHajkinskogo podnyatiya – krupnogo ob"ekta neftepoiskovyh rabot na Sibirskoj platforme // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri. – 2010. – № 4. – S. 14–25.
6. Efimov A.S., Smirnov M.YU., Starosel'cev V.S., Trigubovich G.M. Effektivnost' prognoza neftegazoperspektivnyh lokal'nyh ob"ektov na territorii shirokogo razvitiya trappovogo magmatizma na Sibirskoj platforme [Elektronnyj resurs] URL: <http://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/2576.pdf>
7. Lyashchenko N. G., Mahnach E. I., Trigubovich G. M., Karpuhin M. I. Rezul'taty interpretacii materialov aerogamma-spektrometricheskoy s'emki v yuzhnoj chasti sibirskoj platformy razvedki // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri. – 2010. – № 2. – S. 39–48

© E. E. Хозоева, E. А. Хозоев, 2021

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ В СЛОЖНЫХ ГЕОТЕХНОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА МИРНОГО ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА «КРИСТАЛЛ» (ЯКУТИЯ)

Александр Николаевич Шеин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Научный центр изучения Арктики, 629008, Россия, Тюменская область, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, д. 20, ведущий научный сотрудник; Забайкальский государственный университет, 672039, Россия, Забайкальский край, г. Чита, ул.Александрово-Заводская, д.30, доцент, e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

Светлана Юрьевна Артамонова

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383) 333-27-92, e-mail: artam@igm.nsc.ru

Владимир Владимирович Потанов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник; Забайкальский государственный университет, 672039, Россия, г. Чита, ул. Александрово-Заводская, д.30, доцент, тел. (383) 330-41-22, e-mail: PotanovVV@ipgg.sbras.ru

Николай Олегович Кожевников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, тел. (383) 333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Владислав Егорович Ушницкий

677000, Россия, г. Якутск, ул. Пояркова, д. 21/1, e-mail: ushnitski@mail.ru

В работе приводятся результаты применения в 2019 г. метода электротомографии на площадке боевой скважины мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл», проведенного в 1974 г. на глубине 98 м в многолетнемерзлых кембрийских карбонатных породах, и прилегающем лесном участке. Забор из металлических столбов и колючей проволоки, которым обнесена площадка, и погребенные фрагменты обсадной колонны боевой скважины создавали значительные помехи при замерах. Для устранения шума проведена детальная ручная чистка измеренных данных кажущегося удельного электрического сопротивления. Инверсия данных проведена в программе Res2Dinv с получением геоэлектрических моделей – двумерных разрезов верхней части геологической среды на глубину до 80 м. Для уточнения моделей проводилось прямое моделирование с использованием программы ZondRes2D.

Ключевые слова: электротомография, мирный подземный ядерный взрыв, Якутия, геологическая среда, многолетняя мерзлота, геотехногенная система, геоэкологические исследования

THE ELECTROTOMOGRAPHY SURVEY IN DIFFICULT GEOTECHNOGENIC CONDITIONS AT THE PEACEFUL UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSION "CRYSTAL" SITE

Alexandr N. Shein

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptiyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Researcher; Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, 20 Respubliki st., Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Tyumen region, 629008, Russia, Research Scientist; Transbaikal State University, 30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia, Associate Professor; e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

Svetlana Yu. Artamonova

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Akademika Koptiyuga Prosp., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, D. Sc., Senior Researcher; tel. (383)333-27-92, e-mail: artam@igm.nsc.ru

Vladimir V. Potapov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptiyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Researcher; Transbaikal State University, 30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia, Associate Professor, tel. (383) 333-41-22, e-mail: PotapovVV@ipgg.sbras.ru

Nickolay O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptiyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Scientist, tel. (383) 333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Vladislav E. Ushnitskii

Poyarkova str., 21/1, Yakutsk, 677000, Russia, e-mail: ushnitski@mail.ru

The paper presents the results of measurements in 2019 by electrotomography at the site of the emplacement hole of the peaceful underground nuclear explosion "Crystal", carried in 1974 at a depth of 98 m in permafrost Cambrian carbonate rocks, and the neighboring forest area. The fence made of metal poles and barbed wire around the site, and the buried fragments of the casing of the emplacement hole create significant interference of measurements. To avoid the electromagnetic noise, the measured data of the apparent electrical resistivity was cleaned manually. Data inversion was performed in the Res2Dinv program. Geoelectric models, namely two-dimensional sections of the upper part of the geological environment to a depth of up to 80 m, were obtained. To verify the models, forward modeling was performed using the ZondRes2D program.

Keywords: electrical resistivity tomography, peaceful underground nuclear explosion, Yakutia, geological environment, permafrost, geotechnogenic system, geoecological research

Введение

Во второй половине XX века во всём мире активно использовали ядерную энергию для осуществления «мирных» задач. Мирный подземный ядерный взрыв (ПЯВ) «Кристалл» был проведен в 1974 г. в 8 км от г. Удачный (Якутия) для создания навала для плотины нового хвостохранилища. Поставленная «мирная» задача не была решена, а взрыв, заложенный на глубину 98 м, признали

аварийным. Начиная с 1990 г. объект ПЯВ «Кристалл» и вызванные им последствия изучаются рядом научных и производственных организаций [1-5].

В дополнение уже выполненных работ на объекте «Кристалл» [6, 7], в 2019 г. были проведены измерения методом электротомографии (ЭТ). На площадке боевой скважины «Кристалл» сложные геотехногенные условия для замеров ЭТ обусловлены присутствием погребенных на глубине фрагментов обсадной колонны боевой скважины, и забора из металлических столбов и колючей проволоки, возведённого вокруг площадки боевой скважины (рис. 1, салатовый контур), создающих значительные помехи. На площадке боевой скважины растительный покров нарушен, поросль молодых невысоких деревьев и кустов наблюдается только на ее юго-западном участке. За забором сохраняется природный таежный ландшафт.

Целью нашей работы было построение двумерных геоэлектрических моделей верхней части геологической среды под эпицентром ПЯВ «Кристалл» и верификация полученных моделей с помощью численного моделирования.

Методика измерений

Полевые измерения методом ЭТ, являющейся модификацией метода сопротивлений [8], выполнялись многоэлектродной электроразведочной станцией «СКАЛА 48» (производство КБ «Электрометрия» и ИНГГ СО РАН, Новосибирск) по 7-ми выбранным профилям в 2019 г. (рис. 1). Межэлектродный шаг составлял 5 м, при этом использовалась поле-дипольная прямая и обратная (трёхэлектродная) установка, с выносом удалённого электрода на 1 км перпендикулярно профилям. Глубинность исследования достигала 80 м. Общий объем работ методом ЭТ составил 3805 п.м., в том числе 300 п.м. контрольных измерений.

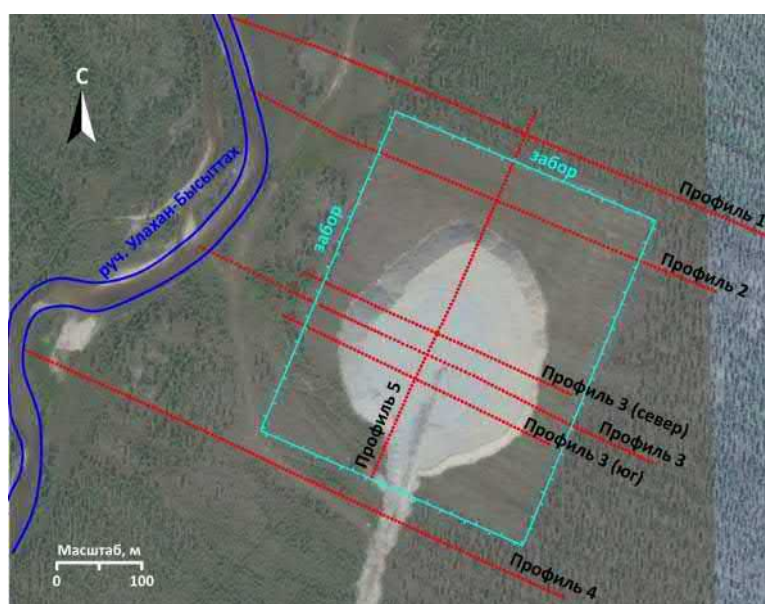


Рис. 1. Схема расположения профилей ЭТ на объекте «Кристалл» в 2019 г.

Методика обработки данных и моделирования

Массив первичных данных кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) обрабатывался в ручную с отбраковкой anomalно низких значений, по нашему мнению, главным образом, обусловленных влиянием металлического забора и погребенных фрагментов обсадной колонны боевой скважины. Кроме того, проводилась отбраковка выбивающихся значений кажущегося УЭС на разных уровнях (зависимость значений УЭС от глубины относительно среднего значения). Затем проводилась инверсия в программе Res2Dinv с учётом влияния рельефа, с использованием робастной инверсии со стандартным методом Гаусса-Ньютона. Использовалась более густая расчётная сетка, что позволило улучшить детальность неоднородной, в том числе из-за присутствия забора, верхней части разреза [9].

Для верификации полученных моделей проводилось численное моделирование с использованием программы ZondRes2D и Res2DInv. В первой решалась прямая задача, а во второй проводилась инверсия полученных синтетических данных.

Результаты измерений

Рассмотрим профиль 2 длиной 595 м, который проходил от участка нетронутой тайги на высоте около 330 абс. м и заканчивающегося у русла руч. Улахан-Бысытта на высоте 300 абс. м., с двойным пересечением металлического забора (рис. 2). В результате инверсии измеренных данных кажущегося УЭС был построен двумерный геоэлектрический разрез с учётом рельефа (рис. 2).

В верхней части разреза прослеживается сезонно-талый слой (СТС) мощностью 2–3 м, где УЭС меняются от десятков до сотен Ом·м. Ниже наблюдается существенное возрастание УЭС до 10^3 – 10^4 Ом·м. Мощность этого слоя на площадке боевой скважины составляет около 20 м, а в нетронутом таежном участке забором простирается на всю глубину разреза (80 м). В пределах площадки боевой скважины этот высокоомный слой ниже сменяется на проводящий слой с УЭС до 10 Ом·м. Можно допустить, что в нашей геоэлектрической модели именно помехи от металлического забора приводят к «появлению» этого проводящего слоя. Тем более, что влияние забора очевидно прослеживается на 100 м и 425 м профиля 2 (рис. 2, оттенки синего) на глубину до 60 м. С целью выяснения природы этого слоя и/или подтверждения ложности его anomalно низких УЭС проведено численное моделирование данных ЭТ для геоэлектрических моделей, сформированных на основании априорной информации (геология и забор).

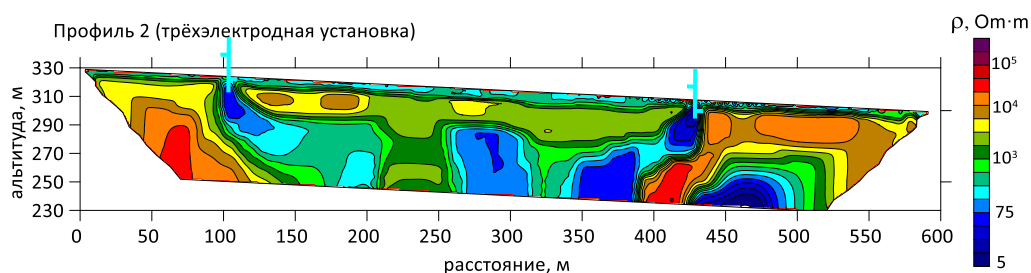


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по профилю 2 полученный в результате измерений методом электротомографии трёхэлектродной установкой

Результаты моделирования

Прежде всего, мы проверили влияние забора на результат инверсии. Для этого была составлена горизонтально-слоистая модель, соответствующая разрезу нетронутого таежного участка (рис. 3), в которой выделили верхний слой мощностью 2 м с УЭС 100 Ом·м, соответствующий сезонно-талому слою. Под ним был задан второй 20- метровый слой с УЭС 10 кОм·м, а его подстилал третий слой с УЭС 2 кОм·м. В верхнем слое задали два объекта, имитирующих металлический забор, размером каждого 4х2 м с УЭС 0.1 Ом·м.

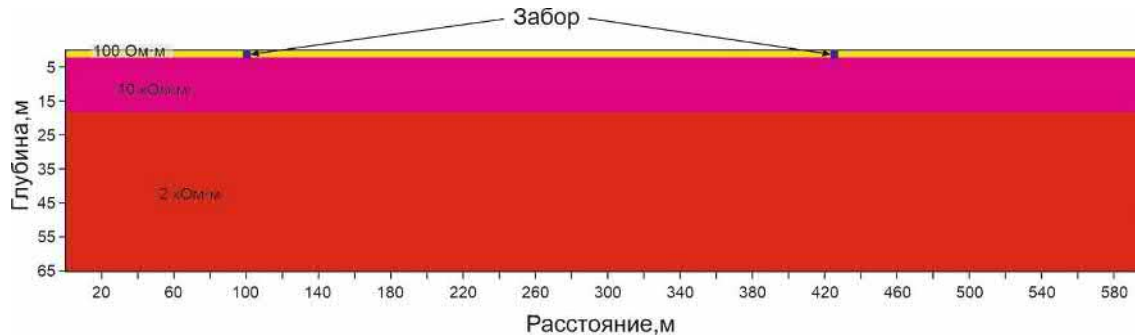


Рис. 3. Геоэлектрическая модель среды с проводящими включениями, имитирующими забор

Прямая задача ЭТ решалась в программе ZondRes2D для трёхэлектродной установки с параметрами, которые соответствуют полевым измерениям (межэлектродный шаг 5 м, длина профиля 595 м). Были получены синтетические данные кажущегося УЭС, которые подвергли инверсии в программе Res2DInv. В результате получена синтетическая двумерная геоэлектрическая модель (рис. 4), которая показала распространение аномалий низких УЭС, генерируемых заданным «металлическим забором», на всю глубину разреза. При сравнении с геоэлектрической моделью, полученной на основе измеренных данных ЭТ на профиле 2 (рис. 2), ясно увидим схожесть аномалий низких УЭС заданного «металлического забора» и участков пересечения реального металлического забора на площадке объекта «Кристалл». При этом несомненно явные различия этих геоэлектрических моделей прослеживаются в их центральной части.

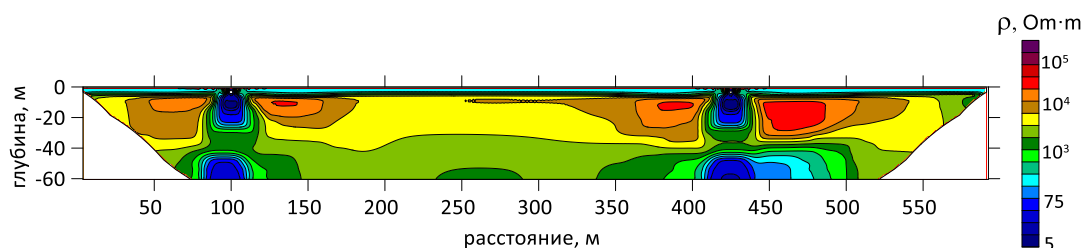


Рис. 4. Геоэлектрический разрез полученный в результате инверсии данных рассчитанных для модели с проводящими включениями, имитирующими забор

Следующим шагом синтетическую модель осложнили вводом на разные глубины ее центральной части несколько проводящих объектов различной формы с низкими УЭС (1.8; 3 и 11 Ом·м) (рис. 5).

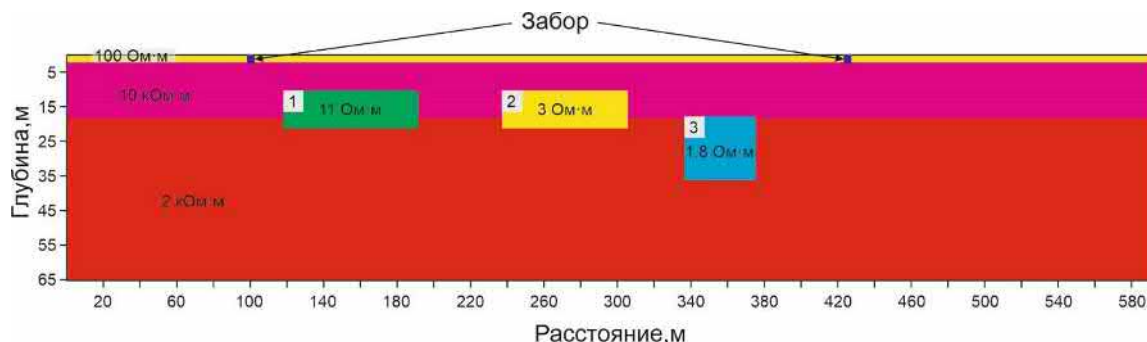


Рис. 5. Геоэлектрическая модель среды с включениями, имитирующими забор и проводящими объектами

Затем снова повторили процедуру прямого моделирования в программе ZondRes2D с последующей обратной инверсией полученных синтетических данных в программе Res2DInv и получили соответствующую геоэлектрическую модель (рис. 6). Согласно этой модели, объекты 1 и 2, находящиеся практически полностью во втором слое, формируют аномалию низких УЭС на всю глубину разреза. При этом влияние объекта 3, погруженного полностью в третий слой, на геоэлектрическую модель в целом оказалось незначительным, несмотря на более низкие исходно заданные УЭС по сравнению с объектами 1 и 2 (1.8 Ом·м вместо 11 и 3 Ом·м). Полученная синтетическая геоэлектрическая модель оказалась подобной модели, полученной при инверсии измеренных данных. Что дает основание предположить, что выявленные аномалии низких УЭС в центральной части профиля 2 (рис. 2) не связаны с помехами, вызванными металлическим забором, их источниками являются другие объекты, возможно талые пласты, насыщенные соленой водой, или металлические (железные) электропроводящие фрагменты. Согласно нашего предположения, проводящая зона в центральной части разреза профиля 2 могла возникнуть вследствие деградации многолетнемерзлых отложений на глубинах до 20 м.

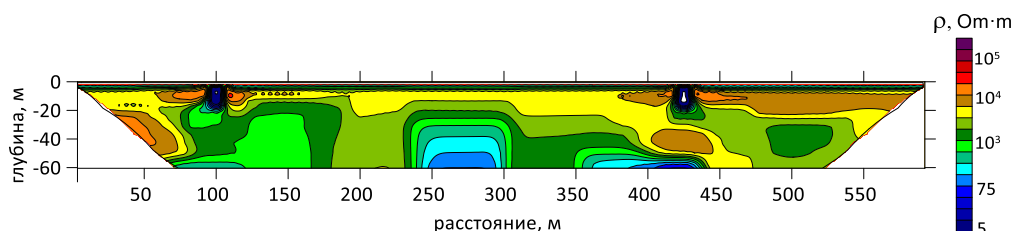


Рис. 6. Геоэлектрический разрез полученный в результате инверсии данных рассчитанных для модели с включениями, имитирующими забор и проводящими объектами

Выводы

Металлические объекты: забор и погребенные фрагменты обсадной колонны боевой скважины затрудняют интерпретацию данных ЭТ, создавая геоэлектрические аномалии сверхнизких УЭС. Вместе с тем, индивидуальный подход к каждому набору первичных данных кажущегося УЭС позволяет выполнить инверсию на хорошем уровне.

Эффективным инструментом для верификации полученной в результате инверсии геоэлектрической модели является прямое моделирование с последующей инверсией синтетических данных.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-45-140020, по государственному заданию ИГМ СО РАН, по государственному заказу № Ф.2019.473808 в рамках программы «Обеспечение экологической безопасности, рационального природопользования и развитие лесного хозяйства Республики Саха (Якутия) на 2018 – 2022 гг.».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурцев, И. С., Степанова, С. К., Колодезникова, Е. Н., Архипов, Н. Д. Опыт работы по обследованию подземных ядерных взрывов и отвалов урансодержащих руд на территории Якутии // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия). Материалы II Республиканской научно-практической конференции. Якутск, ЯФГУ. – «Изд-во СО РАН», 2004 – С. 56—67.
2. Микуленко К.И., Чомчоев А.И., Готовцев С.П. Геолого-географические условия проведения и последствия подземных ядерных взрывов на территории Республика Саха (Якутия). Якутск. – Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006 – 196 с.
3. Ramzaev V., Mishine A., Golikov V., Argunova T., Ushnitski V., Zhuravskaya A., Sobakin P., Brown J., Strand P. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978-2007: a review // Journal of Environmental Radioactivity. – 2009. – V. 100. – Issue 12. – P. 1092-1099.
4. Собакин П.И. Миграция ^{137}Cs в мерзлотных почвах Якутии // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2010. – Т.50. – №5. – С. 590-598.
5. Артамонова, С. Ю., Бондарева, Л. Г., Антонов, Е. Ю., Кожевников, Н. О. Геоэкологическая модель района мирного подземного ядерного взрыва Кристалл (Якутия). // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2. – 2012 – С. 143-158.
6. Kozhevnikov N. O., Antonov E. Y., Artamonova S. Y., Plotnikov A. E. The geoelectric structure at the site of “Crystal” underground nuclear explosion (Western Yakutia) from TEM data // Russian Geology and Geophysics. – 2012. – Vol.53. – № 2. – P. 185-193.
7. Артамонова С. Ю., Шеин А. Н., Потапов В. В., Кожевников Н. О., Новикова П. Н., Ушницкий В. Е. Магнитные аномалии на площадке объекта мирного подземного ядерного взрыва "Кристалл" (Западная Якутия) // Известия Томского политехнического университета. – 2020. – 331(12). – С. 158-172.
8. Балков, Е. В., Панин, Г. Л., Манштейн, Ю. А., Манштейн, А. К., Белобородов, В. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. – №6 – 2012. — С. 54–63.
9. Manual for RES2DINV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geotomosoft.com/r2dimanu.zip> (дата обращения: 20.04.2021).

REFERENCES

1. Burcev, I. S., Stepanova, S. K., Kolodeznikova, E. N., Arhipov, N. D. Opyt raboty po obsledovaniyu podzemnyh yadernyh vzryvov i otvalov uransoderzhashchih rud na territorii YAkutii // Radiacionnaya bezopasnost' Respubliki Saha (YAkutiya). Materialy II Respublikanskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. YAkutsk, YAFGU. – «Izd-vo SO RAN», 2004 – S. 56—67.
2. Mikulenko K.I., CHomchoev A.I., Gotovcev S.P. Geologo-geograficheskie usloviya provedeniya i posledstviya podzemnyh yadernyh vzryvov na territorii Respublika Saha (YAkutiya). YAkutsk. – Izd-vo YANC SO RAN, 2006 – 196 s.
3. Ramzaev V., Mishine A., Golikov V., Argunova T., Ushnitski V., Zhuravskaya A., Sobakin P., Brown J., Strand P. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978-2007: a review // Journal of Environmental Radioactivity. – 2009. – V. 100. – Issue 12. – P. 1092-1099.
4. Sobakin P.I. Migratsiya ^{137}Cs v merzlotnyh pochvah YAkutii // Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya. – 2010. – T.50. – №5. – S. 590-598.
5. Artamonova, S. YU., Bondareva, L. G., Antonov, E. YU., Kozhevnikov, N. O. Geoeologicheskaya model' rajona mirnogo podzemnogo yadernogo vzryva Kristall (YAkutiya). // Geoeologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya, 2. – 2012 – S. 143-158.
6. Kozhevnikov N. O., Antonov E. Y., Artamonova S. Y., Plotnikov A. E. The geoelectric structure at the site of "Crystal" underground nuclear explosion (Western Yakutia) from TEM data // Russian Geology and Geophysics. – 2012. – Vol.53. – № 2. – P. 185-193.
7. Artamonova S. YU., SHein A. N., Potapov V. V., Kozhevnikov N. O., Novikova P. N., Ushnickij V. E. Magnitnye anomalii na ploshchadke ob"ekta mirnogo podzemnogo yadernogo vzryva "Kristall" (Zapadnaya YAkutiya) // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2020. – 331(12). – S. 158-172.
8. Balkov, E. V., Panin, G. L., Manshtejn, YU. A., Manshtejn, A. K., Beloborodov, V. A. Elektrotomografiya: apparatura, metodika i opyt primeneniya // Geofizika. – №6 – 2012. — С. 54–63.
9. Manual for RES2DINV [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.geotomo-soft.com/r2dimanu.zip> (data obrashcheniya: 20.04.2021).

© А. Н. Шейн, С. Ю. Артамонова, В. В. Потапов,
Н. О. Кожевников, В. Е. Ушницкий, 2021

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПЛОЩАДКЕ CALM R53

Александр Николаевич Шеин

Научный центр изучения Арктики, 629008, Россия, Тюменская область, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, д. 20, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник, Забайкальский государственный университет, 672039, Россия, Забайкальский край, г. Чита, ул.Александрово-Заводская, д.30, доцент, e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

Ярослав Константинович Камнев

Научный центр изучения Арктики, 629008, Россия, Тюменская область, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, д. 20, кандидат физико-математических наук, заведующий сектором криосферы, e-mail: KamnevYK@gmail.com

В работе приводятся геофизические исследования на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя CALM R53, где с 2016 года проводятся стандартные измерения мерзлотным щупом, электротомография (ЭТ) и георадиолокация (ГРЛ). Проведена оценка возможностей ГРЛ и метода ЭТ в представленных на площадке ландшафтных условиях.

Ключевые слова: CALM, сезонно-талый слой, электротомография, георадиолокация

GEOPHYSICAL SURVEYS AT THE CALM R53 SITE

Alexandr N. Shein

Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, 20 Respubliki st., Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Tyumen region, 629008, Russia, PhD, Research Scientist; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptuyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Researcher; Transbaikal State University, 30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia, associate professor, e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

Yaroslav K. Kamnev

Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, 20 Respubliki st., Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Tyumen region, 629008, Russia, PhD, Head of sector of cryosphere, e-mail: KamnevYK@gmail.com

The paper presents geophysical surveys at the CALM R53 site, where since 2016 standard measurements with a permafrost rod, electrical resistivity tomography and ground-penetrating measurements have been carried out. The assessment of the capabilities of geo-radar and the ET method in the landscape conditions presented at the site was carried out.

Keywords: CALM, active layer, electrical resistivity tomography, ground-penetrating radar

Введение

В последнее время криолитозоне уделяют всё больше внимание, что связано с несколькими причинами. Основная из них – это слабая устойчивость многолетнемерзлых пород (ММП) к изменениям климата. Деграция ММП, оказывает

влияние на естественные ландшафты, вызывая заболачивание территории, приводит к повреждениям инфраструктуры районов крайнего севера. Таким образом мониторинг за эволюцией криолитозоны является важной научной задачей.

Программа циркумполярного мониторинга деятельного или сезонно-талого слоя (СТС) (Circumpolar Activelayer Monitoring, CALM) CALM направлена на сбор и систематизацию информации о реальных изменениях криолитозоны различных ландшафтных условиях [1; 2]. За стандартную принята площадка 100 на 100 м (рис. 1) с максимальным единообразием ландшафтных условий.

В 2016 году сотрудниками Научного центра изучения Арктики (г. Салехард) совместно с МГУ была заложена площадка для мониторинга вблизи п. Харп [3]. На ней ежегодно проводится мониторинг: стандартные измерения мерзлотным щупом и геофизические измерения (георадар, электротомография).

Площадка CALM R53 расположена вблизи п. Харп. Верхняя часть разреза сложена глинами, суглинками и мелким обломочным материалом (гравий). Такое строение осложняет исследование как стандартной методикой – мерзлотным щупом (галька препятствует прохождению), так и геофизическими методами (сигнал георадар быстро затухает). Поэтому комплексирование различных подходов при изучении СТС в таких условиях крайне необходимо.

Методика измерений методом георадиолокации

В соответствии со стандартами международной программы CALM наблюдения за глубиной протаивания на площадке размерами 100 м×100 м проводятся мерзлотным щупом с шагом измерений через 10 м [Brown et al., 2000]. Суммарно сетка наблюдений содержит 121 точку (рис. 1). Именно по этой сетке проводились геофизические измерения.

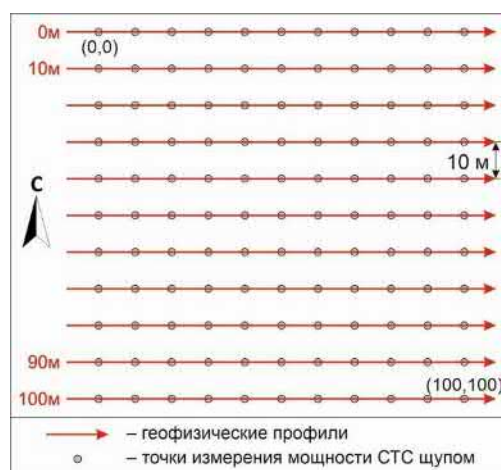


Рис. 1 Схемы фактического материала на площадке CALM R53

Исследования методом ГРЛ выполнялось по сети профилей (через каждые 10 м) по направлению восток-запад. Используемая аппаратура: георадарный комплекс «ОКО-2». Используемая в работа антенна с центральной частотой

400 МГц обладает глубиной от 1 м до 5 м, в зависимости от проводимости и степени поглощения подстилающей среды.

Перед началом измерений выставлялись следующие настройки прибора: длительность временной развёртки – 100 нс, накопление – 16, диэлектрическая проницаемость среды – 12. Настройки выставлялись в соответствии с рекомендациями [4]. Перемещение прибора осуществлялось волоком. Пройденное расстояние фиксировалось с помощью мерного колеса.

Методика измерений методом электротомографии

На площадке CALM измерения методом ЭТ проводились при ориентации профилей – запад-восток. Длина профилей составляла 117,5 м, а расстояние между профилями 5 м. Межэлектродное расстояние составляло 2,5 м. Использовалась стандартная установка Шлюмберже. Измерения выполнены многоэлектродной электроразведочной станцией «Скала-48» (совместная разработка ИНГГ СО РАН и ООО «КБ Электрометрии»). Результатом измерений является информация о распределении кажущегося удельного электрического сопротивления по глубине вдоль профиля измерений (геоэлектрический разрез). В результате, по всей площадке CALM, получен 21 разрез.

Измеренные профильные данные обрабатываются совместно – решается обратная двумерная задача (двумерная инверсия данных) с помощью специальных программ (например, Res2Dinv, ZondRes2D и другие).

Результаты измерений методом георадиолокации

Из полученных радарограмм видно, что чёткой картины отражения от границы талых и мёрзлых пород не наблюдается (рис. 2). Граница прослеживается лишь на некоторых участках (рис. 2, 40-55 м). Сигнал осложнён дополнительными отражениями (литологических неоднородности, кратные переотражения – 10-20 м, 55-60 м на рис. 2). Причиной этому может быть сложная литологическая обстановка, обилие глины, суглинков и возможная засоленность участка. Подобные проблемы часто возникают при исследовании СТС, где присутствуют глинистые породы или торфяники [5]. Для установления причин столь нестабильного и прерывистого сигнала необходимо проводить дополнительные исследования, в частности рекомендуется провести опытные работы в зимний период [5].

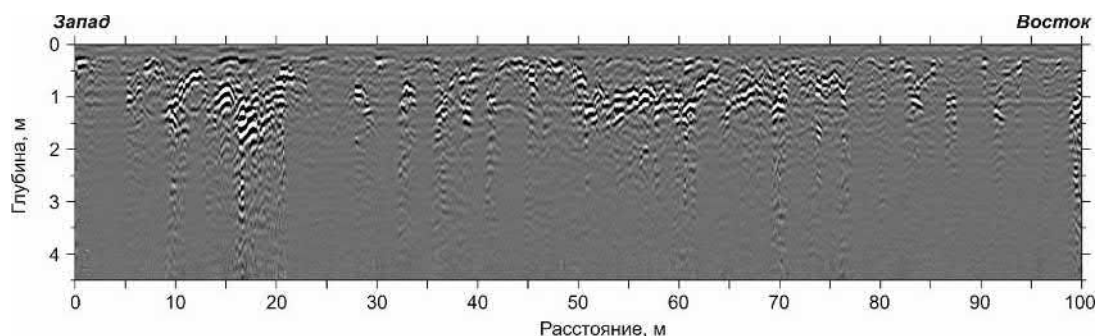


Рис. 2. Пример радарограммы, полученной на площадке CALM R53, профиль 0м

Однако георадиолокацию можно использовать, чтобы уточнять данные, полученные щупом (в тех местах, где прослеживается уверенная граница отражения). На данной площадке это необходимо ввиду наличия в разрезе гальки, которая при измерениях щупом может быть принята за границу ММП, несмотря на методику многократных повторений. В таких случаях применение георадара может помочь в определении истинной границы мерзлоты. Для этого по соседним точкам измерений нужно определить диэлектрическую проницаемость грунтов и прослеживая границу отражения, установить реальную глубину протаивания мерзлоты.

Результаты измерений методом электротомографии

В результате проведённых измерений методом ЭТ построен 21 геоэлектрических разрез, где можно проследить деятельный слой, сопротивление которого не превышает 100 Ом·м (рис. 3, оттенки красного), а его мощность коррелирует с глубинами, которые определены щупом (рис. 3, фиолетовый пунктир). Кроме того, можно проследить зоны повышенного (больше 1000 Ом·м) и умеренного сопротивления (100-800 Ом·м).

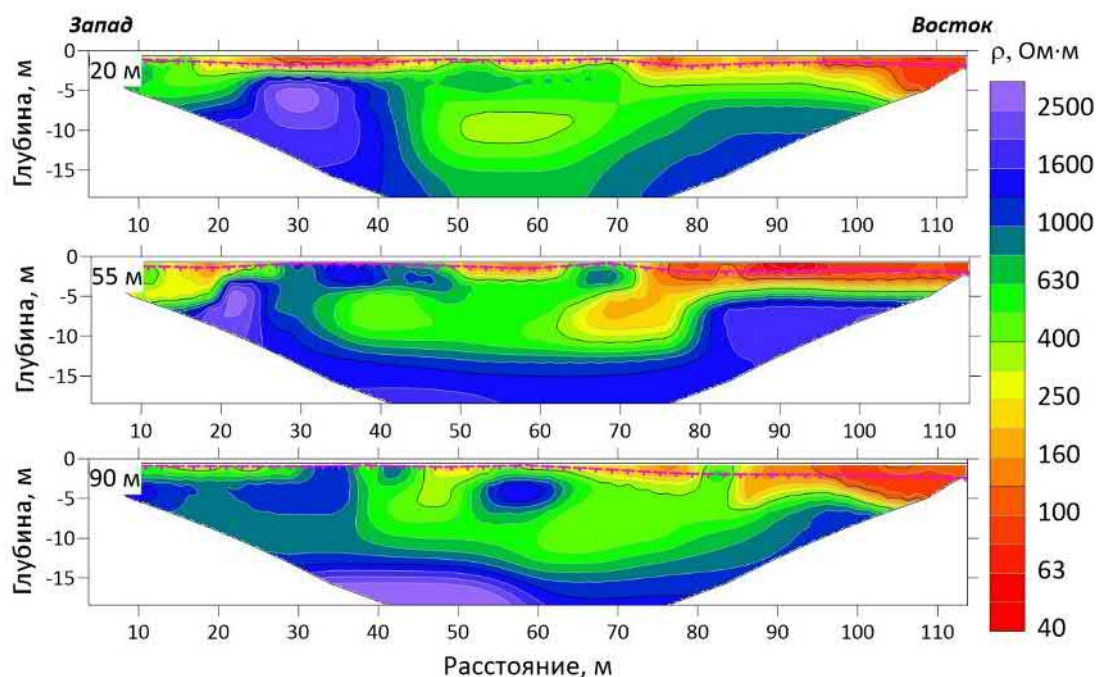


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы, полученные на площадке CALM R53 и граница СТС, измеренная щупом (фиолетовый пунктир)

На рис. 3 приводятся три разреза, где можно проследить все указанные выше особенности. Максимальная протайка, как и по результатам измерений щупом находится в восточной части площадки (рис. 3, оттенки красного): 70-117 м на всех трёх профилях. На профиле 20 м проводящий талый слой присутствует на всём протяжении разреза в отличие от двух других профилей. На разрезе 55 м

и 90 м верхний талый слой прерывается, что связано с уменьшением его мощности до размеров, меньших разрешающей способности метода ЭТ.

В центральной части разрезов на глубине 5-10 м проявляется умеренно проводящая зона с сопротивлением от 100 до 800 Ом·м (рис. 3, оттенки зелёного). Эта зона по всей видимости приурочена к глинам или частично талым породам. Кроме того, выявленная умеренно-проводящая область, может быть приурочена к разломной зоне. Остальная часть разреза сложена высокоомными многолетне-мёрзлыми породами с УЭС больше 1000 Ом·м (рис. 3, оттенки синего) – мёрзлые песчаногаличные отложения.

Несмотря на то, что на некоторых участках разрешающая способность метода ЭТ превышает глубину СТС, наблюдается корреляция мощности низкоомных пород (рис. 3, оттенки красного) и данных, полученных мерзлотным щупом (рис. 3, фиолетовая кривая). Поэтому можно предположить, что уменьшение межэлектродного расстояния позволит детализировать верхнюю часть разреза и уточнить строение СТС.

Выводы

Георадиолокация в ландшафтных и геологических условиях, представленных на площадке CALM R53 малоэффективна. Для повышения эффективности требуются дополнительные исследования, в том числе, в зимнее время.

Низкоомные области на геоэлектрических разрезах, полученных в результате измерений методом электротомографии хорошо коррелируют с данными щупа. Уменьшение межэлектродного расстояния в комплексе с георадаром и стандартной методикой (использование мерзлотного щупа) позволят повысить качество мониторинга СТС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brown J., Hinkel K. M., Nelson F. E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: Research designs and initial results // Polar Geography. – 2000. – vol. 24. – 3. – P.258
2. Klene, A.E., Nelson, F.E., Shiklomanov, N.I. The N-factor in natural landscapes: variability of air and soil-surface temperatures, Kuparuk River basin, Alaska, USA // Arctic, Antarctic and Alpine Res.. – 2001. – 33. – P.140–148.
3. Камнев Я.К., Синицкий А.И., Гребенец В.И., Петров Б.В. Создание площадки для мониторинга глубины сезонно-талого слоя вблизи п. Харп // Научный вестник ямало-ненецкого автономного округа. – 2016. – № 4(93). – с. 25-28.
4. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Георадиолокационные исследования верхней части разреза. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ. – 1999. – 90 с.
5. Sudakova M.S., Sadurtdinov M.R., Tsarev A.M., Skvortsov A.G., Malkova G.V. Ground-penetrating radar for studies of peatlands in permafrost // Russian Geology and Geophysics. – 2019. – I. 60. – № 7. – P. 793-800.

REFERENCES

1. Brown J., Hinkel K. M., Nelson F. E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: Research designs and initial results // Polar Geography. – 2000. – vol. 24. – 3. – P.258.
2. Klene, A.E., Nelson, F.E., Shiklomanov, N.I. The N-factor in natural landscapes: variability of air and soil-surface temperatures, Kuparuk River basin, Alaska, USA // Arctic, Antarctic and Alpine Res.. – 2001. – 33. – P.140–148.

3. Kamnev YA.K., Sinickij A.I., Grebenec V.I., Petrov B.V. Sozdanie ploshchadki dlya monitoringa glubiny sezonno-talogo sloya vblizi p. Harp // Nauchnyj vestnik yamalo-neneckogo avtonomnogo okruga. – 2016. – № 4(93). – s. 25-28.

4. Vladov M.L., Starovojtov A.V. Georadiolokacionnye issledovaniya verhnej chasti razreza. Uchebnoe posobie. – M.: Izd-vo MGU. – 1999. – 90 s.

5. Sudakova M.S., Sadurtdinov M.R., Tsarev A.M., Skvortsov A.G., Malkova G.V. Ground-penetrating radar for studies of peatlands in permafrost // Russian Geology and Geophysics. – 2019. – I. 60. – № 7. – P. 793-800.

© А. Н. Шейн, Я. К. Камнев, 2021

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ПРОГНОЗ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ БАТСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА СРЕДНЕЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКОЙ И СМЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ ГЫДАНСКОЙ ОБЛАСТЕЙ СИБИРСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ

Георгий Георгиевич Шемин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-28-91, e-mail: SheminGG@ipgg.sbras.ru

Павел Андреевич Глазырин

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 1, студент, тел. (383)330-28-91, e-mail: GlazyrinPA@ipgg.sbras.ru

В статье приведены результаты количественного прогноза нефтегазоносности наиболее перспективного батского регионального резервуара юрских отложений Енисей-Хатангской и смежной территории Гыданской нефтегазоносных областей (НГО). На основе ранее разработанных и опубликованных авторами настоящей статьи моделей строения, а также реконструированных условий формирования его составляющих частей – проницаемого комплекса и флюидоупора. Рассмотрены тектонические, литолого-фациальные критерии, изложены методика и результаты оценки перспектив нефтегазоносности батского резервуара исследуемого региона.

Ключевые слова: резервуар, прогноз нефтегазоносности, газ, конденсат, запасы, ресурсы

QUANTITATIVE FORECAST OF OIL AND GAS POTENTIAL IN THE BATHIAN REGIONAL RESERVOIR OF THE MIDDLE JURSIAN SEDIMENTS OF THE YENISEI-KHATANG AND ADJACENT TERRITORY OF GYDAN REGIONS OF THE SIBERIAN ARCTIC SECTOR

Georgy G. Shemin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, DSc, Chief Researcher, tel. (383) 330-28-91, e-mail: SheminGG@ipgg.sbras.ru

Pavel A. Glazyrin

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova St. 2, Student, tel. (383) 330-28-91, e-mail: GlazyrinPA@ipgg.sbras.ru

In this article, the results are shown of quantitative oil-and-gas potential assessment for the most promising Bathonian regional reservoir of the Jurassic sediments in the Yenisei-Khatanga territory and the adjacent territory of the Gydan petroleum province. The assessment is based on structural models and formation conditions reconstruction for the reservoir's constituents, permeable complex and caprock. This method has been developed and published by the authors of the present article earlier. Tectonic and lithologic-and-facies criteria are considered. The methodology and results of the oil-and-gas potential assessment of the Bathonian reservoir are described.

Keywords: reservoir, prediction of oil-and-gas potential, gas, condensate, actual reserves, resources

Исследуемый регион включает Енисей-Хатангский прогиб (одноименная нефтегазоносная область) и смежную территорию Западно-Сибирской геосинеклизы (восточная часть Гыданской нефтегазоносной области) (рис. 1). Несмотря на длительную историю проведения нефтегазопроисловых работ он до настоящего времени остается низкоизученным сейсморазведкой и особенно глубоким бурением.



Рис. 1. Тектоническая карта Енисей-Хатангского регионального прогиба и смежной территории Западно-Сибирской геосинеклизы

1-5 - границы: 1 - Внешнего пояса, 2 - надпорядковых структур, 3 - структур 0 порядка, 4 - структур I порядка, 5 - структур II порядка; 6 - разломы; 7 - границы распространения мезозойско-кайнозойских отложений осадочного чехла; 8 - границы распространения юрских отложений; 9-12 - положительные структуры: 9 - надпорядковые, 10 - 0 порядка, 11 - I порядка, 12 - II порядка; 13-16 - отрицательные структуры: 13 - надпорядковые, 14 - 0 порядка, 15 - I порядка, 16 - II порядка; 17 - седловины и мегаседловины (I - Внутренняя седловина, II - Танамская мегаседловина); 18 - мегамоноклизы Внешнего пояса; 19 - Южно-Таймырская мегамоноклиза Внутренней области

Целью изложенных в статье результатов исследований являлось уточнение количественной оценки перспектив нефтегазоносности наиболее перспективного среднеюрских отложений батского регионального резервуара с

использованием более достоверного, чем раннее, метода оценки на базе ранее подготовленной и опубликованной ранее авторами более обширной и разнообразной исходной геологической информации [2].

Критерии оценки перспектив нефтегазоносности Батского резервуара

При количественной оценке перспектив нефтегазоносности батского резервуара исследуемого региона использовались результаты анализа тектонических, литолого-фациальных и геохимических критериев. В качестве тектонических критериев использовался структурный план, составленный по кровле проницаемого комплекса батского резервуара и степени его осложнения дизъюнктивными нарушениями. Методика оценки этих критериев достаточно подробно описана в работе Г.Г. Шемина [3].

Литолого-фациальные критерии прогноза нефтегазоносности батского резервуара базируются на оценки качества его составных частей – флюидоупора и проницаемого комплекса. Методика оценки их качества приведена в работе [3].

В качестве геохимических критериев прогноза нефтегазоносности использовались результаты исследований нефтегазогенерационного потенциала и катагенеза органического вещества нефтематеринских отложений, которыми являются образования вымской и гольчихинской свит. Первая из них подстилает, а вторая перекрывает проницаемый комплекс батского резервуара. Результаты этих исследований изложены в работе О.И. Бострикова [4].

Методика количественного прогноза нефтегазоносности Батского резервуара

При проведении количественной оценки перспектив нефтегазоносности батского резервуара Енисей-Хатангской и смежной территории Гыданской нефтегазоносных областей (НГО) использовалось последнее утвержденное в 2000 г. «Методическое руководство по количественной и экономической оценке ресурсов нефти, газа и конденсата России» [5]. Степень изученности отложений рассматриваемого региона и выявленная промышленная нефтегазоносность позволили количественно оценить их перспективы нефтегазоносности геологическим способом по удельным плотностям запасов углеводородов (УВ) на единицу площади.

Количественная оценка перспектив нефтегазоносности батского резервуара исследуемого региона осуществлялась по следующей схеме. Сначала, в соответствии и инструктивными требованиями [5], были выделены и охарактеризованы эталонные участки с подсчетом удельных плотностей начальных суммарных ресурсов углеводородов. Таких участков для количественной оценки батского резервуара региона выделено два: Тазовский и Зимний. Первый из них приведен на рис. 2.

Далее, учитывая инструктивные требования, были выделены (по принципу схожести геологического строения) области, оцененные тем или иным эталонным участком, которые разделялись на расчетные участки.

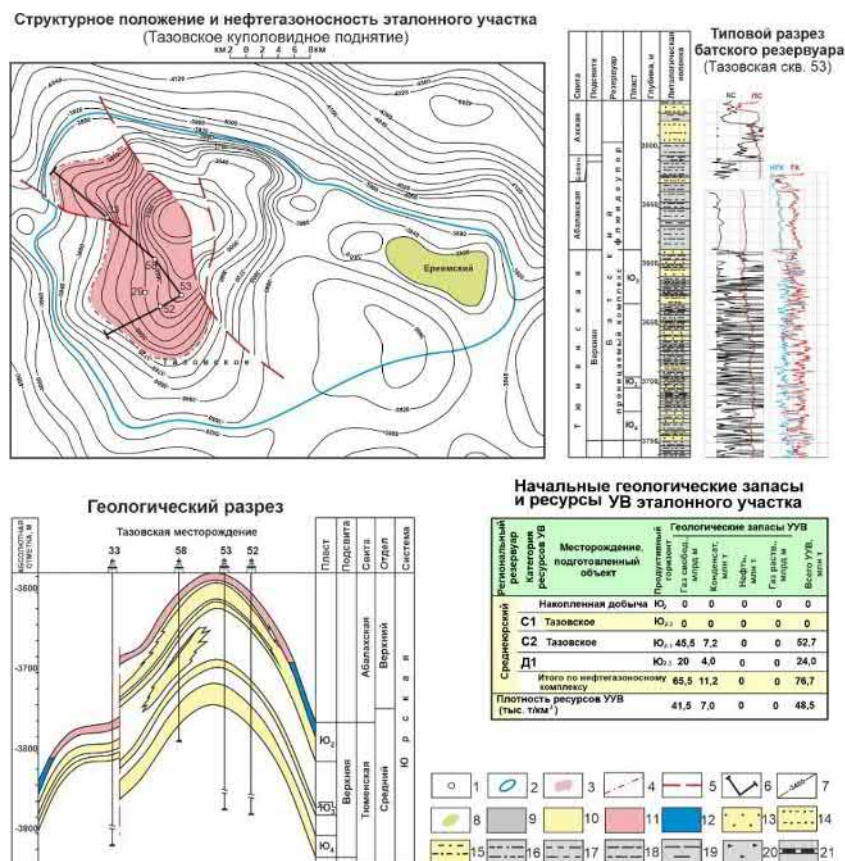


Рис. 2. Геологическое строение и основные параметры Тазовского эталонного участка (батский региональный резервуар, пласт Ю2-3)

1 – скважины; 2 – контур эталонного участка; 3 – газовые залежи; 4 – внешний контур ГВК; 5 – тектонические нарушения; 6 – линии геологического разреза; 7 – изогипсы по кровле пласта Ю2-3; 8 – подготовленные объекты для постановки поисково-оценочных работ; 9 – глинистые породы межпластовых перемычек; 10 – непроницаемые алевролиты и песчаники; 11-12 насыщение песчаных пластов: 11 – газовое, 12 – водяное; 13-21 породы: 13 – песчаники, 14 – песчаники алевролитистые и алевролитовые, 15 – алевролитопесчаники, 16 – алевролиты глинистые и песчаные, 17 – алевролиты глинистые, 18 – глины алевролитистые, 19 – глины (аргиллиты), 20 – аргиллиты высокоуглеродистые, 21 – углистые породы

Затем осуществлялось сравнение контролирующих перспективы нефтегазоносности тектонических, литолого-фациальных и геохимических параметров каждого расчетного участка с эталонными. В качестве таковых были выбраны и обоснованы следующие показатели: гипсометрия современного структурного плана, качество флюидоупоров, толщина коллекторов, нефтегазоносный потенциал нефтематеринских пород и степень интенсивности проявления катагенеза содержащегося в них органического вещества.

Отмеченные показатели являлись поправочными коэффициентами расчетных участков. Общие коэффициенты аналогий расчетных участков k_a , устанавливающий соотношение между плотностями начальных суммарных ресурсов углеводородов на эталонном $q_э$ и расчетном q_r участках вычисляется как произведение поправочных коэффициентов:

$$1. ka = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_n$$

Тогда, плотности начальных суммарных ресурсов углеводородов на расчетных участках равны:

$$2. qp = q_0 \cdot ka$$

Поправочные коэффициенты и коэффициенты аналогий расчетных участков, посредством которых производилась оценка перспектив нефтегазоносности батского резервуара, показаны в соответствующей таблицы.

Итоговые результаты выполненной количественной оценки перспектив нефтегазоносности батского резервуара Енисей-Хатангской и смежной территории Гыданской нефтегазоносных областей приведены на рис. 3.



Рис. 3. Карта перспектив нефтегазоносности батского регионального резервуара (пласты Ю2-Ю4) Енисей-Хатангской и смежной территории Гыданской НГО

1-3 границ: 1 – нефтегазоносных областей (НГО), 2 – распространения юрских отложений, 3 – распространения батского регионального резервуара; 4-8 тектонические элементы: 4 – Внешнего пояса, 5 – надпорядковых структур, 6 – структур 0 порядка, 7 – структур I порядка, 8 – структур II порядка; 9 – разрывные нарушения, 10 – месторождения газовые и газоконденсатные, 11-15 категории перспективных земель: 11 – перспективные земли II категории (уд. пл. 30-50 тыс. т УУВ/км²), 12 – среднеперспективные земли I категории (уд. пл. 20-30 тыс. т УУВ/км²), 13 – среднеперспективные земли II категории (уд. пл. 10-20 тыс. т УУВ/км²), 14 – земли пониженных перспектив (уд. пл. 5-10 тыс. т УУВ/км²), 15 – земли низких перспектив (уд. пл. 1-5 тыс. т УУВ/км²).

Результаты количественной оценки перспектив нефтегазоносности Батского резервуара

Батский резервуар имеет почти повсеместное распространение в пределах рассматриваемого региона. Лишь в окраинных его частях и на Волочанском мезовале его отложения выклиниваются (рис. 3). Начальные суммарные ресурсы УВ резервуара составляют 4587,28 млн т условных углеводородов (УУВ), из них газа – 4058,44 млрд м³ (88,47%) и конденсата – 528,84 млн т (11,53%). Плотность ресурсов УВ на территории региона составляет 19,76 тыс. т УУВ, в пределах Енисей-Хатангской и Гыданской НГО соответственно 18,96 и 35,18 тыс. т УУВ/км².

Районирование территории исследуемого региона по степени перспектив батского резервуара следующее. В его пределах выделяются пять

категорий земель, от перспективных II категории (уд. пл. 30-50 тыс. т УУВ/км²) до земель низких перспектив (уд. пл. 1-5 тыс. т УУВ/км²).

Перспективные земли II категории имеют ограниченное распространение, причем только на территории Гыданской НГО. Эти земли прогнозируются в пределах Среднемессояхского и Юрхаровского мезовалов (см. рис. 3).

Среднеперспективные земли I категории распространены в юго-восточной и центральной части Гыданской НГО, а также на небольшом участке смежной территории Енисей-Хатангской НГО. Среднеперспективные земли II категории широко распространены как в Енисей-Хатангской, так и Гыданской НГО. Они в виде широких полос простираются вдоль Таймырской складчатой области, а также Тунгусской синеклизы и Анабарской антеклизы Сибирской платформы. Кроме того, они прогнозируются в северо-восточной половине Балахнинско-Рассохинской гряды.

Земли пониженных и низких перспектив распространены на территории крупных отрицательных структур: Боганидско-Жданихинского, Беловско-Агапского и Эджанского желобов, а также наиболее прогнутой части Большехетской мегасинеклизы и северо-восточного окончания Северо-Сибирской мегамоноклизы.

Заключение

В качестве исходной геологической информации количественной оценки перспектив нефтегазоносности батского резервуара исследуемого региона были использованы следующие ранее опубликованные авторами настоящей статьи карты: структурная по кровле проницаемых комплексов резервуаров; вещественного состава и палеогеографическая проницаемого комплекса; прогноза толщин песчаников, коллекторов и оценки качества флюидоупора; генерации УВ и катагенетической превращенности органического вещества нефтематеринских отложений.

Количественная оценка перспектив нефтегазоносности батского резервуара осуществлена наиболее достоверным геологическим способом по удельным плотностям запасов УВ на единицу площади, который адекватно учитывает особенности геологического строения рассматриваемого региона.

В батском резервуаре исследуемого региона прогнозируется только газ и конденсат. Начальные суммарные ресурсы УВ его составляют 4587 млн т УУВ, из них газа – 4058,44 млрд м³ и конденсата – 528,84 млн т. Из них в Енисей-Хатангской и восточной части Гыданской НГО они соответственно равны: 2105,70 и 2481,59 млн т УУВ. Основная часть прогнозируемых ресурсов УВ (98,52 %) относится к прогнозным ресурсам и лишь 1,48 % - к промышленным запасам.

На территории региона распространены земли пяти категорий - от перспективных земель II категории (уд. пл. 30-50 тыс. т УУВ/км²) до земель низких перспектив (уд. пл. 1-5 тыс. т УУВ/км²). Наиболее перспективные земли прогнозируются в Гыданской НГО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фомин М.А. Анализ тектонического строения мезозойско-кайнозойского осадочного чехла Енисей-Хатангского регионального прогиба по опорным горизонтам и тектонические предпосылки его нефтегазоносности // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2011. – № 9. – С. 4-20.
2. Шемин Г.Г., Верниковский В.А., Первухина Н.В., Деев Е.В., Москвин В.И., Сапьяник В.В. Модели строения и условия формирования региональных резервуаров верхне-среднеюрских отложений Енисей-Хатангской и восточной части Гыданской нефтегазоносных областей // Геология нефти и газа. – 2020. – № 6. – С. 53-76
3. Шемин Г.Г. Региональные резервуары нефти и газа юрских отложений севера Западно-Сибирской провинции. Издательство СО РАН. – 2014. – 362 с.
4. Бостриков О.И., Ларичев А.И., Фомичев А.С. Геохимические аспекты изучения нижнесреднеюрских отложений Западно-Сибирской плиты в связи с оценкой их УВ потенциала // Нефтегазовая геология. Теория и практика. Электрон. науч. журнал. СПб.: ВНИГРИ. – 2011. – Т. 6. – № 3. [Электронный ресурс] URL: http://www.ngtp.ru/rub/1/31_2011.pdf
5. Аленин В.В., Батурин Ю.Н., Белонин М.Д. и др. Методическое руководство по количественной и экономической оценке ресурсов нефти, газа и конденсата. - М.: 2000. – 189 с.

REFERENCES

1. Fomin M.A. Analiz tektonicheskogo stroeniya mezozojsko-kajnozojskogo osadochnogo chekhla Enisej-Hatangского regional'nogo progiba po opornym gorizontam i tektonicheskie predposylki ego neftegazonosnosti // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij. – 2011. – № 9. – S. 4-20.
2. SHemin G.G., Vernikovskij V.A., Pervuhina N.V., Deev E.V., Moskvina V.I., Sap'yanik V.V. Modeli stroeniya i usloviya formirovaniya regional'nyh rezervuarov verhne-sredneyurskikh otlozhenij Enisej-Hatangskoj i vostochnoj chasti Gydanskoj neftegazonosnyh oblastej // Geologiya nefiti i gaza. – 2020. – № 6. – S. 53-76
3. SHemin G.G. Regional'nye rezervuary nefiti i gaza yurskikh otlozhenij severa Zapadno-Sibirskoj provincii. Izdatel'stvo SO RAN. – 2014. – 362 s.
4. Bostrikov O.I., Larichev A.I., Fomichev A.S. Geohimicheskie aspekty izucheniya nizhnesredneyurskikh otlozhenij Zapadno-Sibirskoj plity v svyazi s ocenкой ih UV potenciala // Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika. Elektron. nauch. zhurnal. SPb.: VNIGRI. – 2011. – Т. 6. – № 3. [Elektronnyj resurs] URL: http://www.ngtp.ru/rub/1/31_2011.pdf
5. Alenin V.V., Baturin YU.N., Belonin M.D. i dr. Metodicheskoe rukovodstvo po kolichestvennoj i ekonomicheskoy ocenke resursov nefiti, gaza i kondensata. - M.: 2000. – 189 s.

© Г. Г. Шемин, П. А. Глазырин, 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ОБРАЩЕНИЯ ДИСПЕРСИОННЫХ КРИВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ПРИ ПОМОЩИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Александр Викторович Яблоков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, e-mail: yablokovav@ipgg.sbras.ru; Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, младший научный сотрудник.

Александр Сергеевич Сердюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к.ф.-м.н, старший научный сотрудник, e-mail: serdyukovas@ipgg.sbras.ru; Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник.

В работе обсуждаются результаты использования адаптированного алгоритма семплирования методом Монте-Карло для оценки области неоднозначности обращения синтетических дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн с применением искусственных нейронных сетей. Обоснована целесообразность использования рассмотренного алгоритма для вычисления вероятностной оценки результатов решения обратной задачи в методе многоканального анализа поверхностных волн.

Ключевые слова: инверсия, искусственная нейронная сеть, неоднозначность решения обратной задачи сейсмоки

STUDY OF UNCERTAINTY OF THE INVERSION OF DISPERSION CURVES OF SURFACE WAVES USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Alexandr V. Yablokov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, e-mail: yablokovav@ipgg.sbras.ru; Chinakal Institute of Mining SB RAS, Russia 630090, Krasnyi propect 54, Junior Researcher. Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Junior Researcher

Aleksander S. Serdyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Researcher, e-mail: serdyukovas@ipgg.sbras.ru; Institute of Mining SB RAS, Russia 630090, Krasnyi propect 54, Junior Researcher

The results of using an adapted sampling algorithm by the Monte Carlo method to estimate the ambiguity domain of the inversion of synthetic dispersion curves of the phase velocities of surface waves using artificial neural networks are discussed in the paper. The expediency of using the considered algorithm for calculating a probabilistic estimate of the results of the inverse problem solution in the method of multichannel analysis of surface waves has been confirmed.

Keywords: inversion, artificial neural network, uncertainty of the seismic inversion problem

Введение

В работе рассматривается метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) на предмет оценки области неоднозначности решения обратной задачи при помощи искусственных нейронных сетей (ИНС). Метод MASW активно применяется для изучения скоростного строения верхней части геологического разреза [1], а также входит в перечень обязательных инструментов сейсмического микрорайонирования в РФ [2]. Актуальны исследования методом MASW выполняемые в классе слоистых моделей, т.е. когда одновременно восстанавливаются скорости S-волны и мощности каждого слоя [3]. Для решения обратной задачи метода MASW в классе слоистых скоростных моделей используются методы глобального поиска [4, 5] и ИНС [6, 7]. Преимущества использования ИНС – более высокая скорость вычисления и отсутствие необходимости настройки параметров оптимизации, в отличие от методов глобальной оптимизации.

Обратная задача метода MASW, обращение дисперсионных кривых зависимостей фазовых и/или групповых скоростей поверхностной волны от частоты, некорректна и неоднозначна [8]. При восстановлении большого числа неизвестных параметров восстанавливаемой скоростной модели неоднозначность обратной задачи усиливается, и задача поиска истинного решения имеет вероятностный характер. Это приводит к необходимости оценки области неоднозначности решения обратной задачи.

Для корректной оценки области неоднозначности решения обратной задачи сейсмоки необходимо спроецировать на пространство скоростных моделей как шум в данных, так и ошибки, вводимые обратным оператором. За счёт высокой скорости вычислений инверсии с применением ИНС целесообразно использовать подходы на основе алгоритма Монте-Карло с Марковскими цепями [9]. Необходимо учитывать особенности ввода шума в данные при рассмотрении задачи обращения дисперсионных кривых поверхностных волн. В частности, некорректно использование Гауссовского распределения вероятности шума с постоянным стандартным отклонением. На практике, спектральное размывание максимумов энергии дисперсионных кривых, а, следовательно, и вероятность их ошибочного пикирования, усиливается с уменьшением частоты. Отметим также, что распределение вероятности шума в дисперсионной кривой поверхностной волны является непараметрическим (не Гауссовым), поскольку регулярные и случайные помехи вводят смещения в максимумы энергии целевой фундаментальной моды [10].

Авторам настоящего исследования неизвестны работы по оценке области неоднозначности алгоритма инверсии дисперсионных кривых поверхностных волн с использованием многослойной полносвязной ИНС. В настоящей работе приведены результаты применения алгоритма семплирования методом Монте-Карло [9] адаптированного к решению данной задачи.

Методы

Рассматриваемый алгоритм инверсии дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн состоит из следующих основных этапов: 1 – осреднение дисперсионных кривых, полученных в процессе спектрального анализа; 2

– оценка диапазонов параметров скоростной модели; 3 – расчёт набора обучающих данных; 4 – обучение искусственной нейронной сети (ИНС) и сохранение весов; 5 – применение сохранённых весов ИНС для инверсии дисперсионных кривых. Алгоритм инверсии подробно изложен в статье [7].

Для формирования обучающей выборки в пределах оценённых диапазонов возможных решений равномерно выбираются значения скорости S-волны ($V_S = [V_{S,1}, V_{S,2}, \dots, V_{S,l}]$, где l – число слоёв восстанавливаемой модели) и мощности ($\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_{l-1}]$). Для каждой пары векторов V_S и $\mathbf{h}$ численно решается прямая задача и вычисляются значения дисперсионной кривой фазовой скорости ($V_{R,\text{расчётная}} = [V_{R,1}, V_{R,2}, \dots, V_{R,m}]$, где m – число отсчётов по частоте). $V_{R,\text{расчётная}}$ – формирует входной слой ИНС. Выходным слоем ИНС является конкатенация $V_S \cup \mathbf{h}$. Оптимальным в смысле приемлемых точности инверсии и скорости обучения ИНС является $s = 250000$ примеров $V_S \cup \mathbf{h} \in \mathbf{M}$ ($\mathbf{M}$ имеет размерность $s \times (2l - 1)$, где l – число слоёв скоростной модели) и соответствующих им $V_{R,\text{расчётная}} \in \mathbf{D}$ ($\mathbf{D}$ имеет размерность $s \times m$). В процессе итерационного обучения ИНС за счёт минимизации функционала $MAE(\mathbf{W} \cdot [V_S \cup \mathbf{h}] - V_{R,\text{расчётная}}) \rightarrow \min$, где MAE – средняя абсолютная ошибка (функционал невязки), подбираются веса ИНС ($\mathbf{W}$). Подобранные $\mathbf{W}$ являются обратным оператором, который отображает пространство извлечённых фазовых скоростей в пространство параметров скоростной модели: $\mathbf{W} \cdot \mathbf{D} = \mathbf{M}$. Алгоритм подбора гиперпараметров архитектуры ИНС выходит за рамки данной статьи.

Для оценки области неоднозначности обращения дисперсионных кривых фазовых скоростей с помощью ИНС адаптируется и применяется алгоритм семплирования методом Монте-Карло, описанный в работе [9]. Так, для генерации шума, вводимого в дисперсионные кривые, используется Гауссово распределение с частотно-зависимым стандартным отклонением.

Результаты экспериментов

Детально рассмотрим алгоритм оценки области неоднозначности на примере инверсии синтетической дисперсионной кривой фазовой скорости, вычисленной для горизонтально-слоистой скоростной модели, упругие параметры которой приведены в табл. 1.

Таблица 1

Упругие параметры скоростной модели

Номер слоя	V_S (м/с)	h (м)	V_P (м/с)	ρ (кг/м ³)	Оценённые диапазоны возможных значений	
					V_S (м/с)	h (м)
1	300	2.5	624	1900	210-410	1.2-3.7
2	500	8	1040	1900	428-628	1.2-14.9
3	800	∞	1665	1900	671-871	∞

Для определения статистических характеристик распределения шума, вводимого в дисперсионную кривую фазовых скоростей необходимо рассмотреть волновые формы и V - f спектр рассматриваемой дисперсионной кривой. Волновые формы были вычислены на различном удалении от источника с использованием алгоритма, описанного в работе [11], и сгруппированы в сейсмограмму ОТВ, которая содержит только фундаментальную моду волны Релея (рис. 1а). V - f спектр (рис. 1б) был получен с использованием алгоритма, описанного в работе [12]. Извлечённая из V - f спектра дисперсионная кривая фазовой скорости ($V_{R, \text{извлечённая}} = [V_{R,1}, V_{R,2}, \dots, V_{R,m}]$, где m – число отсчётов по частоте) обозначена красными точками на рис. 1б.

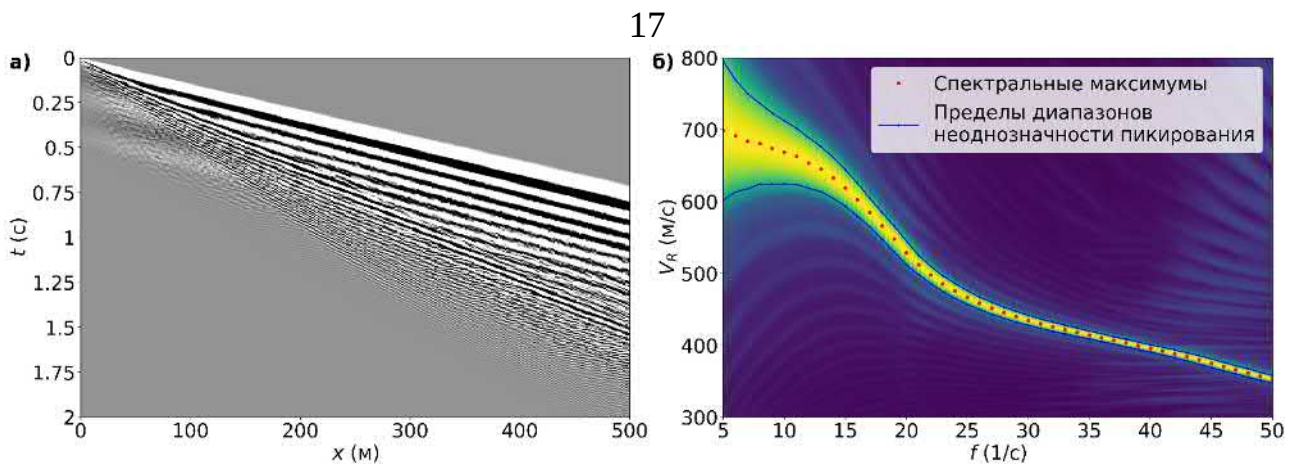


Рис. 1. Синтетические данные:

а) сейсмограмма, содержащая только фундаментальную моду волны Релея и б) её V - f спектр.

В виду того, что спектральное размывание максимумов энергии уменьшается с увеличением частоты, стандартное отклонение (σ) шума, вводимого в значения фазовой скорости должно быть переменным по частоте, т.е. $\sigma_{\text{шума}} = \sigma_{\text{шума}}(f)$. Примем такие значения $V_{R, \text{извлечённая}}(f)$ за пределы неоднозначности пикирования (синяя кривая на рис. 1б), где амплитуда поверхностной волны уменьшилась в два раза относительно максимума на фиксированной частоте. Допустим, что распределение шума на каждой частоте симметрично относительно максимума, т.е. математическое ожидание $\mu_{\text{шума}}(f) = 0$. Тогда распределение шума определяется Гауссовым распределением на каждой частоте как $\mathcal{N}(0, \sigma_{\text{шума}}(f))$. Объем выборки $\mathcal{N}(0, \sigma_{\text{шума}}(f))$ обозначим u и примем $u = 10000$ отсчётов на каждой частоте.

В ходе применения алгоритма, описанного в [7], оцениваются диапазоны возможных значений V_S и h (столбцы 6-7 таблицы 1), рассчитывается набор тренировочных данных $V_S \cup h \in M$ и соответствующие им дисперсионные кривые $V_{R, \text{рассчётная}} \in D$, обучается ИНС и сохраняются веса (W). W применяются для обобщения всех кривых из D : $W[D] = \bar{M}$. Далее рассчитываются ошибки $E = M -$

$\bar{M}$. Вычисленные значения $\mu_{\text{ошибки}}$ и $\sigma_{\text{ошибки}}$ из E , соответствующих распределениям ошибки восстановления V_S и h , используются для определения распределения ошибок обратного оператора: $\mathcal{N}(\mu_{\text{ошибки}}, \sigma_{\text{ошибки}})$ (рис. 2). Объем выборки $\mathcal{N}(\mu_{\text{ошибки}}, \sigma_{\text{ошибки}})$ также примем равным u ($u = 10000$ отсчётов) для V_S и h в каждом слое. Значения $\mu_{\text{ошибки}}$ близки к нулю во всех случаях.

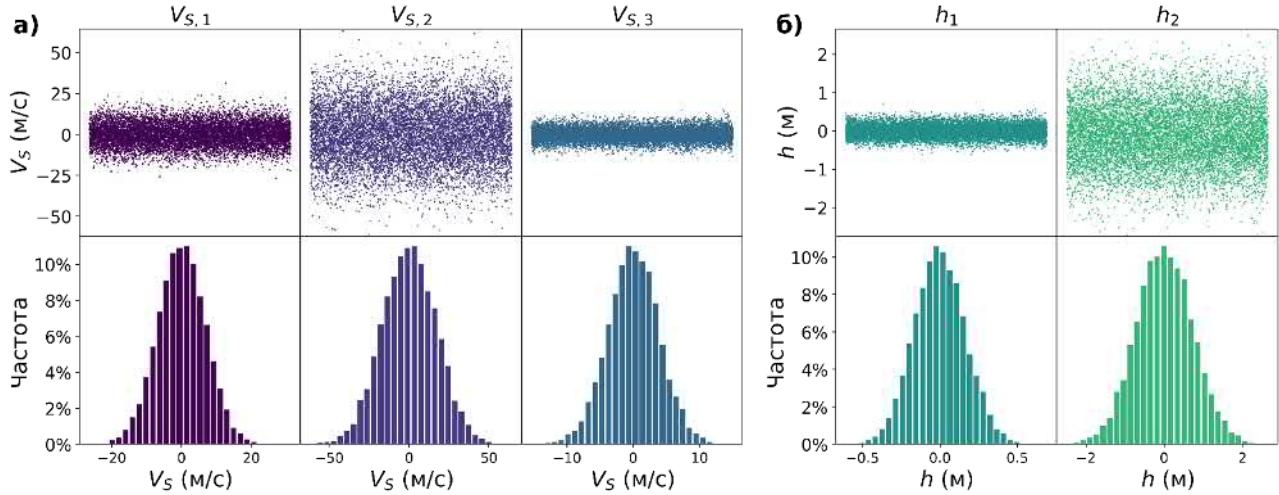


Рис. 2. Гистограммы распределений Гауссовского шума, полученного по статистическим характеристикам распределений ошибок восстановления набора обучающих данных:

а) скорости S-волны и б) мощности каждого слоя

Согласно алгоритму [9], W применяются для обращения $V_{R,\text{извлечённая}}(f)$: $W[V_{R,\text{извлечённая}}(f)] = \bar{m}$ и рассчитывается прямая задача $F[\bar{m}] = V_{R,\text{восстановленная}}(f)$. Далее для всех $n(f) \in \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{шума}}(f))$ вводится шум в $D_n = V_{R,\text{восстановленная}}(f) + n(f)$. D_n имеет размерность $t \times u$. Выполняется инверсия: $W[D_n] = \bar{M}_n$. Далее для всех $n \in \mathcal{N}(\mu_{\text{ошибки}}, \sigma_{\text{ошибки}})$ вводятся ошибки обратного оператора в $\bar{M}_n^{\text{искомое}} = \bar{M}_n + n$. $\bar{M}_n^{\text{искомое}}$ имеет размерность $(2l - 1) \times u$. $\bar{M}_n^{\text{искомое}}$ является распределением восстановленных значений V_S и h путём обращения $V_{R,\text{извлечённая}}(f)$ с учётом ввода случайного шума в $V_{R,\text{извлечённая}}(f)$ и ввода ошибок обратного оператора в V_S и h . По значениям $\bar{M}_n^{\text{искомое}}$ рассчитывается прямая задача $F[\bar{M}_n^{\text{искомое}}] = D_n^{\text{искомое}}$. Распределения восстановленных параметров из $\bar{M}_n^{\text{искомое}}$ и истинная скоростная модель (красная кривая) изображены на рис. 3а в виде одномерных скоростных моделей. Цветовой палитрой отображена невязка между $V_{R,\text{извлечённая}}(f)$ и $D_n^{\text{искомое}}$ (меньшие значения более яркие). $D_n^{\text{искомое}}$ и $V_{R,\text{извлечённая}}(f)$ (красная кривая) изображены на рис. 3б.

По относительной разнице между истинным решением и минимальным $\bar{M}_n^{\text{искомое}}$, истинным решением и максимальным $\bar{M}_n^{\text{искомое}}$ определяется область неоднозначности восстановления параметров скоростной модели: $V_{S,1} = [-46\%; 40\%]$, $V_{S,2} = [-23\%; 44\%]$, $V_{S,3} = [-7\%; 11\%]$, $h_1 = [-59\%; 35\%]$, $h_2 = [-29\%; 63\%]$.

Время применения сохранённых весов ИНС $t_w = 0.3$ с для обращения всех 10000 примеров, время подбора весов ИНС $t_{\text{обучения}} = 630$ с.

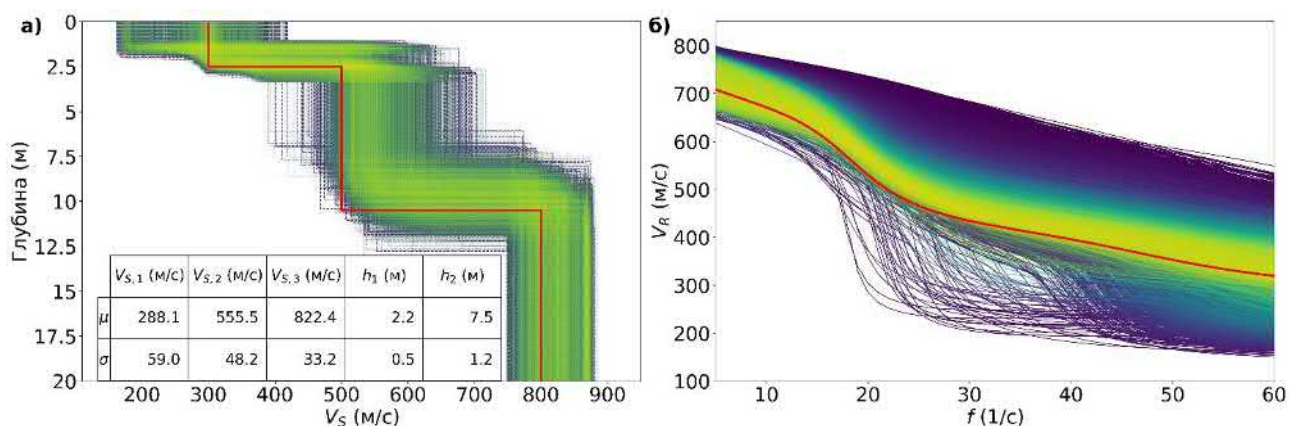


Рис. 3. Результирующие распределения восстановленных а) скоростных моделей и б) рассчитанных по ним дисперсионных кривых. Красным цветом нанесена истинная скоростная модель и извлечённая дисперсионная кривая

Обсуждение результатов

Дальнейшие пути исследования сосредоточены на подборе и анализе непараметрических распределений шума, статистические характеристики которых могут быть связаны не только с частотно зависимым спектральным размытием, но с закономерностями перетекания энергии на V - f спектре при наличии регулярных и случайных помех в сейсмических данных.

Перспективны поиски направлений повышения точности обучения и применения ИНС для инверсии, в частности рассмотрение одновременной инверсии дисперсионных кривых фазовой и групповой скорости, использование мод высшего порядка или всего спектрального изображения.

Заключение

В работе приведены результаты оценки области неоднозначности обращения дисперсионных кривых поверхностных волн с применением ИНС с использованием адаптированного к решению данной задачи алгоритма семплирования методом Монте-Карло. Основным преимуществом использования ИНС для инверсии дисперсионных кривых является высокая скорость вычисления при апроксимации на большом объёме данных, следовательно, целесообразно использовать описанную в работе процедуру оценки неоднозначности решения при обработке реальных данных для вычисления вероятностной оценки результатов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-77-10023.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 1. Park C. B., Miller R. D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. – 1999. – V. 64. – №. 3. – P. 800-808.
2. 2. СП 283. 1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования.
3. 3. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock / R.D. Miller [et al.] // *The Leading Edge*. – 1999. – V. 18. – №. 12. – P. 1392-1396.
4. 4. Cox B. R., Teague D. P. Layering ratios: a systematic approach to the inversion of surface wave data in the absence of a priori information // *Geophysical Journal International*. – 2016. – V. 207. – №. 1. – P. 422-438.
5. 5. Grey wolf optimizer for parameter estimation in surface waves / X. Song [et al.] // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – V. 75. – P. 147-157.
6. 6. Çaylak Ç., Kaftan İ. Determination of near-surface structures from multi-channel surface wave data using multi-layer perceptron neural network (MLPNN) algorithm // *Acta Geophysica*. – 2014. – V. 62. – №. 6. – P. 1310-1327.
7. 7. Yablokov A., Serdyukov A. Inversion of Surface Waves Dispersion Curves Using Artificial Neural Network // 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – V. 2020. – №. 1. – P. 1-5.
8. 8. Foti S., Lai C.G., Rix G.J., Strobbia C. Surface wave methods for near-surface site characterization / Boca Raton, 2014. – 482 p.
9. 9. Aleardi M., Salusti A. Elastic pre-stack inversion through Discrete Cosine Transform reparameterization and Convolutional Neural Networks // *Geophysics*, 2021. – V. 86. – №. 1. – P. 1JF-V89.
10. 10. Hayashi K., Suzuki H. CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data // *Exploration Geophysics*. – 2004. – V. 35. – №. 1. – P. 7-13.
11. 11. Gaždová R., Vilhelm J. DISECA—A Matlab code for dispersive waveform calculations // *Computers and Geotechnics*. – 2011. – V. 38. – №. 4. – P. 526-531.
12. 12. Serdyukov A.S., Yablokov A.V., Duchkov A.A., Azarov A.A., Baranov V.D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // *Geophysics*. – 2019. – T. 84. – № 1. – C. A19-A24.

REFERENCES

1. Park C. B., Miller R. D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. – 1999. – V. 64. – №. 3. – P. 800-808.
2. SP 283. 1325800.2016. Ob"ekty stroitel'nye povyshennoj otvetstvennosti. Pravila sejsmicheskogo mikrorajonirovaniya.
3. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock / R.D. Miller [et al.] // *The Leading Edge*. – 1999. – V. 18. – №. 12. – P. 1392-1396.
4. Cox B. R., Teague D. P. Layering ratios: a systematic approach to the inversion of surface wave data in the absence of a priori information // *Geophysical Journal International*. – 2016. – V. 207. – №. 1. – P. 422-438.
5. Grey wolf optimizer for parameter estimation in surface waves / X. Song [et al.] // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – V. 75. – P. 147-157.

6. Çaylak Ç., Kaftan İ. Determination of near-surface structures from multi-channel surface wave data using multi-layer perceptron neural network (MLPNN) algorithm // *Acta Geophysica*. – 2014. – V. 62. – №. 6. – P. 1310-1327.
7. Yablokov A., Serdyukov A. Inversion of Surface Waves Dispersion Curves Using Artificial Neural Network // 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – V. 2020. – №. 1. – P. 1-5.
8. Foti S., Lai C.G., Rix G.J., Strobbia C. Surface wave methods for near-surface site characterization / Boca Raton, 2014. – 482 p.
9. Aleardi M., Salusti A. Elastic pre-stack inversion through Discrete Cosine Transform reparameterization and Convolutional Neural Networks // *Geophysics*, 2021. – V. 86. – №. 1. – P. 1JF-V89.
10. Hayashi K., Suzuki H. CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data // *Exploration Geophysics*. – 2004. – V. 35. – №. 1. – P. 7-13.
11. Gaždová R., Vilhelm J. DISECA—A Matlab code for dispersive waveform calculations // *Computers and Geotechnics*. – 2011. – V. 38. – №. 4. – P. 526-531.
12. Serdyukov A.S., Yablokov A.V., Duchkov A.A., Azarov A.A., Baranov V.D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // *Geophysics*. – 2019. – T. 84. – № 1. – S. A19-A24.

© A. B. Яблоков, А. С. Сердюков, 2021

ИЗУЧЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ ВЧР НА ПОЛИГОНЕ КЛЮЧИ МЕТОДОМ ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

Сергей Владимирович Яскевич

ИЗК СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, e-mail: YaskevichSV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, старший преподаватель кафедры геофизики.

Дергач Петр Александрович

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга 3., научный сотрудник, e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

Чернышов Глеб Станиславович

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга 3., младший научный сотрудник, e-mail: ChernishevGS@ipgg.sbras.ru

Карпухин Виктор Иванович

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга 3., лаборант, e-mail: Karpukhinvi@ipgg.sbras.ru

Дучков Антон Альбертович

Новосибирский государственный университет, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, доцент, e-mail: Duchkovaa@ipgg.sbras.ru

Метод преломленных волн часто используется при малоглубинных исследованиях. При этом, часто используется достаточно ограниченная система наблюдений в виде однонаправленных профилей. В нашей работе мы выбрали объект исследования с известной анизотропией верхней частью разреза в районе полигона ключи. Результаты метода преломленных волн предположительно показывают анизотропию одного из слоев среды, азимутальная анизотропия которого приводила к тому, что преломление на его кровле перестает проявляться в первых вступлениях, для направления профиля вдоль оси симметрии НТИ слоя среды.

Ключевые слова: анизотропия, обработка данных, скоростная модель, преломленные волны

STUDY OF NEAR-SURFACE ANISOTROPY FOR THE KLUCHI CITE BY REFRACTED WAVES SUTVEYING

Sergey V. Yaskevich

IEC SB RAS, 664033, Russia, Irkutsk, 3, 128 Lermontova St. 128., PhD, Senior Researcher, e-mail: YaskevichSV@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Senior Teacher.

Petr A. Dergach

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher: DergachPA@ipgg.sbras.ru

Gleb S. Chernyshov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, e-mail: ChernishevGS@ipgg.sbras.ru

Viktor I. Karpukhin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Assistant, e-mail: Karpukhinvi@ipgg.sbras.ru

Anton A. Duchkov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Associate Professor, e-mail: duchkovaa@ipgg.sbras.ru

Refracted waves are often used in near-surface exploration. A limited observation system in the form of unidirectional profiles is often used. In our work, we selected an object with a known anisotropic upper part of the cross-section. The results of refracted waves processing show the anisotropy of one of the layers of the medium, the azimuthal anisotropy of which led to the observation that the refraction on its top ceases from the first arrivals, for the direction of the profile aligned with the axis of symmetry of the azimuthally anisotropic layer.

Keywords: microseismic monitoring, data processing, absolute time, velocity model

Введение

В нашей работе верхняя часть разреза (ВЧР) Земли изучается с помощью преломленных волн. Метод преломленных волн подробно описан в (Palmer, 1980) [1], он основан на том, что сейсмическая волна, распространяясь из слоя с меньшей скоростью в слой с более высокой скоростью при критическом падении начинает распространяться вблизи границы со скоростью более высокоскоростного слоя. Успешное применение метода основано на наблюдении, что скорость продольных волн часто растет с глубиной, иногда этот рост представлен резкими скачками на границах между слоями. Большое количество методов обработки основаны на определении времен вступления волн. Здесь используются две основные концепции: томографические алгоритмы (Zhang and Toksöz, 1998) [3] и метод t_0' Hagedoorn (1959) [4], а также его расширенная версия GRM (Palmer, 1980)[2]. Некоторые подходы предполагают использование GRM для построения начальной скоростной модели, а затем применяется томография на рефрагированных волнах (Palmer, 2015) [5].

Чаще всего при использовании метода преломленных волн среда считается изотропной или VTI. Самой ранней статьей, рассматривающей анизотропию ВЧР, была статья Helbig (1964) [6], в которой использовался графический подход, чтобы показать влияние анизотропии на результаты обработки го профиля. Азимутальная сейсмическая анизотропия также учитывалась при исследованиях глубинного строения Земли (мантии) (Shearer and Orcutt, 1986) [7]. Leslie and Lawton (1999) [8] показывают, что метод t_0' может быть использован для измерения азимутальной анизотропии скоростей продольных волн. Для нефтегазоносных пластов преломленные волны оказались также информативными при прогнозировании ориентации трещин, когда пласт-коллектор представлен

высокоскоростным слоем (Tura et al., 2015) [9]. Азимутальное исследование с использованием преломленных волн также проводится для образцов в рамках физического эксперимента (Tseng et al., 2018) [10].

В случае определенного отношения скоростей Р-волн в слоистых средах может случиться, что в направлении высокой скорости Р-волны в нижнем (азимутально-анизотропном) слое, в данных наблюдается преломленная волна, в то время как в направлении низкой скорости Р-волны она не наблюдается (потому что контраст скорости с верхним слоем становится небольшим). В этой статье мы предоставляем результаты моделирования, которые показывают возможность такого поведения и представляем результаты полевых наблюдений, которые мы пытаемся этим объяснить.

Метод

Наша работа подразделяется на две части: моделирование и обработка полевых данных. При моделировании времена пробега рассчитываются с использованием двухточечного алгоритма трассировки лучей, учитывающего анизотропию среды. Обсуждение метода можно найти в (Cerveny, 2005) [11]. В нашей статье при работе с реальными данными используются два метода обработки: обычный метод t_0' Nagedoorn (1959) [4]; 2D томография (Кулаков и др., 2010)[12]. Для томографии мы рассчитали времена прихода головных волн для модели с реальной топографией эксперимента. Для тестирования метода «Плюс-Минус» на модельных анизотропных данных мы рассчитывали синтетику без топографии (чтобы избежать связанные с топографией неправильные интерпретации томографов волн).

Результаты обработки полевых данных

Исследуемый район характеризуется крутопадающими сланцами в непосредственной близости к поверхности наблюдений. В качестве априорной информации о скоростном разрезе были использованы результаты вертикального сейсмического профилирования, полученные в соседней скважине (300 м к северу от исследуемой территории). Результаты ВСП показывают многослойную скоростную модель с двумя выдержанными по скорости слоями в верхней части разреза со скоростями Р-волн около 3 и 5 км/с. Было обнаружено, что верхний из этих двух слоев обладает существенной сейсмической анизотропией. Таким образом, как априорную информацию мы можем использовать данные об азимутальной анизотропии для слоя 3 км / с.

Система наблюдений показана на рис. 1, наблюдаемая асимметрия вызвана особенностями локального рельефа, но мы попытались предоставить самые длинные профили, которые возможны на данном участке.

Результаты обработки полевых данных для профилей 1 и 3 (см. Рис. 1) показаны на рис. 2. В дополнение к высокоскоростным слоям (которые выделяются на ВСП) выделяются еще 2 вышележащих слоя со скоростями продольных волн 0.4 и 1.7 км/с, которые мы ассоциируем с грунтом, ненасыщенным и

насыщенным водой. Для преломления от кровли слоя 1.7 км/с в точке пересечения профилей наблюдаются одинаковые определяемые глубины границ и близкие скорости для всех профилей. Следующие границы, наблюдаемые для профилей 1 и 3, по нашему мнению, происходят от преломлений на границах разных слоев. Для профиля 3 по второй головной волне определяется скорость около 4.7 км/с, а для профиля 1 скорость по второй головной волне около 3 км/с. Соответственно для профиля 1 мы предполагаем, что найденная граница отвечает кровле 3-го слоя (3 км/с), для профиля 3 - вторая найденная граница, отвечает кровле 4-го слоя (5 км/с). При этом кровля (3 км/с) слоя пропускается, так как направление профиля 3 близко к направлению оси симметрии скорость продольной волны за счет азимутальной анизотропии снижается, и приближается к скорости перекрывающей толщи. Для профиля 3 кровля 4 слоя недостаточно глубока, однако это объяснить неверной оценкой глубины, связанной с пропущенным 3-м слоем.

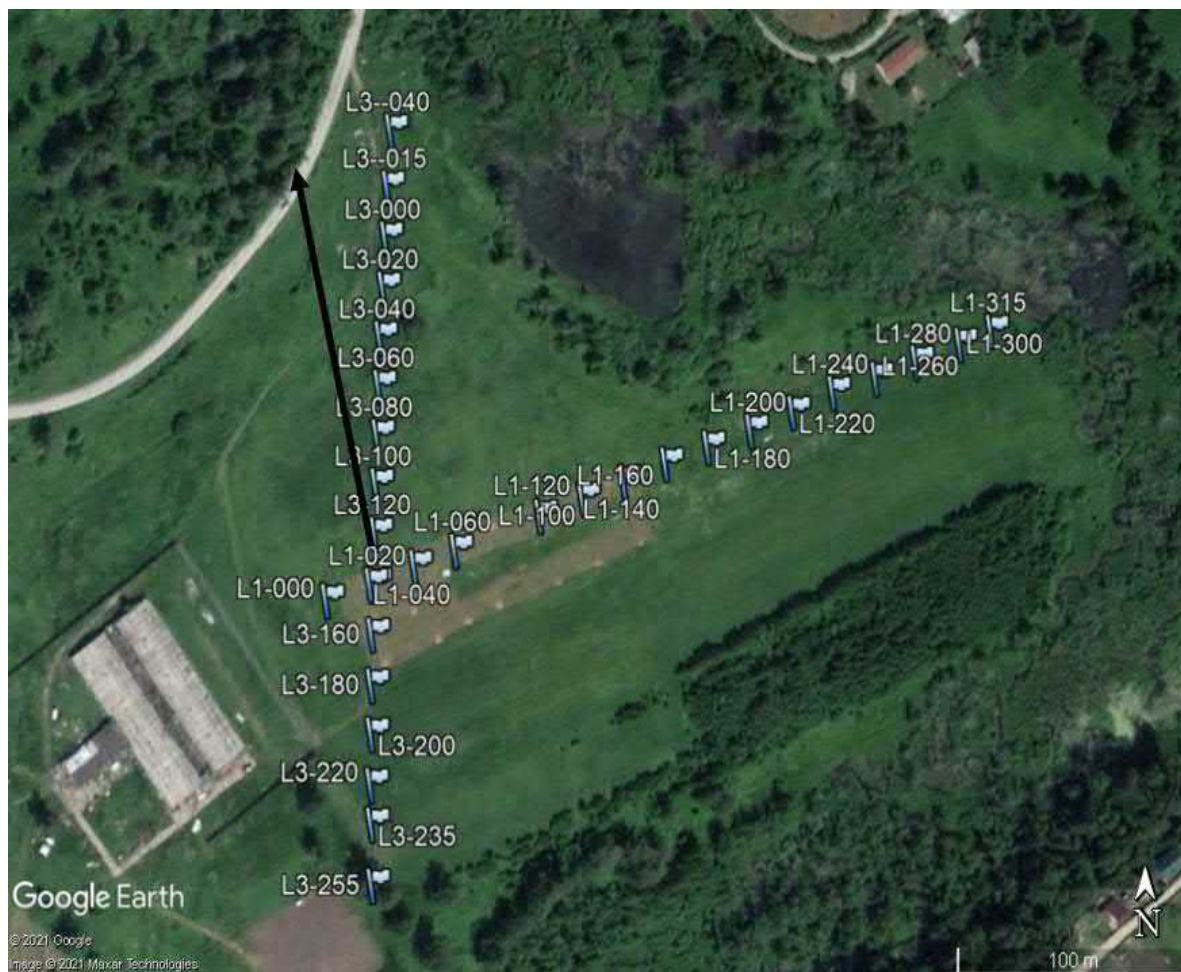


Рис. 1 Схематическая геометрия системы наблюдений: маркеры в форме флажков обозначают пунктам ПВ (L1 для профиля 1, L3 для профиля 3). Черная стрелка показывает направление – ортогональное направлению быстрой поперечной волны из ВСП.

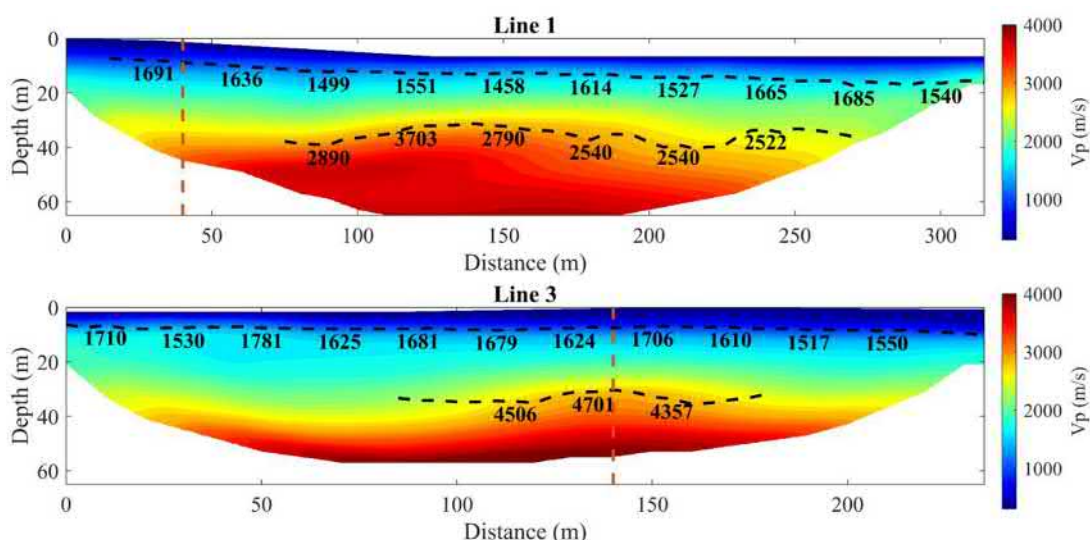


Рис. 2 Скоростные модели, полученные по полевым данным для профилей 1, 3. Штриховые линии и соответствующие скорости показывают границы, полученные методом t_0' . Вертикальная пунктирная линия показывает точку, в которой профили 1 и 3 пересекаются.

Другое объяснение может заключаться в том, что наблюдаемая граница отмечает кровлю одного и того же слоя для профилей 1-3, а направление высокой скорости будет близко к направлению профиля 1, это объяснение не поддерживается ни данными ВСП ни данными вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), из-за этого – мы это объяснение отклоняем. Далее мы проверяем основную интерпретацию с использованием синтетических времен пробега.

Результаты обработки синтетических данных

Здесь мы рассмотрели четырехслойную модель для расчета синтетики, основным критерием для модели было соответствие данным ВСП и наблюдаемым сейсмическим данным. 1-й слой соответствует мягким осадкам с $V_P = 0.3$ км/с, второй слой соответствует водонасыщенным изотропным осадкам с $V_P = 1.7$ км/с, третий слой считается сильно анизотропным (НТИ) с $V_{P0} = 2.2$ км/с (скорость Р-волны вдоль оси симметрии), $\varepsilon = 0.5$ (что соответственно приведет к скорости продольной волны 3.3 км/с в плоскости симметрии), $\delta = 0.0$. Такая сильная анизотропия возможна для сланцев (Vernik and Liu, 1997; Yaskevich et al., 2015) [12, 13], азимут оси симметрии составляет 120° (от оси X, что также соответствует наблюдениям ВСП), четвертый слой изотропен с $V_P = 4.6$ км/с. Мощности 1 - 3 слоев составляют 7.5, и 25 метров соответственно, 4-й слой имеет бесконечную мощность. Границы между слоями модели являются плоскими.

Синтетические времена пробега (соответствующие головным волнам) показаны на рис. 3 Одно существенное различие очевидно: в направлении профиля 1 наблюдаются три головные волны, а в направлении профиля 3 - только две преломленные волны могут быть интерпретированы из анализа годографа первых вступлений (см. рис. 3). Результаты обработки методом t_0' для обеих линий показаны на

рис. 3: 1-я граница на различных профилях совпадает, небольшая кривизна, которую мы связываем с неправильной интерпретацией годографа первых вступлений в нескольких точках. Глубина второй границы определяется для профиля 1, ее глубина оказалась на 5 м глубже, чем она задается в модели. Мы связываем это с определенной геометрией лучей, вызванной азимутальной анизотропией модели. Лучи для предложенной модели не находятся в вертикальной плоскости, а значительно выходят из нее (см. Рис. 3). Первые вступления для профиля 3 не позволяют получить геометрию второй границы из-за низкоскоростного контраста в направлении оси симметрии слоя НТІ (2.2 км/с против 1.7 км/с) и раннего выхода головной волны от преломления на 3 границе в первые вступления (сразу после 1-й головной волны). Так как мы знаем правильную интерпретацию волн, на рис. 3 нет пунктирной желтой линии, и вторая головная волна была правильно интерпретирована как преломление на кровле 4-го слоя. Глубина 3-й границы в этом случае существенно недооценивается, и эта проблема, по-видимому, является обычной для традиционных методов, когда в данных отсутствует одна из преломленных волн. В противном случае - если мы не используем наши знания о модели (что является нормальным при обработке полевых данных), эта граница (фиолетовая на рис. 3) становится второй границей модели (желтая). В этом случае глубина второй границы становится значительно завышенной (на 20 м глубже чем есть). Таким образом, нам кажется, что результаты обработки синтетических данных частично подтверждают нашу интерпретацию полевого эксперимента.

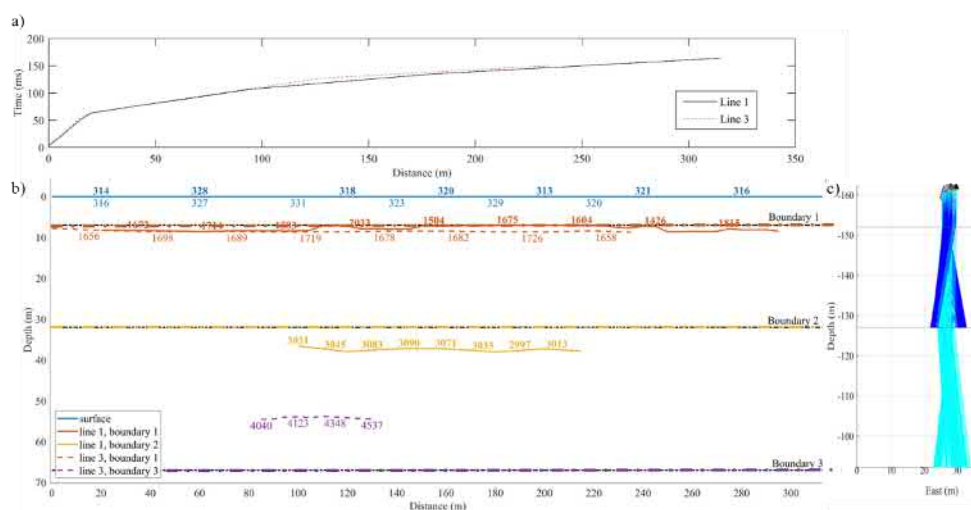


Рис. 3. На рисунке **a)** показаны первые вступления для линий 1 и 3. На рисунке **b)** показаны скоростные модели, полученные по синтетическим данным с помощью метода «Плюс-минус» (линия 1 и линия 3), и геометрия лучей для 2-й и 3-й границ (рисунок **c)**. Сплошные линии соответствуют результатам для профиля 1, пунктирные линии – для профиля 3. Штрих-пунктирные линии соответствуют реальной геометрии границ. Справа показана проекция лучей для Линии 3 на вертикальную плоскость Восток-Глубина, лучи для головной границы от 2 границы показаны синим цветом, а для границы 3 показаны голубым цветом

Выводы

Методы, основанные на обработке преломленных волн, часто используются для изучения строения верхней части разреза. Известно, что они обладают неопределенностями для оценки геометрии и свойств неоднородных сред, обратная задача имеет существенную неединственность. Анизотропия редко рассматривается как источник этой неединственности. В нашей работе мы показываем, что азимутальная анизотропия модели может влиять на обработку и интерпретацию полевых данных преломленных волн. При обработке синтетических данных мы показываем, что азимутальная анизотропия может привести к недооценке или завышению глубины границ. Таким образом, мы предполагаем, что в районах, где известна анизотропия, определенные глубины должны быть проверены с различными по азимуту профилями.

Неоднозначность достигнутых результатов также может быть уменьшена за счет использования поперечных волн и, в частности, анализа расщепления поперечных волн - мы планируем продолжить наши работы в том же месте с инициированием поперечных волн и записями ЗС.

Работа частично поддержана проектом фундаментальных исследований 0331-2019-0009.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cerveny V. Seismic ray theory. Cambridge university press. – 2005.
2. Hagedoorn J. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections // Geophysical prospecting – 1959. – 7(2). – P.58–182.
3. Helbig K. Refraction seismics with an anisotropic overburden: a graphical method of interpretation // Geophysical Prospecting. – 1964. – 12(4). – P.383–396.
4. Koulakov I., Stupina T., Kopp H. Creating realistic models based on combined forward modeling and tomographic inversion of seismic profiling data // Geophysics. – 2010. – 75(3). – B115–B136.
5. Leslie J.M., Lawton D.C. A refraction-seismic field study to determine the anisotropic parameters of shales // Geophysics. – 1999. – 64(4). – P.1247–1252.
6. Palmer D. The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. – Society of Exploration Geophysicists. – 1980.
7. Palmer D. Is accuracy more important than precision in near-surface refraction seismology? // Near Surface Geophysics. – 2015. – 13(1). – P.1–18.
8. Shearer P., Orcutt J. Compressional and shear wave anisotropy in the oceanic lithosphere-the Ngendei seismic refraction experiment // Geophysical Journal International. – 1986. – 87(3). – P.967–1003.
9. Tseng C., Chang Y., Liu J., Lin C. A multiazimuth seismic refraction study for a horizontal transverse isotropic medium: physical modelling results. Geophysical Prospecting // 2018. – 66(1). – P.13–25.
10. Tura A., Kazinnik R., Tao Y., Betterly S. A refraction method to detect reservoir velocity and anisotropy // The Leading Edge. – 2015. – 34(5). – P.548–552.
11. Vernik L., Liu X. Velocity anisotropy in shales: A petrophysical study // Geophysics. – 1997. – 62(2). – P.521–532.
12. Yaskevich S., Grechka V.Y., Duchkov A. Processing microseismic monitoring data, considering seismic anisotropy of rocks // Journal of Mining Science. – 2015. – 51(3). – P.477–486.

13. Zhang J., Toksöz M.N. Nonlinear refraction travelttime tomography // Geophysics. – 1998. – 63(5). – P.1726–1737.

REFERENCES

1. Cerveny V. Seismic ray theory. Cambridge university press. – 2005.
2. Hagedoorn J. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. – Geophysical prospecting // 1959. – 7(2). – P.58–182.
3. Helbig K. Refraction seismics with an anisotropic overburden: a graphical method of interpretation // Geophysical Prospecting. – 1964. – 12(4). – P.383–396.
4. Koulakov I., Stupina T., Kopp H. Creating realistic models based on combined forward modeling and tomographic inversion of seismic profiling data // Geophysics. – 2010. – 75(3). – B115–B136.
5. Leslie J.M., Lawton D.C. A refraction-seismic field study to determine the anisotropic parameters of shales // Geophysics. – 1999. – 64(4). – P.1247–1252.
6. Palmer D. The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. – Society of Exploration Geophysicists. – 1980.
7. Palmer D. Is accuracy more important than precision in near-surface refraction seismology? // Near Surface Geophysics. – 2015. – 13(1). – P.1–18.
8. Shearer P., Orcutt J. Compressional and shear wave anisotropy in the oceanic lithosphere-the Ngendei seismic refraction experiment // Geophysical Journal International. – 1986. – 87(3). – P.967–1003.
9. Tseng C., Chang Y., Liu J., Lin C. A multiazimuth seismic refraction study for a horizontal transverse isotropic medium: physical modelling results // Geophysical Prospecting. – 2018. – 66(1). – P.13–25.
10. Tura A., Kazinnik R., Tao Y., Betterly S. A refraction method to detect reservoir velocity and anisotropy // The Leading Edge. – 2015. – 34(5). – P.548–552.
11. Vernik L., Liu X. Velocity anisotropy in shales: A petrophysical study // Geophysics. – 1997. – 62(2). – P.521–532.
12. Yaskevich S., Grechka V.Y., Duchkov A. Processing microseismic monitoring data, considering seismic anisotropy of rocks // Journal of Mining Science. – 2015. – 51(3). – P.477–486.
13. Zhang J., Toksöz M.N. Nonlinear refraction travelttime tomography // Geophysics. – 1998. – 63(5). – P.1726–1737.

© С. В. Яскевич, П. А. Дергач, Г. С. Чернышов, В. И. Карпучин, А. А. Дучков, 2021

СОЗДАНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПОГРУЖНЫХ ПНЕВМОУДАРНИКОВ ДЛЯ ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНОГО БУРЕНИЯ СКВАЖИН

Сергей Евгеньевич Алексеев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник, тел. 8(383)2053030 доп. 205, e-mail: Alex@misd.ru

Бакыт Кубанычбек

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. 8(383)205-30-30 доп. 205, e-mail: bjkut@yandex.ru

Александр Юрьевич Примычкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. 8(383)205-30-30 доп. 112, e-mail: 808@nn.ru

В статье представлены конструкции малогабаритных погружных пневмоударников на диаметры скважин 43 и 76 мм при бурении комбинированным вращательно-ударным способом в условиях угольных шахт. Описана сфера использования. Показаны особенности и преимущества конструкций. Приведены характеристики пневмоударников и данные исследований. Описаны условия промышленных испытаний и результаты их работы.

Ключевые слова: бурение, скважина, энергия, мощность, ударник, буровая коронка

CREATION OF PORTABLE DOWNHOLE HAMMERS FOR ROTARY-PERCUSSIVE DRILLING OF BOREHOLES

Sergey E. Alexeev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Senior Researcher, office: +7 (383) 205-30-30 ext. 205, e-mail: Alex@misd.ru

Bakyt Kubanychbek

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, office: +7 (383) 205-30-30 ext. 205, e-mail: bjkut@yandex.ru

Alexander Yu. Primychkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, office: +7 (383) 205-30-30 ext. 112, e-mail: 808@nn.ru

This paper presents the design of portable downhole hammers for borehole diameters of 43 and 76 mm when drilling with a combined rotary-percussive method in coal mines. The scope of use is described. Features and advantages of prototypes are shown. The characteristics of DHH and research data are given. The conditions of production tests and operating results are described.

Keywords: drilling, borehole, energy, thickness, hammer, drill bit

Введение

Проходка скважин является важным звеном в технологической цепи при производстве работ в различных областях, в подземных условиях и на открытых работах, в горном деле и в строительстве [1-4]. Важным направлением является проходка скважин для научных целей.

Значение геомеханического обоснования технических решений по условиям подземной разработки полезных ископаемых значительно возрастает с увеличением глубины ведения горных работ и, связанное с этим, повышением горного давления. Информационная основа мониторинга обеспечивается использованием инструментальных и теоретических методов. Для определения напряженно-деформированного состояния в массиве горных пород используется, разработанный в ИГД СО РАН, метод параллельных скважин [5]. Инструментальные измерения с использованием скважин требуются при работе существующих и при строительстве новых горнодобывающих предприятий [6]. При эксплуатации искусственных сооружений, таких как плотины гидроэлектростанций, для оценки их состояния, выявления зон неупругих деформаций, также требуются такие исследования. Прогнозирование опасных явлений, например, горных ударов, возникновение очагов самовозгорания в угольных шахтах, связанных с горным давлением, также требует изучения напряженного состояния горного массива. Для установки регистрирующей аппаратуры внутри массива нужна проходка скважин различной протяженности и направления. Техника и технология бурения является важным инструментом проведения научных исследований.

На угольных шахтах для эффективной работы комплексно-механизированных забоев требуется снижение концентрации метана в подземной атмосфере. Это обеспечивается методом предварительной дегазации и интенсивным проветриванием, как горных выработок, так и выработанного пространства. Наиболее результативным методом предварительной дегазации является метод обуривания подготовляемого очистного блока сеткой подземных дегазационных скважин из оконтуривающих выработок, при котором производится проходка весьма протяженных скважин малого диаметра [7].

Бурение анкерных скважин обычно осуществляется вращательным способом бурения. Однако, у данного способа весьма узкий диапазон использования, он применим при достаточно мягкой породе. При встрече с прослойкой более крепкой породы бурение затруднительно либо невозможно. Напрашивается использование ударного импульса, как добавка к усилиям резания. В таком случае речь идет о комбинированном вращательно-ударном способе бурения [8]. Погружной пневмоударник, расположенный непосредственно у забоя скважины, обладает наилучшей передачей энергии удара на забой, а отработанный энергоноситель служит для очистки забоя от бурового шлама и выноса его из скважины. Скорость бурения практически не зависит от глубины скважины [9, 10]. Для установки анкеров используются скважины малого диаметра.

Создание пневмоударника для бурения скважин малого диаметра является достаточно сложной технической задачей ввиду того, что диаметр скважины

жестко лимитирует поперечные габариты погружного пневмоударника и ограничивает возможности образования рабочих площадей ударника необходимой величины. Для увеличения рабочей площади ударника разработана схема с использованием принципа многокамерности, при котором площадь ударника, находящаяся под давлением больше площади поперечного сечения полости корпуса.

Объект исследований

В ИГД СО РАН была разработана схема, позволяющая увеличить площадь ударника на рабочем ходу (рис. 1) [11-13].

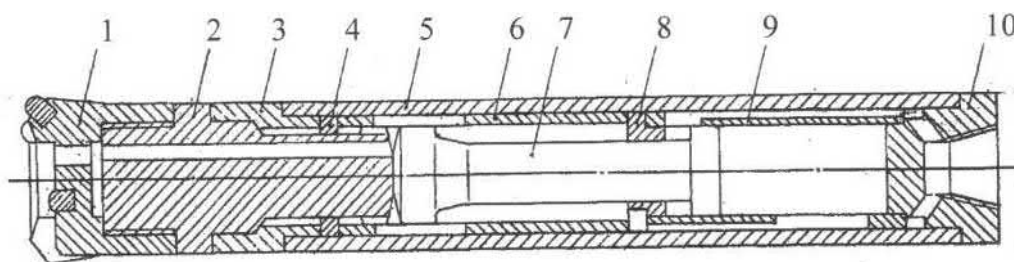


Рис. 1. Схема малогабаритного погружного пневмоударника

1 – коронка буровая съемная; 2 – скалка; 3 – букаса; 4 – кольцо разрезное переднее; 5 – корпус; 6 – гильза передняя; 7 – ударник; 8 – кольцо разрезное заднее; 9 – гильза задняя; 10 – переходник

По данной схеме были спроектированы и изготовлены малогабаритные пневмоударники ПНБ 76 (рис. 2) для бурения скважин вращательно-ударным способом диаметром 76 мм. и пневмоударник АШ43 на диаметр скважины 46 мм.[14]



Рис. 2. Экспериментальный образец погружного пневмоударника ПНБ76

Конструктивное исполнение ударника обеспечивает его центральное соударение с буровой коронкой, что улучшает передачу энергии удара за счет уменьшения поперечных колебаний. Пневмоударник ПНБ76 был исследован на натурном лабораторном стенде.

Методы исследований

В процессе исследований сняты диаграммы давлений в рабочих камерах (рис. 3) при давлении в пневмосистеме 0.6 МПа. В результате обработки диаграмм по известной методике [15] определены его основные энергетические параметры.

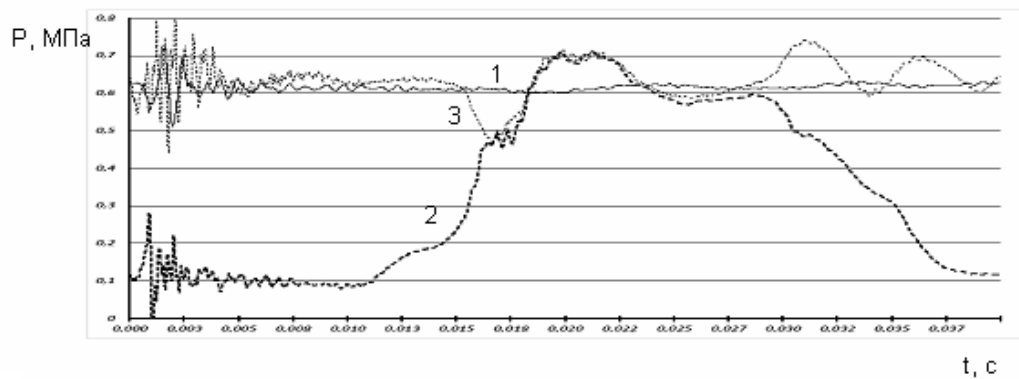


Рис. 3. Диаграммы давлений в камерах погружного пневмоударника: ПНБ 76

1 — давление в питающей магистрали; 2 — давление в камере рабочего хода; 3 — давление в камере холостого хода.

Параметры пневмоударника ПНБ76

Диаметр буримой скважины, мм	76
Диаметр корпуса, мм	63.5
Рабочее давление, МПа	0.6
Энергия удара, Дж	40
Частота удара, мин ⁻¹	1500
Масса ударника, кг	1.45

Результаты испытаний

Положительные результаты исследований позволили ИГД СО РАН предложить свои разработки ООО «шахта Березовская» с целью продолжения научных исследований по проходке глубоких скважин в производственных условиях [16,17].

По заказу ООО «шахта Березовская» на ООО «Спецгидравлика» были изготовлены три пневмоударника ПНБ 76 с коронками КНБ 76 (рис 4) для работы в сочетании с буровым станком СБР 400 [18].

В процессе промышленных испытаний производились работы по проходке технической скважины диаметром 76 мм сплошным забоем по породам крепостью 9-12 единиц по М.М. Протоdjяконову. Скважина предназначена для перепуска воды с выработки верхнего горизонта на нижележащий штрек. Бурение осуществлялось буровым станком СБР 400 со штангами диаметром 50 мм.



Рис. 4. Коронка КНБ76

а – до испытаний; б – после испытаний

Проходка скважины производилась двумя способами бурения, а именно:

- бурение вращательным способом, с применением коронок резания;
- бурение с применением погружного пневмоударника, оснащенного короной с цилиндрическими вставками из твердого сплава.

При бурении скважин первым способом наблюдались поломки всех применяемых коронок резания на первом метре бурения скважины. При бурении скважины в этих же условиях с использованием погружного пневмоударника ПНБ-76 конструкции ИГД СО РАН наблюдалась устойчивая работа пневмоударника с надежным блокировочным режимом. Источником энергии пневмоударника служил дизельный компрессор, выполненный во взрывобезопасном исполнении. Развиваемое им давление сжатого воздуха составляло 0.4 МПа при производительности 6.0 м³/с. Скорость бурения скважины диаметром 76 мм с использованием пневмоударника ПНБ-76 составила 70 мм/мин по породам крепостью 11-12 единиц и 100 мм/мин крепостью 8-10 единиц по шкале М.М. Протоdjякова. Станок СБР 400 работал в щадящем режиме. Давление рабочей жидкости в напорной магистрали вращения бурового става не превышала 5.0 МПа, а в магистрали подачи не более 3.5 МПа, что соответствовало величине вращающего момента на буровом стае не более 300 Нм и усилию подачи его на забой не более 300 кг. Это говорит о том, что основные функции бурения при проходке скважины осуществлялись пневмоударником, тем самым уменьшая вредные влияния больших моментов вращения, способствующих отклонению бурового става от заданного направления.

За время работы с использованием пневмоударника (три рабочих смены) техническая скважина между выработками была пробурена. Ее длина составила сорок метров. Дальнейшие работы по проходке скважин с использованием погружного пневмоударника ПНБ-76 были прекращены в следствии выхода из строя коронок КНБ76. Это объясняется тем, что энергии удара, развиваемого пневмоударником, оказалось недостаточно для разрушения массива пород скважины диаметром 76 мм штырями коронки, в следствии чего последние

подвергались интенсивному истиранию. Эта же причина явилась следствием не высокой производительности бурового оборудования при проходке скважины в этих условиях.

В соответствии с выводами, полученными в результате. промышленных испытаний на ООО «шахта Березовская» в ИГД СО РАН, проведены работы по усовершенствованию конструкции пневмоударника ПНБ-76 и созданию новой буровой коронки.

В результате этих работ создана новая конструкция пневмоударника ПНБ-76У, отличительной особенностью которой является наличие в его рабочей и холостой камерах впускного и выпускного эластичных клапанов. Это позволило увеличить величину хода и скорость перемещения ударника и тем самым увеличить энергию самого пневмоударника.

Испытание пневмоударника меньшего диаметра

Для увеличения энергетических параметров погружного пневмоударника АШ43 было использовано изготовление ударника из титанового сплава, что существенно увеличивало частоту ударов за счет малого удельного веса сплава [19-21]. Пневмоударник АШ43Т прошел испытания на шахте «Распадская-коксовая» Кемеровской области для проведения пробного бурения, где в сочетании с анкероустановщиком (рис. 5) нужно было бурить скважины диаметром 45-50 мм на глубину до 20 м под оборудование для разупрочнения и посадки тяжелых кровель.

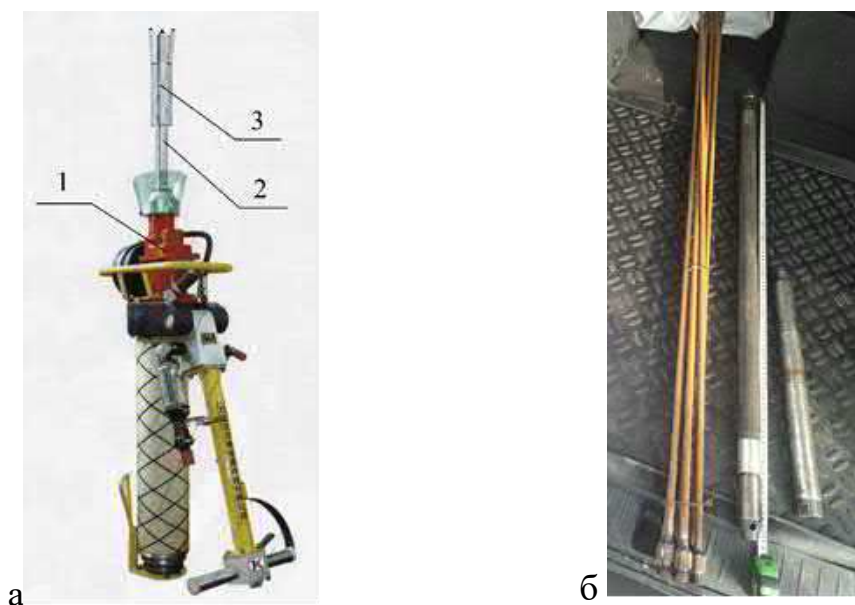


Рис. 5. Анкероустановщик с пневмоударником (а) и герметизатор скважин (б):
1— анкероустановщик; 2— штанга; 3 — пневмоударник.

При работе давление воздуха в питающей магистрали составило 0,3 МПа, что значительно ниже рабочего давления пневмоударника. В этой ситуации пневмоударник работал в режиме высокочастотного ударного вибратора, что также оказывало влияние на процесс разрушения породы на забое скважины. Механическая скорость бурения в таком режиме была в 2 раза выше скорости бурения в тех же условиях без пневмоударника.

В феврале 2020 г. проведены работы по созданию условий эксплуатации погружного пневмоударника АШ43 на давлении энергоносителя 0,5 – 0,7 МПа. Для этой цели была разработана конструкция вертлюга, обеспечивающая подачу сжатого воздуха непосредственно на пневмоударник.

В декабре 2020 г. пневмоударник АШ43 прошел промышленные испытания на шахте «УК Анжерская Южная». Работа проводилась совместно с сотрудниками ИУУ СО РАН.

Бурили станком СБР (станок буровой ручной) (рис. 6). Бурились скважины диаметром 46 мм. глубиной 15 м.



Рис. 6. Промышленные испытания пневмоударника АШ 43 на станке СБР

По результатам хронометража за 167 мин пробурено 15,6 м, т.е. скорость бурения 0,093 м/мин с учетом износа и замены серийной коронки БИ-741. Опытные бурильщики положительно оценили работу бурового станка в сочетании с пневмоударником АШ43, отметили значительное повышение производительности бурения (1,5 раза) и самое главное не «опрокидывается» буровая машина, тем самым создана более комфортная рабочая среда бурильщикам.

Выводы

Разработка техники для комбинированного вращательно-ударного способа бурения соответствует потребностям производства, позволяет расширить возможности имеющего оборудования. Для проходки анкерных скважин требуется создание бурового инструмента сверх малого диаметра, что составляет специфику данной работы.

Используя оборудование вращательного бурения необходимо создавать условия для работы погружного пневмоударника, вносить новые элементы в конструкцию. Результаты промышленных испытаний показали перспективность использования пневмоударника АШ43.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Репин А.А., Карпов В.Н., Воронцов Д.С., Тимонин В.В., Алексеев С.Е., Шахторин И.О. К созданию железнодорожного комплекса для бурения скважин под опоры контактной электросети в криолитозоне Сибири и Дальнего Востока / Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Том 2. №1. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2014. – С.162-169.
2. Тимофеев Н.Г., Скрябин Р.М. Буровой снаряд для бурения скважин большого диаметра / Ползуновский альманах №4/2. – 2011 С.84-86.
3. Харламов Ю.П. Состояние и перспективы сооружения свайный фундаментов при обустройстве нефтегазовых месторождений в Южной Якутии / Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды : тр. конф. с участием иностр. ученых (7-11 июля 2008 г., Новосибирск). Т. 2.: Машиноведение. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2009. – С. 58 – 61.
4. Карпов В.Н., Воронцов Д.С. Проблемы специализации железнодорожных магистралей в условиях Сибири и Дальнего Востока. Политранспортные системы. Материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – Новосибирск: СГУПС, 2015. – С.56-62[
5. Барышников В.Д., Барышников Д.В., Гахова Л.Н., Качальский В.Г. Опыт применения геомеханического мониторинга при подземной разработке месторождений полезных ископаемых //ФТПРПИ. – 2014. - № 5.
6. Усков Д.В., Усков В.А., Виноградов В. И. Особенности проявления тектонических напряжений в подземных рудниках норильского промышленного района. В сб. Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Труды конференции. Новосибирск. 2007.
7. Клишин В.И., Кокоулин Д.И., Фокин Ю.С., Репин А.А. Развитие бурового оборудования для угольных шахт. В сб. Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Труды конференции. Новосибирск. 2007.
8. Алексеев С.Е., Репин А.А., Пятнин Г.А. Перспективы создания техники для комбинированного вращательно-ударного способа бурения шпуров. В сб. Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Труды конференции. Новосибирск. 2007.
9. Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Тупицын К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действияб. – Новосибирск.: Наука, 1985.
10. Медведев И.Ф. Режимы бурения и выбор буровых машин. Москва. Недра. 1968.
11. Патент. РФ № 2090730. Погружной пневматический ударный механизм / С.Е. Алексеев // Опубл. в БИ – 1997- № 26.
12. Патент. РФ № 2343266. Погружной пневмоударник / А.А. Репин, С.Е. Алексеев, Г.А. Пятнин //Опубл. В БИ – 2009. - № 1.
13. П.м. № 121854 РФ. Погружной пневмоударник. / А.А. Репин, С.Е. Алексеев, В.Н. Карпов // Опубл. БИ – 2012. - № 31.

14. Клишин В. И., Репин А. А., Кокоулин Д. И., Алексеев С. Е., Кубанычбек Б., Шахторин И. О. Создание бурового оборудования для проходки скважин малого диаметра в крепких породах // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сб. тр. — Прокопьевск, 2014.
15. Есин Н.Н. Методика исследования и доводки пневматических молотков. Новосибирск. Редакционно-издательский отдел Сибирского отделения АН СССР. 1965.
16. Репин А.А., Кокоулин Д.И., Алексеев С.Е., Карпов В.Н., Шахторин И.О. Малогабаритный пневмоударник для направленного бурения глубоких скважин в подземных условиях угольных шахт / IV Международная научно-практическая конференция «Перспективы инновационного развития угольных регионов России»- Прокопьевск 2014.
17. Тимонин В.В., Кокоулин Д.И., Алексеев С.Е., Кубанычбек Б. «Средства прямолинейно направленного бурения в условиях угольных шахт», конференция ИГД СО РАН «Проблемы развития горных наук и горнодобывающей промышленности», Новосибирск, 2016.
18. Тимонин В.В., Кокоулин Д.И., Алексеев С.Е., Кубанычбек Б. Опыт проходки прямолинейно направленных скважин в подземных условиях шахты «Березовская». Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 4 (131). С. 3-7.
19. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. - М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. - 520 стр.
20. А.А. Репин, В.В. Тимонин, С.Е. Алексеев, Д.И. Кокоулин, А.И. Попелюх. Пути повышения мощности малогабаритных погружных пневмоударников / ФТПРПИ–2016- № 6.
21. Алексеев С.Е., Тимонин В.В., Кокоулин Д.И., Шахторин И.О., Кубанычбек Б. Создание малогабаритного погружного пневмоударника для проходки исследовательских скважин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2015. - № 2.

© С. Е. Алексеев, Б. Кубанычбек, А. Ю. Примычкин 2021

БУРЕНИЕ СКВАЖИН С ОДНОВРЕМЕННОЙ ОБСАДКОЙ

Сергей Евгеньевич Алексеев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник, тел. 8(383)2053030 доп. 205, e-mail: Alex@misd.ru

Евгений Михайлович Черниенков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник, тел. 8(383)2053030 доп. 205, e-mail: e.chernienkov@misd.ru

Рассмотрены условия применения способа бурения скважин с одновременной обсадкой. Показаны наиболее используемые конструкции инструмента, рассмотрены их достоинства и недостатки. Обозначены современные требования к данному инструменту. Представлена новая конструкция, позволяющая вести дальнейшее бурение через обсадную максимально возможного диаметра, даны результаты моделирования. Описана работа устройства и приведена схема его использования.

Ключевые слова: бурение, скважина, обсадная труба, раздвижное долото, модель

DRILLING BOREHOLES WITH SIMULTANEOUS CASING

Sergey E. Alexeev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Senior Researcher, office: +7 (383) 205-30-30 ext. 205, e-mail: Alex@misd.ru

Evgeny M. Chernienkov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Senior Researcher, office: +7 (383) 205-30-30 ext. 205, e-mail: e.chernienkov@misd.ru

The conditions for applying the method of drilling boreholes with simultaneous casing are considered. The most used tool designs, their advantages and disadvantages are shown. Present-day requirements for this tool are indicated. A new design is presented, which allows further drilling through the casing pipe of maximum possible diameter, simulation results are given. The operation of the device is described and a diagram of its use is presented.

Keywords: drilling, borehole, casing pipe, expandable drill bit, model

Введение

Системы бурения с одновременной обсадкой предназначены для бурения скважин в сложных горно-геологических условиях (валунно-галечные отложения, наличие водопритока в скважину и др.). Системы для пневмоударного

бурения с одновременной обсадкой применяются в случае, когда по геологическим свойствам грунта есть необходимость в ударно-вращательном способе бурения и при этом существует необходимость одновременной обсадки скважины.

Наиболее распространенные в мировой практике системы бурения с одновременной обсадкой показаны на рис. 1. Это долота с раздвижными породоразрушающими сегментами, а также со специальным забурником, установленным в одном корпусе с оригинальным эксцентриковым механизмом [1-3].



Рис. 1. Долота для бурения с одновременной обсадкой

Принцип действия долота заключается в увеличении диаметра бурения забурника расширителями одновременно с первичным бурением скважины. Эти расширители в зависимости от типа обсадной системы могут быть симметричными либо эксцентричными.

В рабочем положении расширитель разбуривает скважину до требуемого диаметра для обсадной трубы, спускающейся в скважину под действием собственного веса и от ударов поружого пневмоударника по стартовой втулке внутри трубы. После окончания бурения одним поворотом бурового става в противоположном направлении расширитель складывается в транспортное положение, и через обсаженную трубу буровой снаряд поднимается на поверхность.

Конструкции долот

Опыт бурения показывает, что долота с двумя раздвижными сегментами используются при обсадке трубами до диаметра 214 мм., а с эксцентриковым расширителем до диаметра 270 мм.

Симметричные трехсегментные долота могут использоваться для осадки трубами до диаметра 325 мм (рис.2).

Следует, однако отметить, что из-за двух слоев подвижных деталей через которые передается энергии удара на забой скважины происходит потеря энергии в местах контакта деталей. В результате этого бурение с таким долотом имеет низкую производительность при проходке скважина в достаточно крепких породах. Это отрицательно влияет и на прочность деталей. При использовании мощного пневмоударника повышен риск поломки деталей долота.

Многие зарубежные компании выпускают системы бурения с использованием погружных пневмоударников с одновременной обсадкой типа Symmetrix

(рис. 3). Предназначены для обсадки трубами широкого диапазона диаметров, включая большие [4, 5].

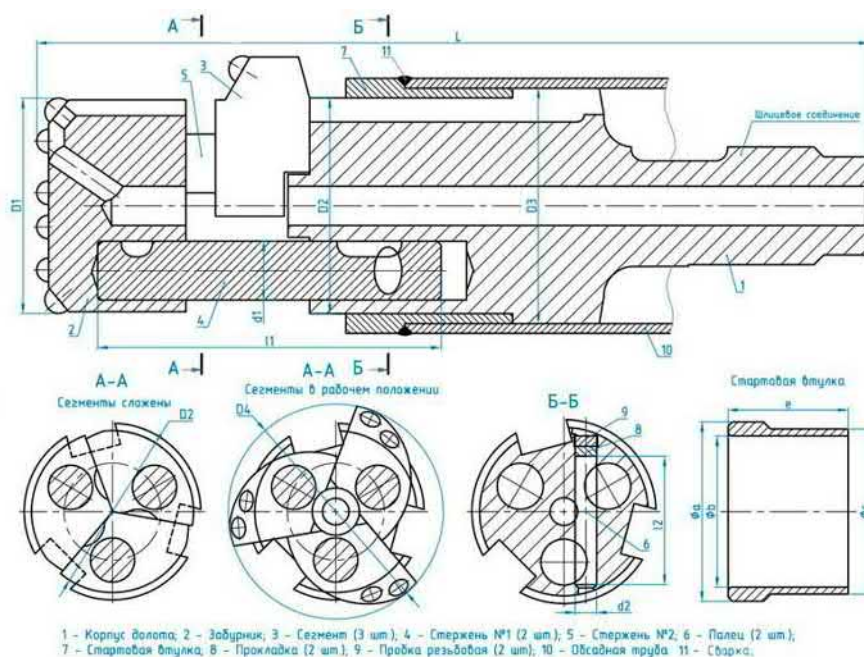


Рис. 2. Трехсегментное долото



Рис. 3. Snряд для бурения с одновременной обсадкой системы Symmetrix

Следует отметить хорошую передачу энергии удара на центральную часть скважины, поскольку пилотное долото выполнено заодно целое с хвостовиком долота.

Ввиду своей надежности эта конструкция получила весьма широкое распространение в мировой практике.

Особенность системы заключается в том, что разрушение породы на забое скважины осуществляется связанными между собой кольцевым и пилотным долотами. По окончании бурения буровой снаряд вместе с пилотным долотом удаляется из скважины, а кольцевое долото остается (рис. 4).

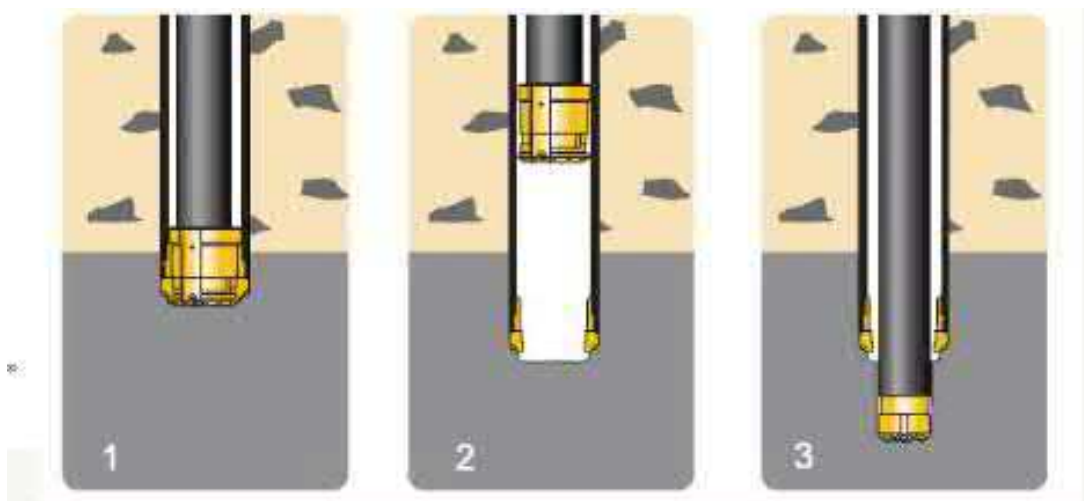


Рис. 4. Принцип действия системы Symmetrix

1 – бурение до крепкой порода; 2 – извлечение снаряда вместе с пилотным долотом;
3 – дальнейшее бурение через кольцевое долото.

В рассмотренных вариантах после окончания бурения в обсадной трубе остаются либо стартовые втулки, либо кольцевые долота, что сужает внутренний диаметр обсадной трубы, необходимый для дальнейшего бурения [6].

Объект исследования

Для решения этой проблемы разработана новая конструкция долота, позволяющая совместно с бурением устанавливать обсадную трубу без сужения ее внутреннего диаметра (рис.5).



Рис. 5. Новая конструкция долота под трубу Ø 325

Для этой цели на боковой поверхности головки 1 корпуса долота устанавливаются подпружиненные упорные вкладыши 2, опирающиеся на опорную втулку 3, охватывающей часть наружной поверхности обсадной трубы 4 и имеющей внутренний диаметр равный или больший внутреннего диаметра обсадной трубы. Опорная втулка в задней части имеет коническую поверхность 5 (рис. 6).

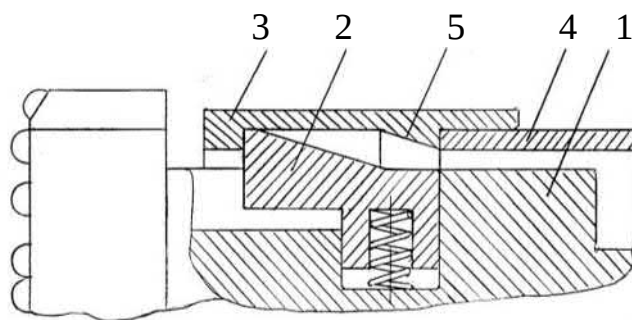


Рис. 6. Подпружиненный упорный вкладыш

При бурении упорные вкладыши передают энергию удара погружного пневмоударника на опорную втулку и связанную с ней обсадную трубу, обеспечивая ее движение в направлении к забою.

При подъёме снаряда подпружиненные упорные вкладыши находят на коническую поверхность опорной втулки и утапливаются в боковую поверхность головки долота и не препятствуют дальнейшему извлечению долота из обсадной трубы.

В новой конструкции используются четыре раздвижных сегмента. Такое количество позволяет обеспечить на периферии долота большее количество породоразрушающих вставок, более равномерно распределенных по контуру забоя. Это также позволяет в центральной части долота расположить увеличенное количество вставок, что особенно важно при бурении скважин большого диаметра.

При работе сегменты раздвигаются, обеспечивая бурение скважины диаметром больше диаметра обсадной трубы и диаметра опорной втулки. Для извлечения бурового снаряда из скважины сегменты сворачиваются до малого размера.

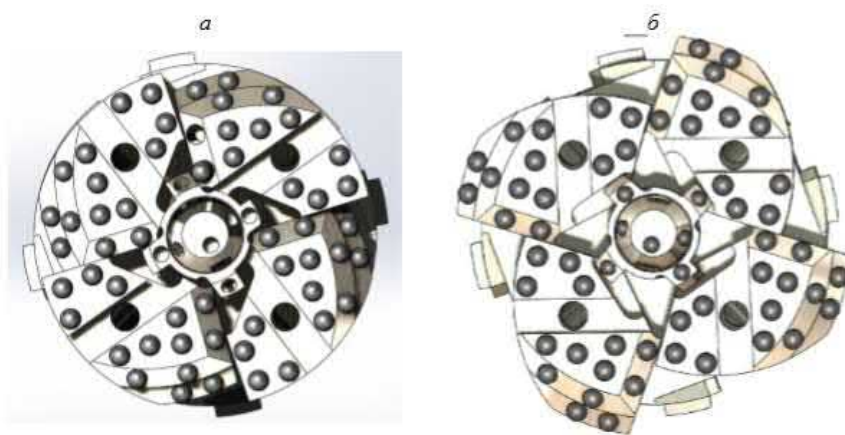
В качестве генераторов ударных импульсов рационально использовать погружные пневмоударники высокого давления [7,8].

Результаты моделирования

Данные имитационного моделирования представлены на рис. 7.

Исследования моделей показали, что в развёрнутом положении сегментов данных размеров и расположения в корпусе долота обеспечивается бурение нужного диаметра, в свернутом положении долото имеет поперечные габариты меньше внутреннего диаметра обсадной трубы.

Предложена система выхлопа, отработанного в погружном пневмоударнике воздуха при которой имеются каналы, равномерно распределенные по площади забоя и направляющие выхлоп непосредственно на забой скважины. Качественная и своевременная очистка забоя позволяет избежать потери энергии на переизмельчение бурового шлама и повышает скорость бурения [9]. Удаление шлама происходит через зазор между корпусом долота и обсадной трубой, а также через специальные пазы в корпусе.



а – в свернутом положении Ø300 мм; б – в развернутом положении Ø350 мм

Рис. 7. Имитационная модель движения сегментов бурового долота

При увеличении диаметра долота существенно увеличивается себестоимость его изготовления. Данная конструкция позволяет изготавливать оси сегментов отдельно, что удешевляет производство и увеличивает прочность осей.

В составе бурового снаряда для бурения с одновременной обсадкой предполагается использование импортного погружного пневмоударника 12" РМК 1200. Это пневмоударник высокого давления и имеет высокие энергетические параметры, что предъявляет повышенные требования к прочности деталей долота. По рекомендации специалистов кафедры «Материаловедение в машиностроении» Новосибирского государственного технического университета детали долота планируются изготавливать из легированной стали 40Х2Н2МА с термической обработкой по рекомендованной методике [10-12].

Основные этапы работы долота представлены на рис 8.

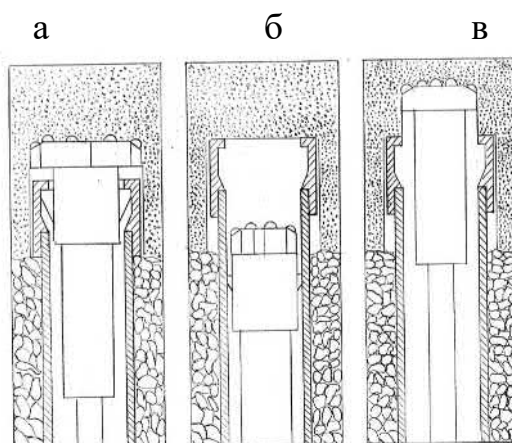


Рис. 8. Принцип работы нового долота

а – бурение с одновременной обсадкой; б – извлечение бурового снаряда из обсадной трубы; в – дальнейшее бурение с максимальным для данной трубы диаметром скважины.

Выводы

Техника для бурения скважин с одновременной обсадкой в последнее время стремительно развивается. Необходимо соответствие этой техники требованиям новых технологий проведения работ в различных условиях, в сочетании с новым оборудованием.

Представленная новая конструкция инструмента для одновременной обсадки расширяет технологические возможности проведения работ, позволяет через обсадную трубу вести дальнейшее бурение с максимально возможным диаметром скважины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахторин И.О. Анализ конструкций долот для бурения скважин с одновременной обсадкой / И.О. Шахторин. // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. Т.6. – с. 329 – 333.
2. Фокс Брайан и др. Бурение взрывных скважин на открытых горных выработках. Издатель: Ульф Линде. Перевод на русский язык// Atlas Copco Drilling Solutions LLC, Garland, Texas, USA. – 2011. -274 с.
3. Погружные пневмоударники Secoroc Q LX5 инструкция по эксплуатации / Перевод на русский язык. Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, Sweden. -2015. -34 с.
4. Technical specification DHD hammers / Atlas Copco Secoroc AB. Update, February- 2005-4p
5. A – Z of DTH drilling // Halco Rock Tools. – 05.2016 – pp.76.
6. Данилов, Б. Б. Пути повышения эффективности забивания в грунт стальных труб пневматическими молотами / Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий // ФТПРПИ. — 2005. — № 6. — С. 81 – 88.
7. В.В. Тимонин, С.Е. Алексеев, В.Н. Карпов, Е.М. Черниенков.. Влияние энергетических параметров погружного пневмоударника на технико-экономические показатели бурения скважин с одновременной обсадкой // ФТПРПИ. – 2018 – №1. – С. 61–70.
8. Тимонин В.В., Алексеев С.Е., Кокоулин Д.И. Испытания импортозамещающих погружных пневмоударников высокого давления / Международная научная конференция ИНТЕРЭКСПО ГЕО – СИБИРЬ – 2019, т 2 № 5, Новосибирск, 2019 с. 57 -66.
9. Алексеев С.Е., Кокоулин Д.И. Повышение качества очистки забоя скважины при использовании погружных пневмоударников. / Международная научная конференция ИНТЕРЭКСПО ГЕО – СИБИРЬ – 2018, т 5, Новосибирск, 2018 С. 3-8.
10. Репин А. А., Алексеев С. Е., Попелюх А. И. Методы повышения надежности деталей ударных машин -ФТПРПИ. – №4. – 2012- С. 94–101]
11. Попелюх П. А., Никулина А.А., Попелюх. А. И. Влияние внешней среды на показатели надежности деталей горных машин, работающих в условиях динамического сжатия. Научный вестник НГТУ-1013-№ 4(53) С 214-229.
12. Попелюх П. А., Попелюх А. И., Юркевич М. Р. Комбинированная термомеханическая обработка стали с мартенсито-бейнитным превращением аустенита. Обработка металлов. №2 2013.

REFERENCES

1. Shakhtorin I.O. Analysis of bit designs for drilling wells with simultaneous casing / *Interexpo Geo-Sibir* / [Interexpo Geo-Siberia]. - 2018.V.6. - from. 329 - 333.
2. Brian Fox. Atlas Copco Drilling Solutions LLK, Garland, TX, USA. - 2011.-274 p.
3. Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, Sweden. -2015. -34 p.

4. Technical specification DHD hammers / Atlas Copco Secoroc AB. Update, February,- 2005-4p.
5. A – Z of DTH drilling // Halco Rock Tools. – 05.2016 – pp.76.
6. Danilov, B.B., Smolyanitskiy B.N. Ways of increasing the efficiency of driving steel pipes into the ground with pneumatic hammers / *Fiziko-technicheskie problem razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mineral development] Novosibirsk: Institute of Mining SB RAS, - 2005. - No. 6. - P. 81 - 88.
7. V.V. Timonin, S.E. Alekseev, V.N. Karpov, E.M. Chernienkov .. Influence of energy parameters of a down-the-hole hammer on technical and economic indicators of well drilling with simultaneous casing / *Fiziko-technicheskie problem razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mineral development] Novosibirsk: Institute of Mining SB RAS. - 2018 - V 1. - S. 61–70.
8. Timonin V.V., Alekseev S.E., Kokulin D.I. Testing of import-substituting high-pressure DTH hammers. / *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya INTEREKSP0 GEO – SIBIR' – 2019* [International Scientific Conference INTEREXPO GEO - SIBERIA – 2019], vol. 2 No. 5, Novosibirsk, 2019 p. 57 -66.
9. Alekseev S.E., Kokulin D.I. Improving the quality of bottomhole cleaning when using DTH hammers. / *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya INTEREKSP0 GEO – SIBIR' – 2018* [International scientific conference INTEREXPO GEO - SIBERIA – 2018], V. 5, Novosibirsk, 2018 pp. 3-8.
10. Repin A.A., Alekseev S.E., Popelyukh A.I. .. Methods of increasing the reliability of parts of impact machines / *Fiziko-technicheskie problem razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mineral development] Novosibirsk: Institute of Mining SB RAS.. - No. 4. - 2012.- S. 94-101 pp.
11. Popelyukh P.A., Nikulina A.A., Popelyukh. AI Influence of the external environment on the reliability indicators of mining machine parts operating under dynamic compression / *Nauchnyj vestnik NGTU* [Scientific bulletin of NSTU].-1013.-№ 4 (53) S 214-229.
12. Popelyukh PA, Popelyukh AI, Yurkevich MR Combined thermomechanical treatment of steel with martensite-bainitic transformation of austenite/ *Obrabotka metallov* [Metal processing]. V 2 2013.

© С. Е. Алексеев, Е. М. Черниенков. 2021

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДИАБАТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА В ТОННЕЛЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

Елена Леонидовна Алферова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)2053030 доб. 179, e-mail: alferova_el@mail.ru

В работе показана возможность использования адиабатического охлаждения воздуха путем распыления воды непосредственно в тоннеле, проведено решение задачи моделирования процесса удаления избытков тепла из воздуха при фазовом переходе воды из жидкого состояния в газообразное в условиях тоннеля метро. Показано, что данный способ существенно снижает требования к вентиляционному оборудованию по сравнению со способом удаления тепловых избытков только средствами вентиляции. При использовании такого способа удаления тепловых избытков в тоннеле метрополитена, максимальная производительность одного вентилятора составит $67.5 \text{ м}^3/\text{с}$ при затрачиваемой мощности 104 кВт, мощность насосного оборудования не превысит 50 кВт при расходе воды $1.5 \text{ м}^3/\text{ч}$. При удалении тепловых избытков только вентиляцией производительность одного вентилятора (при параллельной работе двух вентиляторов) составляет до $269 \text{ м}^3/\text{с}$, а мощность 727 кВт.

Ключевые слова: адиабатическое охлаждение, тоннель, метрополитен, тепловой баланс, вентиляция

COMPUTATIONAL SIMULATION OF THE EVAPORTIVE AIR COOLING PROCESS IN A SUBWAY TUNNEL

Elena L. Alferova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Pr., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, phone: (383)2053030, extension 179, e-mail: alferova_el@mail.ru

The paper shows the possibility of using evaporative cooling of air by spraying water directly in the tunnel. The solution of the problem of modeling the process of removing heat excess from the air during the phase transition of water from the liquid state to the gaseous in the conditions of the metro tunnel is carried out. It is shown that using method significantly reduces the requirements for ventilation equipment in comparison with the method of removing heat surpluses only by mechanical ventilation. When using evaporative cooling method of removing heat surpluses in a subway tunnel, the maximum air flow rate of one fan will be $67.5 \text{ м}^3/\text{s}$ with 104 kW power, the power of the pump equipment will be nearly 50 kW, with a water flow rate 1.5 м^3 per hour. When removing heat surpluses only by ventilation, the air flow rate of one fan (with two fans in parallel work) will be up to $269 \text{ м}^3/\text{s}$, and the power will be 727 kW.

Keywords: adiabatic cooling, tunnel, metro, heat balance, ventilation

Введение

В метрополитенах РФ наблюдается постоянный рост пассажиропотока и, как следствие, увеличение количества поездов на линиях. При этом в некоторых метрополитенах фактический пассажиропоток превысил предельные значения,

предусмотренные проектом. Например, в московском метрополитене частота движения поездов составляет до 45 пар/час, а станции метро, построенные до 1995 года, рассчитаны на частоту движения не более 35 пар/час. Это приводит к значительным тепловым избыткам в метрополитене, которые создают дискомфортные тепловые условия, нарушающие нормативные санитарные требования к микроклимату помещений метрополитена. Удаление теплоизбытков возможно путем увеличения подаваемого расхода наружного воздуха с использованием тоннельных вентиляторов, но для этого необходимо установить вентиляторы большой производительности. В уже эксплуатируемых метрополитенах это невыполнимо, так как установка нового вентиляционного оборудования ограничено габаритами существующих подземных вентиляционных сооружений. В проектируемых метрополитенах применение вентиляторов с высокой производительностью приведет к высоким финансовым затратам. В работе [1] приведен почасовой тепловой баланс [2-3] для метрополитена с двухпутным и тоннелем на глубине заложения 20 м, тепловые избытки в часы максимального пассажиропотока и частоты движения достигают 6 МВт. Если проветривать тоннель с регулированием расхода воздуха и соответственно теплоизбыткам увеличивать расход воздуха, то в данных условиях расчетные расходы воздуха по удалению теплоизбытков (рассчитанные с учетом суточного изменения температуры наружного воздуха и при температуре удаляемого воздуха +33° [4]) будут превышать возможности оборудования тоннельной вентиляции. Так, например, требуемая производительность одного вентилятора при параллельной работе двух вентиляторов в промежуток времени между 16 и 17 часами составит 269 м³/с для метрополитена с двухпутным тоннелем при глубине заложения тоннеля 20 м. Такую производительность можно обеспечить шахтным вентилятором, мощность которого при производительности 269 м³/с составит 727 кВт [5].

Одним из способов, которым можно устранить проблему перегрева является адиабатическое охлаждение воздуха (АОВ). Сущность этого способа заключается в том, что при разбрызгивании воды (вода имеет одно из наибольших среди жидкостей значение скрытой теплоты парообразования – 2258 кДж/кг при нормальных условиях [6]) в движущемся потоке воздуха, этот воздух взаимодействует со взвешенными частицами воды, частицы испаряются, забирая при этом тепло, а воздух увлажняется испарившейся влагой до состояния близкого к насыщению. То есть источником теплоты в процессе испарения для рассматриваемой системы «вода-воздух» является воздух, а потенциалом переноса теплоты – разность температур между воздухом и водой, равная психометрической разности температур сухого и мокрого термометров [7].

Методы и материалы

В работе рассмотрен способ АОВ при распылении воды непосредственно в путевом пространстве тоннеля. Этот способ охлаждения воздуха в метрополитенах дает возможность привести в норму показатели микроклимата, при этом имеет небольшие габариты и не завышает требования к вентиляционному оборудованию, однако, он практически не исследован для условий метрополитена.

Для таких условий важно, чтобы частицы воды полностью испарялись, не достигая поверхности кожуха контактного рельса (рис. 1). Процесс обработки воздуха на диаграмме Рамзина показан на рис. 2.

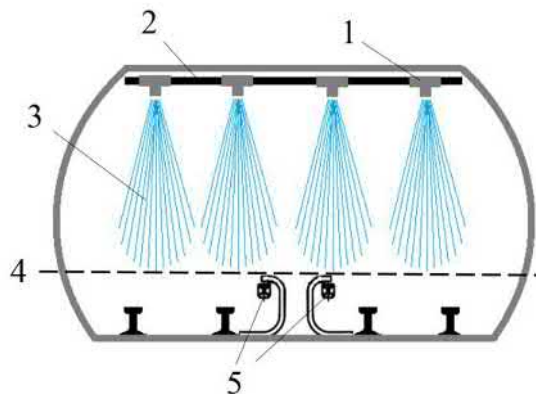


Рис. 1. Схема АОВ в тоннеле:

1 – форсунки; 2 – трубопровод; 3 – распыляемая вода; 4 – верхний уровень кожуха контактных рельсов; 5 – контактные рельсы

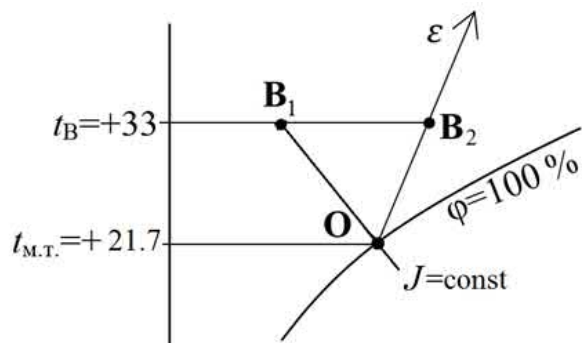


Рис. 2. Процесс обработки воздуха на диаграмме Рамзина:

B_1 – точка с параметрами тоннельного воздуха; O – точка с параметрами охлажденного (увлажненного) воздуха; J – количество теплоты, содержащееся в тоннельном и охлажденном воздухе; ε – луч процесса нагрева воздуха в тоннеле; B_2 – точка с параметрами снова нагретого тоннельного воздуха; t_B – температура тоннельного воздуха, °C; $t_{м.т.}$ – температура мокрого термометра

В тоннель подается наружный воздух, он ассимилирует часть тепловых избытков и нагревается до максимально возможной температуры воздуха – точка B_1 на рис. 2. (+33 °C). При достижении этой температуры в тоннеле распыляется расход воды, требуемый для ассимиляции оставшихся тепловых избытков. Воздух охлаждается до параметров точки O (рис. 2), далее снова нагревается по лучу процесса ε до +33 °C, снова орошается водой и остывает и т.д. Цикл «нагрев-орошение» можно повторять в течении всего времени работы метрополитена, когда происходит перегрев воздуха.

Моделирование процесса орошения воздуха в тоннеле осуществлялось в программном пакете ANSYS Fluent. Для моделирования испарения жидкостей существуют несколько подходов [8-12]. В данной работе использован подход Эйлера-Лагранжа, когда дискретная фаза в виде капель задается на входе в расчетную область. Преимущество этого подхода доказано в работе [13].

Математическая модель основана на усредненных уравнениях Навье-Стокса с учетом межфазного взаимодействия, замкнутого с помощью k - ε модели

турбулентности. Модель учитывает двустороннее взаимодействие жидкой и газообразной фаз, перенос импульса, энергии и массы [14]. Сила сопротивления частиц рассчитывается по модели Шиллера-Науманна, теплопередача в окружающую среду моделируется с использованием подхода Ранца-Маршалла [15]. Межфазный массоперенос зависит от того, находится ли давление насыщенного пара капли выше или ниже точки кипения. Точка кипения определяется уравнением Антуана, описывающим связь между давлением насыщенных паров и температурой для чистых компонентов.

Исходные данные

В двухпутный тоннель требуется подавать расходы воздуха 90–135 м³/с [16–17]. При этом, как уже было сказано выше, часть тепловых избытков удаляется за счет подачи в тоннель наружного воздуха, а оставшиеся теплоизбытки путем орошения тоннельного воздуха. Расход воды на орошение $G_{\text{ж}}$ будет определяться через отношение неудалённых теплоизбытков Q_o и теплоты парообразования r :

$$G_{\text{ж}} = Q_o / r = (Q_{\Sigma} - Q_{\text{в}}) / r.$$

В табл. 1 приведен требуемый расход воды при различных расходах воздуха.

<i>Таблица 1</i>		
Подаваемый расход воздуха, м ³ /с	90	135
Требуемый расход воды на один перегон $G_{\text{ж}}$, кг/с	0.417	0.301

Для того, чтобы капли при таких расходах воды полностью испарялись в тоннеле, не достигая кожуха контактного рельса, требуется использование форсунок высокого давления. Системы увлажнения воздуха с форсунками высокого давления работают с давлением 40–100 кгс/см², которое обеспечивается плунжерными насосами [18].

При использовании системы АОВ, наибольшая нагрузка на неё приходится в расчетные часы. Расчетный час определяется невыгодным сочетанием характеристик наружного и внутреннего климата. За расчетный час по наружному воздуху принимаются время наступления максимальной температуры наружного воздуха в наиболее жаркие летние сутки, для условий Москвы это 15 часов [19]. Что касается внутреннего климата, определяющую роль в тепловом балансе помещений метрополитена, а значит и для определения расчетных часов, играют теплопоступления от ходовой части поездов [20], они главным образом зависят от частоты движения поездов и пассажиропотока и наибольшие значения приобретают в часы-пик. В работе [1] показано, что наиболее неблагоприятный с этой точки зрения промежуток времени с 16 до 17 часов. Наибольшие теплоизбытки в этот час образуются в результате повышения пассажиропотока и частоты движения поездов, а наибольший требуемый расход наружного воздуха ещё и потому, что в этот час невелика разница температур внутреннего и наружного

воздуха. Исследования проводились для двухпутного тоннеля глубиной заложения 20 м. Это обусловлено тем, что для этого случая, ввиду того, что тепловые избытки максимальны, а температура наружного воздуха высокая, будет иметь место наибольший требуемый расход воды. Если для этого случая заданный расход воды будет полностью испаряться, не достигая кожуха контактного рельса, то и для всех остальных случаев это условие будет выполняться.

Геометрия тоннеля принята по [17]. Исследования проводились для расчётной области в виде участка тоннеля длиной 200 м, в котором расположены 48 форсунок (12 рядов по 4 форсунки), расстояние от входа до первого ряда форсунок равно 5 гидравлическим диаметрам тоннеля, чтобы орошаемый водой поток воздуха имел установившийся режим движения. На входе в расчетную область задавалась скорость воздуха. Температура исходная 306 К (+33 °С). Приняты следующие допущения: стенка гладкая, адиабатическая, массовое содержание воды в воздухе равно нулю. Задача решалась в стационарной постановке, так как для исследования расчетной области, приближенной к натуральным размерам участка, не хватает вычислительной мощности компьютера при решении нестационарной задачи. Для каждой из 48 форсунок задавались следующие параметры: диаметр, соответствующие ему расход воды и давление впрыска, температура воды, угол распыла принимался постоянный, равный 120°.

Результаты

Было проведена серия численных экспериментов – изменялись параметры форсунок (диаметр, расход, давление) и расход воздуха на входе в расчетную область. На рис. 3 представлены массовая доля воды в воздухе и размеры частиц в продольном сечении по центру тоннеля для случая с полным испарением влаги до её достижения уровня кожуха контактного рельса (расход воздуха 135 м³/с, диаметр форсунки 300 мкм, расход воды через одну форсунку 0.00265 кг/с, давление перед форсункой 58 МПа).

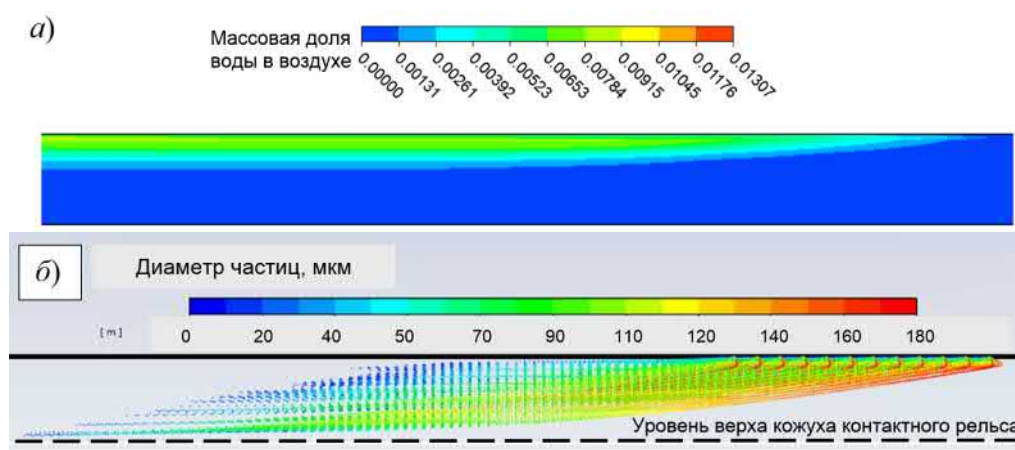


Рис. 3. Результаты вычислительного эксперимента для случая полного испарения влаги до достижения ею уровня кожуха контактного рельса в продольном сечении тоннеля: а) массовая доля воды в воздухе; б) распределения облака орошения и размеры частиц

На рис. 4 показан случай, когда вода не успевает полностью испариться в воздухе и достигает поверхности путей из-за недостаточного напора перед форсунками (расход воздуха 135 м³/с, диаметр форсунки 300 мкм, расход воды через одну форсунку 0.0018 кг/с, давление перед форсункой 25 МПа).

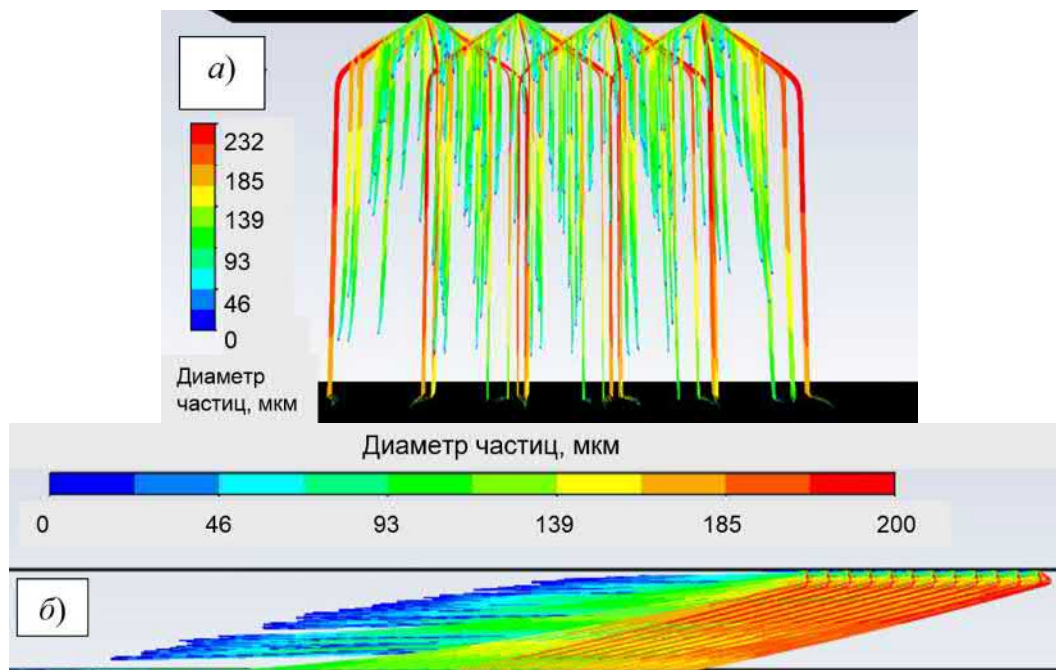


Рис. 4. Распределения облака орошения и размеры частиц в случае, когда частицы воды не успели полностью испариться и достигли поверхности путей тоннеля:

а) вид с торца тоннеля; б) вид в продольном разрезе тоннеля

Обсуждение

По результатам численного расчета, для случая на рис. 3 (расход воздуха 135 м³/с, расход воды через одну форсунку 0.00265 кг/с, 48 форсунок), на рассматриваемом участке длиной 200 м среднеобъемная температура воздуха после испарения воды составила 304.15 К, то есть изменение температуры в результате численного моделирования составило $\Delta t_{\text{ч}} = 1.85$ К от заданной температуры 306 К.

Аналитически изменение температуры воздуха Δt , К, можно рассчитать по формуле:

$$\Delta t = Q_o / (c_v L_v \rho_v) = G_{\text{ж}} r / (c_v L_v \rho_v),$$

где Q_o – теплоизбытки, неудаленные вентиляцией, кВт; c_v – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); L_v – расход воздуха, м³/с; ρ_v – плотность воздуха, кг/м³; $G_{\text{ж}}$ – расход воды на орошение, кг/с; r – теплота парообразования воды, 2258 кДж/кг.

Для случая на рис. 3 получаем $\Delta t_a = 0.00265 \cdot 48 \cdot 2258 / (1.005 \cdot 135 \cdot 1.2) = 1.76$ К. Расхождение численного и аналитического решения в данном случае составило 4.86 %.

При диаметре форсунки 400 мкм, расходе 0.00325 кг/с и давлении перед форсункой 70 МПа среднеобъемная температура по результатам численного расчета составляет 303.8 К, $\Delta t_{\text{ч}} = 2.07$ К. Аналитически получается $\Delta t_a = 2.16$ К. При диаметре форсунки 500 мкм, расходе 0.00445 кг/с и давлении перед форсункой 75 МПа $\Delta t_{\text{ч}} = 2.84$ К, а $\Delta t_a = 2.96$ К. Расхождение соответственно 4.17 и 4.05 %.

При максимальных значениях расхода воздуха ($135 \text{ м}^3/\text{с}$), давления (84 МПа) и расхода воды (1.5 т/ч) при использовании форсунки диаметром 500 мкм, когда капли воды полностью испаряются в тоннеле и не достигают контактного рельса, мощность насосного оборудования составит 50 кВт [22], производительность одного вентилятора $67.5 \text{ м}^3/\text{с}$, мощность 104 кВт.

Заключение

Предложено удаление теплоизбытков с помощью адиабатического охлаждения тоннельного воздуха. Для условий московского метрополитена удаление теплоизбытков путем увеличения подаваемого расхода воздуха требует установки шахтных вентиляторов с расходом воздуха до $279 \text{ м}^3/\text{с}$ и мощностью до 730 кВт, что приведет к высоким капитальным и эксплуатационным затратам. Проведено численное моделирование распыления воды в путевом пространстве тоннеля, определены режимы работы форсуночных устройств таким образом, чтобы испарение воды происходило до достижения частицами жидкости кожуха контактного рельса. При этом расхождение результатов численного моделирования с аналитическим решением составило от 4.05 до 4.86 %. Показано, что АОВ значительно снижает требования к вентоборудованию – максимальная производительность одного вентилятора составит $67.5 \text{ м}^3/\text{с}$ при затрачиваемой мощности 104 кВт, мощность насосного оборудования не превысит 50 кВт при расходе воды $1.5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Работа выполнена в рамках научной темы FWNZ-2021-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алферова Е. Л., Лугин И.В. К вопросу создания и поддержания требуемых параметров внутреннего воздуха в тоннелях метрополитена в теплый период года // ГИАБ. – №11. – 2018. – С. 63-69.
2. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. – Москва: Недра, 1975. – 237 с.
3. Krasnyuk A. M., Lugin I. V., P'yankova A. Yu. Delineation of soil body area exposed to thermal effect of subway stations and tunnels // Journal of Mining Science. – 2015. – Т. 51. – № 1. – Р. 138-143.
4. СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003.– Введ. 01-01-2013. Москва: [б.и.], 2012. – 267 с.
5. Мохирев Н. Н. Инженерные расчеты вентиляции шахт: Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: Недра, 2007. – 324 с.

6. Вишневский Е. П. Адиабатическое охлаждение воздуха в современном ЦОДе // ИКС. – 2012. – №06. – С. 83-84.
7. Лугин И. В., Алферова Е. Л. Теоретические основы создания микроклимата помещений: учебн. пособие. – Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2016. – Ч. 1. – 48 с.
8. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Захарова Ю.В. Моделирование гидрогазодинамических процессов в ПК ANSYS 17.0: учеб. Пособие. – Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2016. – 168 с.
9. ANSYS Tutorial: Modeling Evaporation of Liquid Droplets in a Circular Channel
10. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Захарова Ю.В., Данилов М.Н. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
11. Моделирование распылительных устройств в ANSYS Fluent. /Научный канал «Аль-кулер». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.youtube.com/watch?v=Nl2mbIDcKPw>.
12. ANSYS Fluent Theory Guide. Published in the U.S.A/ 2014-2015 SAS IP, Inc.
13. H. Montazeri, B. Blocken, J.L.M. Hensen. Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis // Building and Environment. - 2015. – №83. – P.129-141.
14. Габарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. – СПб.: Издательство Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
15. Ranz W.E., Marshal W.R., Jr. Evaporation from Drops. Part I and Part II // Chem. Eng. Prog. – 1952. – № 48(4). – P. 173-180.
16. Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Alferova E.L., Kiyanitsa L.A. Evaluation of ventilation flow charts for double-line subway tunnels without air chambers // Journal of Mining Science. – 2016. – Т. 52. – № 4. – P. 740-751.
17. Lugin I.V., Alferova E.L. Integrated performance analysis of ventilation schemes for double-line subway tunnel // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. – P. 012043.
18. Промышленные увлажнители воздуха и генераторы тумана. Форсунки [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://par-tuman.ru/forsunka1>
19. Богословский В.Н. Отопление и вентиляция. Часть 2. Вентиляция. – М. : Стройиздат, 1976. – 439 с.
20. Красюк А. М., Лугин И. В. Вентиляция метрополитенов. – Новосибирск: СО РАН: Наука: Изд-во СО РАН, 2019. – 316 с.
21. Внутренние санитарно-технические устройства. Справочник проектировщика. Ч.1. Отопление. Под ред. И. Г. Староверова, Ю. И. Шиллера. – М.: Интеграл, 2008. - 344 с.

© Е. Л. Алферова, 2021

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ВРЕМЕННОГО ЦЕЛИКА ПРИ ВЫЕМКЕ ПОЛОГОЙ РУДНОЙ ЗАЛЕЖИ С ЗАКЛАДКОЙ И ОБРУШЕНИЕМ

Сергей Юрьевич Васичев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, соискатель лаборатории подземной разработки рудных месторождений, тел. (962)822-21-19, e-mail: s.vasichev@yandex.ru

Александр Алексеевич Неверов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории подземной разработки рудных месторождений, тел. (923)220-02-79 e-mail: nnn_aa@mail.ru

Предложен способ отработки мощных пологих рудных залежей на больших глубинах в условиях снижения ценности добываемого минерального сырья. Выявлено, что безопасное освоение системы разработки с твердеющей закладкой и обрушением достигается установлением параметров устойчивых пролетов камер, на месте которых формируются искусственные опоры и временных рудных целиков, погашаемых с отставанием от камерной выемки технологией с обрушением руды и вмещающих пород. Показано, что в зависимости от типа геомеханической модели геосреды и ориентации исходных природных напряжений действующих в массиве пород месторождения относительно фронта ведения горных работ область применения системы разработки ограничивается глубиной и параметрами выемки. Применительно к массивам с разной степенью нарушенности установлены прогнозные участки возможных разрушений пород в элементах технологии.

Ключевые слова: пологая залежь, массив горных пород, система разработки, искусственный целик, рудный целик, камера, пролет, обрушение, напряженно-деформированной состояние, устойчивость, безопасность

EVALUATION OF THE STABILITY OF A TEMPORARY PILLAR WHEN MINING ORE HORIZONS WITH BACKFILLING AND CAVING

Sergey Yu. Vasichev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Researcher, Laboratory of Underground Ore Mining, office: +7 (962) 822-21-19, e-mail: s.vasichev@yandex.ru

Alexander A. Neverov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Laboratory of Underground Ore Mining, office: +7 (923) 220-02-79 e-mail: nnn_aa@mail.ru

A method is proposed for mining thick and flat ore deposits at great depths in conditions of a decline in the value of extracted mineral raw materials. It is found that safe mining with solidifying backfill and caving is achieved by determining the parameters of stable spans of rooms, in place of which artificial supports and temporary ore pillars are formed. These pillars are recovered with a lag

behind room-and-pillar mining by caving of ore and enclosing rocks. It is shown that, depending on the type of geomechanical model of geomedium and orientation of the initial natural stresses acting in the rock mass relative to the mining front, the field of application of the mining system is limited by the depth and parameters of excavation. Predictive areas of possible rock failure are determined applicably to rock masses with different degree of disturbance.

Keywords: flat deposit, rock mass, mining system, artificial pillar, ore pillar, room, span, caving, stress-strain state, stability, safety

Введение

Проблема снижения полезного компонента в добываемом сырье с ростом глубины отработки на большинстве месторождений, а также выемка руд невысокой ценности в настоящее время относится к разряду весьма актуальных. Увеличение глубины освоения запасов ведет к усложнению горно-геологических и геомеханических условий выемки. Вследствие этого эффективность деятельности горнодобывающих предприятий в значительной степени определяется выбором таких технологий добычи руды, которые максимально адаптированы к протекающим геомеханическим процессам.

В мировой практике с ростом глубины разработки рудных залежей все большее распространение получают различные варианты ведения горных работ с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями [1-6]. Однако при снижении качества извлекаемого сырья, а также выемке руд средней и малой ценности технологии со сплошной закладкой выработанного пространства не обеспечивают конкурентоспособность и рентабельность добычи. В этой связи в ряде месторождений на глубинах 1000 м и более используют системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород [7-8]. Применение вариантов выемки с обрушением на таких глубинах, как и систем разработки с открытым выработанным пространством, обуславливают, с одной стороны, существенное снижение издержек производства по сравнению с технологиями с закладкой, с другой — рост потерь и разубоживания руды.

Одним из перспективных приемов повышения эффективности добычи и снижения отрицательного влияния больших глубин является разработка комбинированных технологий выемки, основанных на совмещении разных способов управления горным давлением. В этой связи в статье приводится обоснование параметров временного рудного целика при использовании технологии выемки с закладкой и обрушением [5-6].

Способ разработки

Принципиальная схема способа разработки приведена на рис. 1. Особенностью его является выемка одной части залежи технологией с твердеющей закладкой, другой — с обрушением. Первично отрабатываются запасы, на месте которых возводят закладочные массивы. Во вторую стадию с отставанием от искусственных опор гасятся временные рудные целики с обрушением налегающих пород. При этом основными условиями их безопасного и эффективного извлечения являются

обеспечение подбучивания боковых обнажений закладочных массивов обрушенной породой и исключения заброса отбиваемой руды в выработанное пространство.

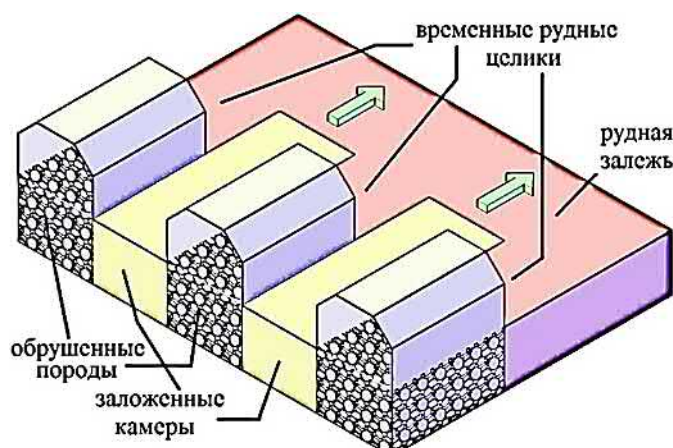


Рис. 1. Принципиальная схема комбинированной технологии с закладкой и обрушением: стрелка – направление фронта выемки

Метод исследований

В качестве математической модели решения краевой задачи принята модель сплошной упругой среды [9-11]. Сформулируем прямую задачу установления характера изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород (рис. 2) в элементах технологии выемки.

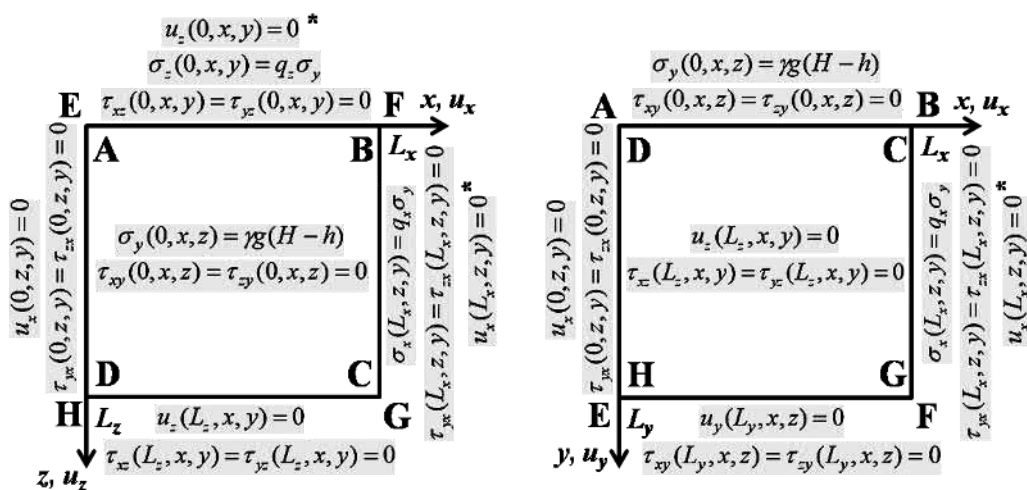


Рис. 2. Схема расчетной области с постановкой задачи: * – для условий гравитационного природного поля напряжений; σ_y , σ_x , σ_z , и τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} – соответственно вертикальная и горизонтальные нормальные и касательные компоненты тензора напряжений; γ – плотность пород; g – ускорение свободного падения; u_y , u_x , u_z – вертикальная и горизонтальные компоненты вектора перемещений; q – коэффициент бокового распора (давления); H – глубина выемки; h – расстояние от верхней границы модели до почвы залежи

В системе координат x, y, z задан параллелепипед – расчетная область ($0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z$). Предполагается, что массив горных пород проявляет только упругие свойства, тогда деформации и напряжения определяются из системы дифференциальных уравнений в частных производных, включающих:

$$\text{уравнения равновесия: } \sigma_{ij,j} + pF_i = 0, \quad (1)$$

$$\text{уравнения Коши: } \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (2)$$

$$\text{физические соотношения – закон Гука: } \sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\theta\delta_{ij}, \quad (3)$$

и граничные условия (см. рис. 2):

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений ($\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$, и $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$); $pF_i = \gamma g \delta_{ij}$ – объемные силы; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций ($\varepsilon_y, \varepsilon_x, \varepsilon_z$ и $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ – соответственно вертикальная и горизонтальные главные линейные и угловые компоненты тензора деформаций); u_i – компоненты вектора перемещений (u_y, u_x, u_z); $\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ – относительная объемная деформация; G и λ – параметры Ламе $G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \lambda = \frac{E\mu}{(1-2\mu)(1+\mu)}$; δ_{ij} – символ Кронекера; μ – коэффициент Пуассона.

Краевая задача – рис. 2 и (1) – (3) реализуется методом конечных элементов (МКЭ) и сводятся к решению системы линейных соотношений МКЭ [9-11]:

$$[K]\{\delta\} = \{F\}, \quad (4)$$

где $[K]$ – матрица жесткости системы; $\{\delta\}$ – вектор перемещений всех узлов; $\{F\}$ – вектор узловых нагрузок (векторы граничных и объемных сил).

Расчеты выполнялись для статических значений деформационных характеристик горных пород, характерных для полиметаллических рудных залежей Норильского региона (табл.).

Физико-механические свойства массива пород

Наименование	Плотность (γ), кг/м ³	Сцепление (C), МПа	Угол внутреннего трения (φ), град	Коэффициент Пуассона (μ)	Модуль Юнга (E), ГПа
Вкрапленная руда	4000	15-40	35-55	0,25	50
Габбро-долерит	2700	12-33	33-52	0,23	55
Доломиты, известняки	2750	25-36	40-50	0,27	57
Твердеющая закладка	2000	1,4	25	0,35	3,0

Для обоснования параметров временных рудных целиков в качестве геомеханических условий была использована типизация рудных месторождений по типу исходного природного напряженного состояния массива пород [5, 12-13]. Согласно ее использовались 4 типа геомеханических моделей геосреды.

1. Геодинамическая – ($q = 2,7$):

$$\sigma_y = \gamma g H, \sigma_x = q_x \sigma_y \approx s q^\eta \ln(\gamma H) - w, \sigma_z = q_z \sigma_y \approx 0,5(\sigma_x + \sigma_y), \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0, \quad (5)$$

Границы изменения q_x и q_z находятся в пределах $1,3 \leq q \leq 5,0$.

2. Тектоническая – ($q = 2$):

$$\sigma_y = \gamma g H, \sigma_x = q_x \sigma_y \approx 2,8 e^{\eta q} \gamma H^{0,7}, \sigma_z = q_z \sigma_y \approx \sigma_y, \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0, \quad (6)$$

η – эмпирический коэффициент, учитывающий деформационно-прочностные свойства пород. Для прочных пород $\eta = 0,17-0,30$, для пород средней прочности и ниже $\eta = 0,10-0,17$; s и w – эмпирические коэффициенты $s \approx 32-37$, $w \approx 65-80$. Границы изменения q_x и q_z $1,0 \leq q \leq 2,0$.

3. Геостатическая (гипотеза Гейма) – ($q = 1$):

$$\sigma_y = \gamma g H \approx \sigma_x \approx \sigma_z \text{ или } \sigma_x \approx \sigma_z \approx q \sigma_y, \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0, \quad (7)$$

$q = \sigma_{h, \max} / \sigma_v = 0,8 \div 1,2$ – коэффициент бокового давления.

4. Гравитационная (гипотеза Динника) – ($q = 0,283$):

$$\sigma_y = \gamma g H, \sigma_x = \sigma_z = q \sigma_y, \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0, \quad (8)$$

$q = \mu / (1 - \mu)$ – коэффициент бокового распора.

Для определения устойчивости временных рудных целиков использовались критерии хрупкого и сдвигового (вязкого) разрушения [5-6, 14-20]. Это теория наибольших нормальных напряжений (9) и Кулона-Мора (10). Повышение надежности расчетов устойчивости массива пород (K) осуществлялось через коэффициент структурного ослабления (K_c):

$$K_{\sigma_1} = \frac{K_c \sigma_{сж}}{\sigma_1} > 1, K_{\sigma_3} = \frac{K_c \sigma_p}{|\sigma_3|} > 1 \quad (9)$$

$$K_y = \frac{2C \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (10)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения, берутся из решения МКЭ, МПа; $\sigma_{сж}$, σ_p – предел прочности породы на сжатие и растяжение, МПа; C – сцепление пород, МПа; ϕ – угол внутреннего трения.

Значения $K < 1$ характеризуют области возможных разрушений пород.

На рис. 3 представлены особенности моделируемой конструкции, реализованные в центральной части расчетной области (см. рис. 2).

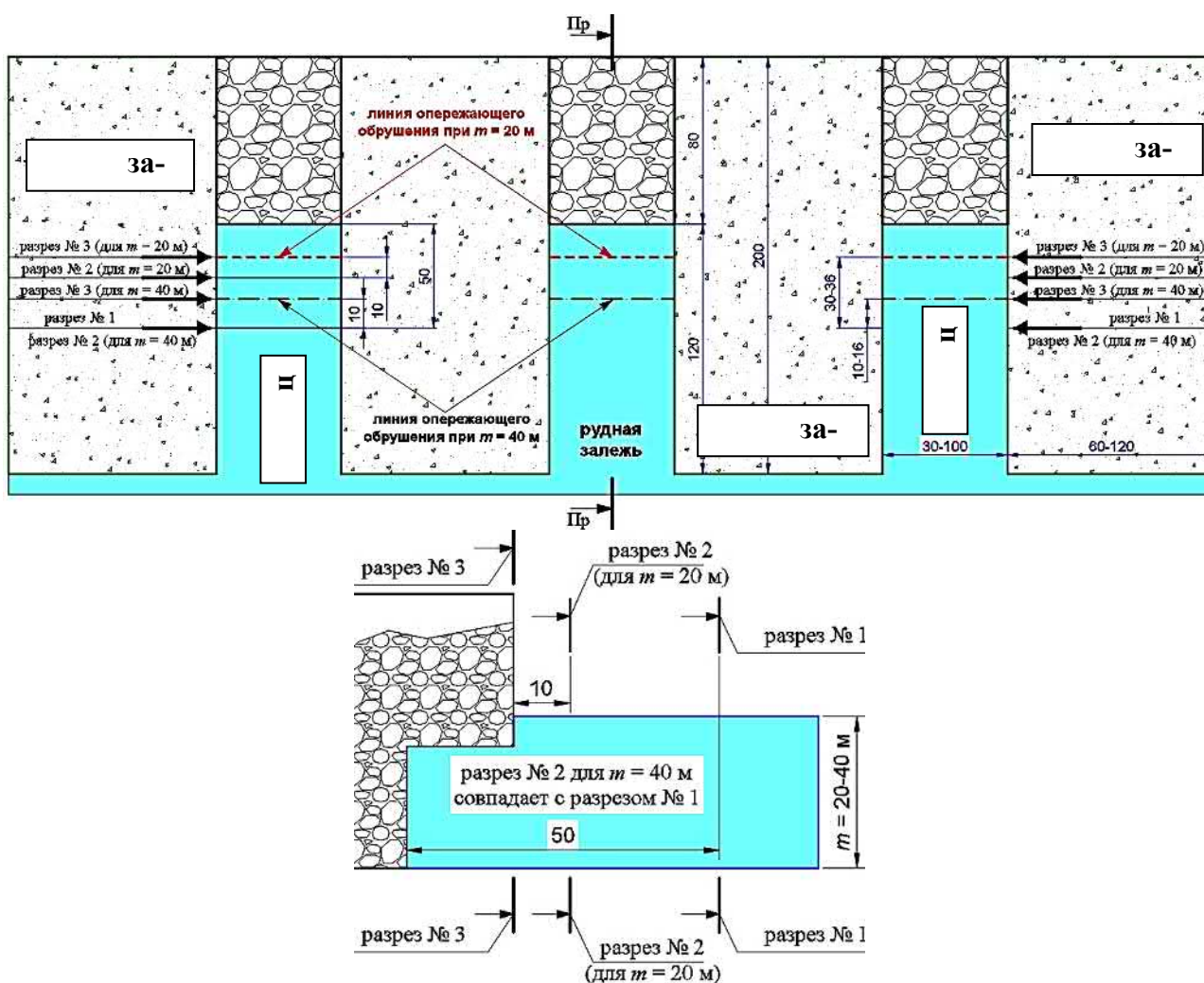


Рис. 3. Конструктивные особенности технологии при моделировании НДС и устойчивости массива пород, соответственно план и продольный разрез по целику Пр

Оценка результатов моделирования осуществляется посредством изолиний максимального касательного ($\tau_{\max}$) и зависимостей главных (σ_1 и σ_3) напряжений, а также отрисованных зон разрушений массива пород.

Результаты моделирования и их анализ

На рис. 4 представлена часть результатов определения НДС массива пород в виде картин распределения напряжений $\tau_{\max}$ в вертикальном сечении поперек панелей в 50 м от забоя временного рудного целика (разрез № 1 см. рис. 3) в зависимости от глубины и параметров выемки. В данном случае основную пригрузку $\tau_{\max}$ и σ_1 воспринимают временные рудные целики, которые в независимости от геомеханической модели геосреды с увеличением глубины разработки (800-2000 м) возрастает более чем в 2,5 раза. При этом характер изменения напряжений вдоль центральной оси целика принимая во внимание мощность залежи,

свидетельствует, во-первых, о существенном влиянии на их величины опережающего обрушения, и во-вторых, о наличии повышенных сжимающих σ_1 и сдвиговых $\tau_{\max}$ усилий в массивах с гравитационным типом геосреды. Усилия $\tau_{\max}$ в условиях $q = 0,283$ в среднем в 1,2-1,5 раза больше, чем в варианте при $q = 2$; в 1,4-1,8 раза – при $q = 1$; до 1,4 раза – при $q = 2,7$.

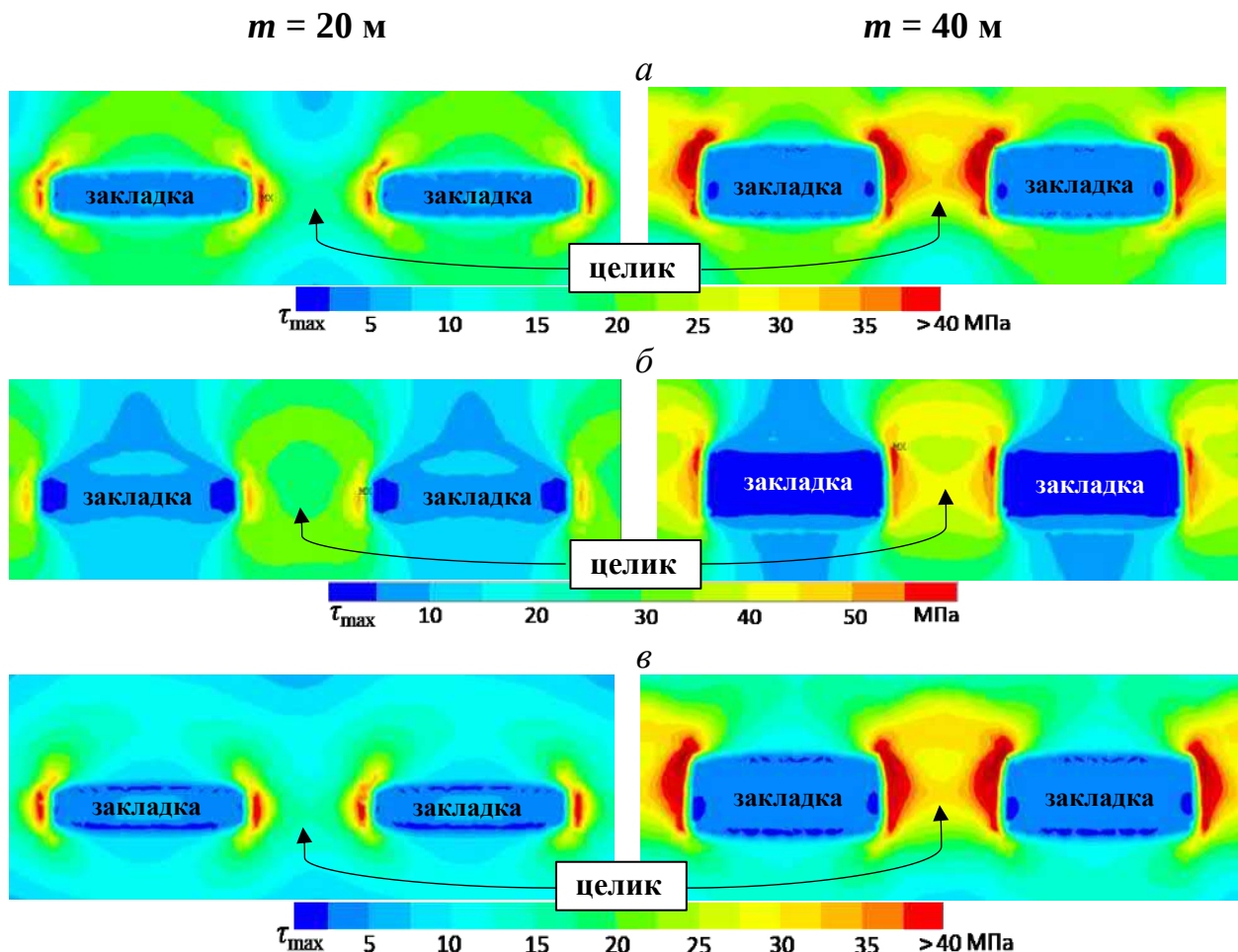


Рис. 4. Усилия $\tau_{\max}$ в разрезе № 1 при ориентации максимальной горизонтальной компоненты природного поля напряжений ($\sigma_{h,\max}$) поперек панелей, $B_k = 100$ м, $B_{ц} = 60$ м, $H = 2000$ м для условий тектонической (а), гравитационной (б) и геостатической (в) моделях геосреды

Общая тенденция влияния мощности залежи (m) на НДС временного рудного целика свидетельствует об неоднозначности распределения вдоль него напряжений (рис. 5). С ростом m от 20 до 60 м при ширине целика ($B_{ц}$) более 60 м в центральной части рудного целика наблюдается снижение как максимальных сжимающих σ_1 , так и сдвиговых усилий $\tau_{\max}$ соответственно в 1,2-1,25 и 1,3-1,4 раза. С уменьшением $B_{ц}$ от 60 до 30 м тенденция снижения σ_1 с ростом m на больших глубинах сохраняется, а на меньших (800 м) практически отсутствует влияние m на НДС рудного целика.

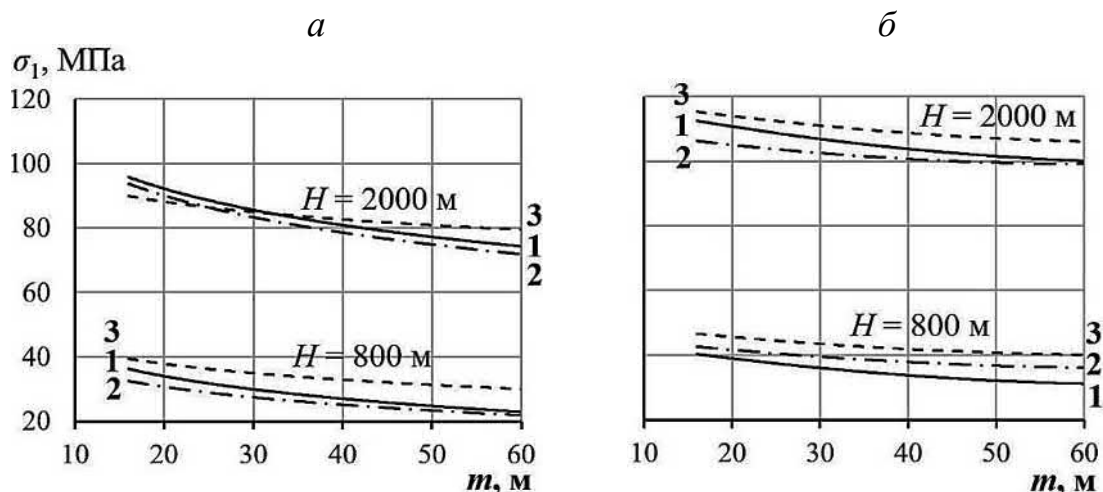


Рис. 5. Изменение σ_1 в центре рудного целика по разрезу № 3 в зависимости от m , H и q при $B_k = 100$ м: а – при $B_{ц} = 60$ м; б – $B_{ц} = 30$ м
1 – $q = 2$; 2 – $q = 1$; 3 – $q = 0,283$

Установлено, что увеличение ширины временного рудного целика ($B_{ц}$) от 30 до 100 м в независимости от типа геомеханической модели геосреды в условиях сверхглубин ($H = 2000$ м) приводит к более существенному снижению в нем максимальных сжимающих напряжений σ_1 – в 1,85 раза и на меньших глубинах ($H = 800$ м) – в 1,5 раза. При этом максимальные нагрузки испытывают рудные целики в условиях $q = 0,283$, минимальные – при $q = 1$ (рис. 6).

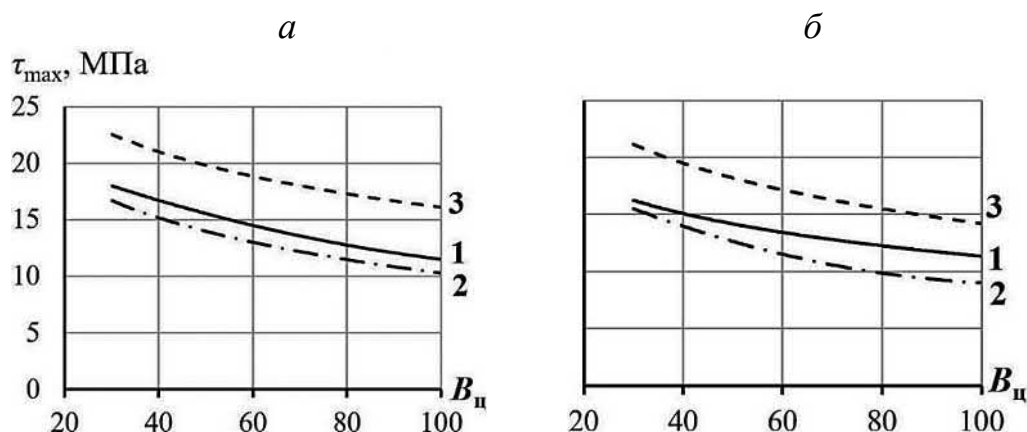


Рис. 6. Изменение τ_{max} в центре рудного целика при отработке залежи с $m = 20$ м в зависимости от его ширины и q при $B_k = 100$ м, $H = 800$ м, ориентация $\sigma_{h,max}$ (при $q = 2$ и 2,7) поперек панелей: а – в разрезе № 2; б – в разрезе № 3
1 – $q = 2$; 2 – $q = 1$; 3 – $q = 0,283$

Увеличение ширины камеры (B_k) от 30 до 100 м, а, следовательно, пролета отработки, приводит к росту сжимающего σ_1 и сдвигового $\tau_{\max}$ давления в центре рудного целика в среднем для варианта $q = 2$ – в 1,5-1,7 раза, для $q = 0,283$ – в 1,3-1,45 раза, для $q = 1$ – в 1,85-2,0 раза и для $q = 2,7$ – в 1,4-1,5 раза (рис. 7). В данном случае меньший рост относится к $m = 20$ м, больший – $m = 40$ м.

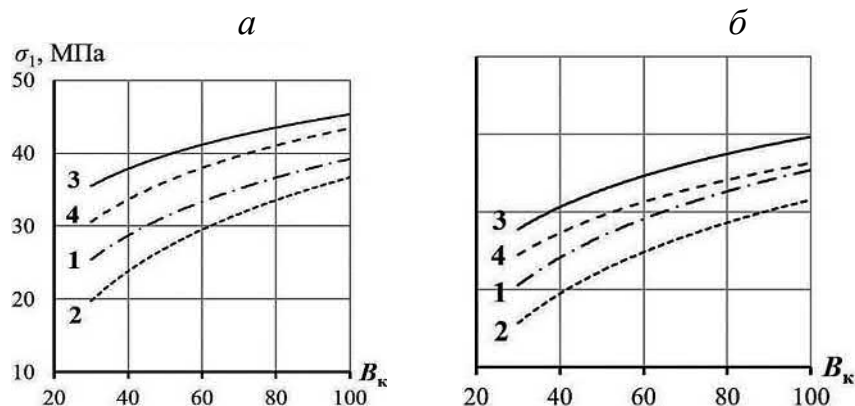


Рис. 7. Изменение σ_1 в центре рудного целика по разрезу № 2 в зависимости от B_k и q при $H = 800$ м, $B_{\text{ц}} = 60$ м, ориентация $\sigma_{h,\max}$ (при $q > 2$) поперек панелей: а – при $m = 20$ м; б – $m = 40$ м. 1 – $q = 2$; 2 – $q = 1$; 3 – $q = 0,283$; 4 – $q = 2,7$

Численным моделированием выявлено, что в призабойной части целика, находящегося в защитной зоне опережающего обрушения, уменьшение σ_1 и $\tau_{\max}$ при ориентации $\sigma_{h,\max}$ поперек панелей по сравнению с действием $\sigma_{h,\max}$ вдоль их составляет – 10-15 % (рис. 8). При этом в абсолютных значениях напряжений отмечается существенное их снижение при росте мощности залежи от 20 до 40 м. Обусловлено это тем, что при мощности залежи 40 м защитная зона больше, чем при $m = 20$ м, поэтому разгружающий эффект призабойной области значительнее.

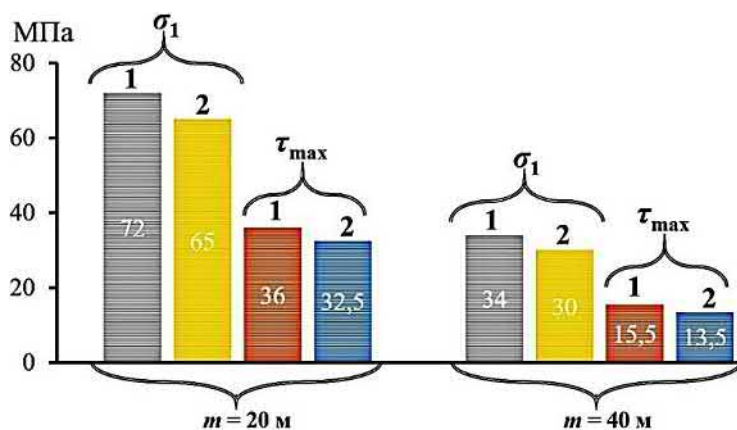


Рис. 8. Сравнительная оценка напряжений в центре рудного целика в призабойной его части (8 м от забоя) в зависимости от m и направления фронта выемки относительно действия $\sigma_{h,\max}$ в массиве при $B_k = 100$ м, $B_{\text{ц}} = 60$ м и $H = 2000$ м: 1 – при ориентации $\sigma_{h,\max}$ вдоль панелей; 2 – тоже поперек

На рис. 9 показан характер формирования участков потерь устойчивости пород во временном рудном целике в зависимости от коэффициента бокового давления при мощности 20 м на глубине 1700 м.

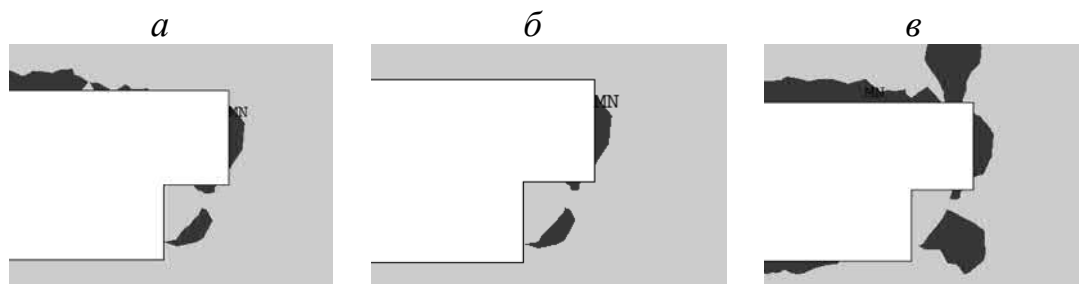


Рис. 9. Зоны вероятных разрушений пород по критерию Кулона-Мора вдоль целика (разрез Пр, см рис. 3) при коэффициенте структурного ослабления (K_c) 0,45 (средненарушенный массив) в зависимости от q при $H = 1700$ м, $m = 20$ м, $B_k = 100$ м, $B_{ц} = 60$ м, ориентации $\sigma_{h,max}$ поперек панелей
 $a - q = 2$; $b - q = 1$; $v - q = 0,283$

Установлено, что в условиях действия горизонтальных напряжений ($q \geq 1$) при увеличении m с 20 до 40 м наблюдается уменьшение размеров зон потерь устойчивости массива в призабойной области рудного целика как за счет хрупкого (трещины отрыва), так и вязкого (под влиянием касательных сдвигающих усилий) разрушений. В варианте $q = 0,283$ – зона разрушений распространяется практически на всю мощность залежи, но при этом основным местом ее расположения является линия опережающего обрушения.

Заключение

1. Способ разработки рудных залежей, предусматривающий технологии выемки с закладкой и обрушением, является альтернативным вариантом системам с полной закладкой выработанного пространства, обеспечивающим безопасность горных работ на глубоких горизонтах в условиях снижения ценности и качества добываемого сырья.

2. Сохранность целиков на стадии ведения очистных работ в пределах рабочей зоны (призабойное пространство по рудному целику) в тектонически напряженных массивах ($q > 1$) на глубинах до 1600 м обеспечивается при $B_k > 40-60$ м, $B_{ц} > 60$ м. Гарантированное плавное смещение пород кровли позади общего фронта выемки достигается при $B_k \leq 40-80$ м, $B_{ц} = 80-120$ м. В условиях массивов с $q = 0,283$ безопасными как на стадии выемки, так и позади общей зоны отработки на глубинах до 1300-1400 м являются параметры целиков: $B_k = 60-100$ м, $B_{ц} = 60-100$ м (т.е. с одинаковыми пролетами).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айнбиндер И.И. Особенности геомеханического состояния массива горных пород на глубоких горизонтах рудников "Интернациональный" и "Мир" / И.И. Айнбиндер, О.В. Овчаренко // Горный информационно-аналитический бюллетень ГИАБ (научно-технический журнал). – 2020. – № 11. – С. 57-69.
2. Вильчинский В. Б., Трофимов А. В., Корейво А. Б., Галаов Р. Б., Марысюк В. П. Обоснование целесообразности применения систем разработки с закладочными смесями на рудниках Талнаха // Цветные металлы. 2014. № 9. С. 23-28.
3. Eremenko, A.A., Darbinyan, T.P., Aynbinder, I.I., Konurin, A.I. Geomechanical assessment of rock mass in the Talnakh and Oktyabrsky deposits // Gornyi Zhurnal, 2020, 2020(1), pp. 82–86
4. Айнбиндер И.И. Основные направления развития геотехнологий подземной разработки рудных месторождений на больших глубинах / И.И. Айнбиндер, Ю.П. Галченко, О.В. Овчаренко, П.Г. Пацкевич // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 65-71.
5. Неверов А.А. Обоснование геотехнологий выемки рудных месторождений на основе развития модельных представлений об изменении параметров природного поля напряжений / А.А. Неверов, С.А. Неверов, А.П. Тапсиёв, С.А. Щукин, С.Ю. Васичев // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. с 74-90.
6. Vasichev S. Yu.. Ground control with backfill and caving in deep-level mining of gently dipping ore bodies / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 523, Subsurface Management. Exploration and Mining Technologies. Economics. Geoecology 24-26 April 2019, Novosibirsk, Russia Citation SYu Vasichev 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 523 012022. DOI:10.1088/1755-1315/523/1/012022.
7. Голик В.И. Исследование безопасности параметров системы разработки с обрушением / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, Н.М. Качурин, В.И. Ляшенко // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 1. – С. 16-20.
8. Голик В.И. Совершенствование параметров выпуска руд при подэтажном обрушении с торцовым выпуском / В.И. Голик, А.А. Белодёдов и др. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 1. – С. 150-159.
9. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. & Zhu, J.Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 6th edn.
10. Li, X., He, S., Luo, Y. & Wu, Y. (2012). Simulation of the sliding process of Donghekou landslide triggered by the Wenchuan earthquake using a distinct element method. *Environmental Earth Sciences*, 65, 1049–1054.
11. Xue Zhang, BEng, MEng. Particle Finite Element Method in Geomechanics / Faculty of Engineering and Built Environment. The University of Newcastle, September 2014. Australia <https://www.researchgate.net/publication/301351333>.
12. Неверов С.А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Ч. 2: Тектонотипы рудных месторождений и модели геосреды / С.А. Неверов // ФТПРПИ. — 2012. — № 3.
13. Неверов С.А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Часть I. Современные представления о напряженном состоянии массивов горных пород с ростом глубины / С.А. Неверов // ФТПРПИ. – 2012. – № 2. – с. 56-70.
14. Neverov A. A., Konurin A. I., Shaposhnik Yu. N., Neverov S. A., Shaposhnik S. N. Geomechanical substantiation of sublevel-chamber system of developing with consolidating stowing // 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2016: science and technologies in geology, exploration and mining, vol. II, jun. 30-jul. 06, 2016. – Albena, Bulgaria. – P. 443-450.
15. Wael R. Abdellah. Evaluation of the Effect of Rock Joints on the Stability of Underground Tunnels / Wael R. Abdellah, Mahrous A. M. Ali, Gamal Y. Boghdady and Mohamed E. Ibrahim // Journal of Civil Engineering and Architecture Research – November 25, 2016.

16. Feng D.-K., Zhang J.-M., Hou W.-J. Three-dimensional direct-shear behaviors of a gravel-structure interface, 2018, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144(12), 04018095.
17. Berkane, A., Karech, T. Numerical modeling of the pathological case of a damaged tunnel application to Djebel El-Ouahch tunnel (east–west highway), 2018, Asian Journal of Civil Engineering, 19(8), с. 913-925.
18. Wei X., Li C., Zhou X., Hu B., Li W. The change laws of strength and selection of cement-sand ratio of cemented backfill, 2017, Geotechnical Engineering, 48(4), pp. 144-150.
19. Özdemir, M. Evaluation of a Coal Mine Located in Çan, Çanakkale Using 3D Modelling / Özdemir, M., Kahraman, B., Doğruöz, C., Yalçın, E // 6th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries Istanbul, Turkey. 5-7 October 2016: 1-4.
20. Казикаев Д.М. Геомеханика подземной разработки руд / Учебник для вузов, – М.: Изд-во МГГУ, 2005.

© С. Ю. Васичев, А. А. Неверов, 2021

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ДЕЙСТВИЯ ДЕКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ЗАРЯДОВ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ РАЗНООБРАЗНЫХ УСЛОВИЙ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сергей Дмитриевич Викторов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, Россия, Москва, Крюковский тупик, д.4, профессор, доктор технических наук, viktorov_s@ipkonran.ru (victorov_s@mail.ru)

Владимир Матвеевич Закалинский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, Россия, Москва, Крюковский тупик, д.4, доктор технических наук, +7 (495) 360-85-28, zakalinskiy_v@ipkonran.ru (vmzakal@mail.ru)

Андрей Андреевич Еременко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией ИГД СО РАН, eremenko@ngs.ru

Иван Евгеньевич Шиповский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, Россия, Москва, Крюковский тупик, д.4, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, +7 (999) 963-10-38, shipovskiy_i@ipkonran.ru (iv_ev@mail.ru)

Рафаэль Якубович Мингазов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, Россия, Москва, Крюковский тупик, д.4, ведущий инженер, +7 (909) 935-92-03, mingazov_r@ipkonran.ru (ghost1064@yandex.ru)

Современные требования рыночной экономики и усложнения условий разработки месторождений требуют новых научно-технических подходов на глубоких карьерах и рудниках при комплексном освоении недр. Как известно, господствующая в горном деле парадигма в буровзрывных работах связана с техникой бурения скважин и шпуров круглой в сечении формы (полости) с размещением в ней взрывчатого вещества. Однако в горной науке и практике разнообразие условий горного производства издавна требует создания способов разрушения горных пород с асимметрией распределения энергии взрыва в пространстве и максимальной ее концентрацией в определенных направлениях. В этой связи рассмотрено концептуальное направление, базирующееся на принципиально новом механизме действия взрыва известных групп параллельно-сближенных скважинных зарядов, позволяющих эффективно расширить их использование в различных горнотехнических приложениях. Разработка нового механизма действия взрывного процесса с применением компьютерной программы и численного моделирования расчетов позволили использовать изменение формы и конструкции заряда как средство увеличения доли потока энергии взрыва ВВ в определенном направлении.

Показана конструкция деконцентрированного заряда как средство увеличения доли потока энергии взрыва ВВ в заданном направлении, что влечет существенное повышение КПД направленного взрыва и, в частности, сводит к минимуму его действие в обратном, «законтурном», направлении. По результатам исследований предложен метод взрывных работ по нейтрализации взрывным методом влияния аномалий состояния массива на горные разработки. Метод включает соответствующий инструментарий, характеризующийся нетрадиционной конструкцией скважинного заряда и использующий механизм воздействия на аномальные состояния массива с сочетанием его взрывных особенностей.

Ключевые слова: форма взрывной волны, взрывчатые вещества, скважинный заряд, массив горной породы, программирование, численное моделирование, метод сглаженных частиц, напряженно деформированное состояние (НДС), конфигурация пучка скважинных зарядов, геотехнологические условия

DEVELOPMENT OF THE MECHANISM OF ACTION OF DECONCENTRATED CHARGES OF VARIOUS SHAPES FOR VARIOUS MINING CONDITIONS

Sergey D. Viktorov

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Russian Federation, Moscow, Kryukovskiy tupik 4, Doctor of Technical Sciences, Professor, victorov_s@mail.ru

Vladimir M. Zakalinsky

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Russian Federation, Moscow, Kryukovskiy tupik 4, Doctor of Technical Sciences, vmzakal@mail.ru

Andrey A. Eremenko

Institution of Science N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630091, Russian Federation, Novosibirsk, Krasny Prospekt 54, Doctor of Technical Sciences, eremenko@ngs.ru

Ivan E. Shipovskii

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Russian Federation, Moscow, Kryukovskiy tupik 4, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, iv_ev@mail.ru

Rafael Ya. Mingazov

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Russian Federation, Moscow, Kryukovskiy tupik 4, Lead Engineer, ghost1064@yandex.ru

The modern requirements of the market economy and the increasing complexity of the field development conditions require new scientific and technical approaches in deep quarries and mines in the complex development of subsurface resources. As you know, the dominant mining paradigm in drilling and blasting is associated with the technique of drilling wells and boreholes of a circular shape (cavity) with the placement of explosives in it. However, in mining science and practice, the variety of mining conditions has long required the creation of methods for the destruction of rocks with an asymmetry in the distribution of explosion energy in space and its maximum concentration in certain directions. In this regard, we consider a conceptual direction based on a fundamentally new mechanism of action of the explosion of known groups of parallel-converged borehole charges, which effectively expand their use in various mining applications. The development of a new

mechanism of action of the explosive process with the use of a computer program and numerical simulation of calculations made it possible to use the change in the shape and design of the charge as a means of increasing the share of the energy flow of the explosive explosion in a certain direction. The design of the deconcentrated charge is shown as a means of increasing the fraction of the energy flow of the explosive explosion in a given direction, which leads to a significant increase in the efficiency of the directed explosion and, in particular, minimizes its action in the opposite, "legit", direction. Based on the results of the research, a method of blasting operations is proposed to neutralize the influence of anomalies in the state of the massif on mining operations by the explosive method. The method includes the appropriate tools, characterized by an unconventional design of the borehole charge and using a mechanism for influencing the anomalous states of the array with a combination of its explosive features.

Keywords: blast wave shape, explosives, downhole charge, rock mass, programming, numerical simulation, smoothed particle method, stress-strain state (VAT), downhole charge beam configuration, geotechnological conditions

Введение

Усложнения условий разработки месторождений при современных рыночных отношениях требуют инновационных геотехнологий на основе разработки новых идей и научно-технических подходов при комплексном освоении недр [1]. Как известно, господствующая в горном деле парадигма в буровзрывных работах, связанная с техникой бурения скважин и шпуров круглой в сечении формы (полости), определяет соответствующее, практически строго симметричное направление потока энергии взрыва вокруг скважинного заряда с размещенным в нем взрывчатым веществом. Однако разнообразие условий горного производства издавна требует в горной науке и практике создания способов разрушения горных пород с асимметрией распределения энергии взрыва в пространстве и максимальной ее концентрацией в определенных направлениях. В этой связи рассмотрен аспект концептуального направления, базирующийся на новом механизме действия взрыва известных групп параллельно–сближенных скважинных зарядов, позволяющих эффективно расширить их использование в различных горнотехнических приложениях [2, 3].

Актуальность этого направления очевидна при открытой и подземной разработке, в частности, в условиях проявления удароопасных явлений, вызываемых техногенным воздействием на массив горной породы, и в других проблемных ситуациях. Практические задачи требуют оценки влияния на конструктивные параметры систем подземной и открытой разработки поведения массивов горных пород в широком диапазоне прилагаемых нагрузок и режимов нагружения. Известно, что проведение выработок в рудных залежах, угольных пластах и на месторождениях других полезных ископаемых сопряжено с нарушением равновесия массивов горных пород, в результате чего последние деформируются, происходит их сдвигание, в следствие чего в них могут инициироваться спонтанные динамические процессы. Так, известны многочисленные разновидности форм и масштабов воздействий на массив горных пород, приводящие к изменению его исходного состояния. Оно характерно тем, что параметры систем

подземной и открытой разработки проектируются исходя из исходного состояния массивов полезных ископаемых, так как предусмотреть в горном деле заранее различные ситуации, носящие, как правило, случайный характер, практически невозможно. Это создает проблему взаимодействия и адаптации основных процессов горного производства к условиям измененного состояния массива. Формы и виды воздействий носят статический и динамический характер [3, 4].

Методы и материалы

Естественное состояние массива горных пород в процессе разработки полезных ископаемых претерпевает совокупность различного рода техногенных воздействий, важнейшими из которых при ведении горных работ являются сдвигание массива и непосредственное воздействие взрывных работ. В массиве происходят разнообразные, не связанные с взрывными работами процессы, присущие различным структурно-геологическим и горнотехническим особенностям, влияющие и изменяющие его начальное состояние. Известны многочисленные разновидности форм динамических явлений, относящиеся к геомеханике, приводящие, в конечном счете, к изменению физического состояния горного массива. Сюда можно отнести такие, сказывающиеся на несущей способности массива (целика) факторы, как выбросоопасность массива, зоны повышенного горного давления, области разгрузки, трещины и разломы горных пород, территории опасного влияния подземных работ, места обрушения горных пород, провалов на земной поверхности, а также разработки с гидроразрывами и гидрорыхлением угольных пластов, и так далее. В результате появляется непредсказуемость, существенно изменяющая, например, характер склонности к обрушению исходного состояния массивов горных пород и углей. Возникает концентрация напряжений и деформаций в определенных местах и, как следствие, давление горных пород, что создает дегазацию и связанную с ней проблему внезапных выбросов угля и газов. Подобные явления, с учетом специфики и условий разработки, имеют место так же при разработке и рудных месторождений. В зависимости от состояния массива и характера направленного взрывания в процессе отработки действующего или подготовки нового горизонта в измененном массиве до начала ведения очистных горных работ, без специальной проходки комплекса подводящих выработок, непосредственно в выработках технологического назначения (штреки, орты, квершлаг и т.п.). формируют буровые камеры или заходки. При этом буровые камеры формируются в процессе отработки действующего или подготовки нового горизонта в выработках технологического назначения до начала ведения в проблемном массиве очистных горных работ на расстояниях друг от друга, соответствующим конкретным ситуациям.

Это обуславливает необходимость анализа выделенных главных процессов в этих системах и факторов воздействия на них с целью определения условий их оптимального взаимодействия.

Анализ технологий взаимодействия процессов вызывает, с одной стороны, необходимость конкретизации функционирования некоторых ее аспектов как

сложной системы, с другой - разработки инструмента ее реализации с элементами универсальности. Концептуальная разработка данного направления осуществляется на базе развития совместного с ИГД СО РАН, ВостНИГРИ и внедрения на горных предприятиях ОАО «Евразруда», ОАО «Сибгипроруда», ОАО «Запсибгеология» способа отбойки сближенными скважинными зарядами [4, 5]. Взаимосвязь рассматриваемых процессов основывается на использовании сочетаний характерных особенностей целенаправленного взрывного воздействия (управления) и критериев оценки состояния массива в разные пространственно-временные периоды. Это определяет базовые требования к инструментарию воздействия, основу которого представляет идея его направленного действия конструктивно в рамках единого (одного) заряда. Для его эффективного взаимодействия с геотехнологическими факторами в разнообразных условиях решения задач горного производства ему должны быть присущи такие особенности как универсальность, технологичность, масштабность, особенности короткозамедленного взрывания, разнообразие конфигураций форм направленного развития взрывного процесса [6].

Используя подход механики сплошной среды, в рамках модели упругопластического тела сформулирована представляющая практический интерес крайняя задача взрывного разрушения горных пород. В ИПКОН РАН для решения выдвигаемых практикой горного производства задач проблемного характера используется компьютерное моделирование методом сглаженных частиц (Smooth Particle Hydrodynamics) [7, 8], положительно зарекомендовавшим себя при решении динамических задач геотехнической механики. Численно исследовалась динамика процесса действия на горную породу импульса взрыва при порядном короткозамедленном инициировании рядов сближенных зарядов различных конфигураций с целью достижения эффекта последовательного нарастания энергии суммарной волны нагружения в направлении проблемного горного массива.

Механизм способа взрыва заряда характеризуется рядом таких конкретных инструментов управления воздействием, как: варианты направлений потока энергии взрыва в зависимости от характера аномалий состояния массива; ориентации выпуклости формы (дуги) рядности заряда(ов) в сторону проблемного массива; схемы последовательности инициирования рядов скважинных зарядов; выбор взрывчатых веществ с определенными параметрами, и др. Совокупное действие этих факторов образует взрывную волну существенно продолжительного в заданном направлении действия с эффектом масштабного управления взрывом практически единого заряда [9, 10].

В теоретическом плане в процессе действия взрывной волны в горной породе выполняются законы сохранения массы, импульса и энергии. Законы сохранения массы и импульса связывают между собой четыре параметра фронта взрывной волны: D - скорость распространения волны по нетронутому массиву горной породы; u - скачок массовой скорости, равный скорости движения сжатого вещества относительно исходного состояния горной породы; p - давление; V - удельный объем, или плотность $\rho = 1/V$. Продукты детонации взрывчатого вещества расширяются, разгружаясь практически до нулевого давления, при

этом воздействуя соответствующим образом на за скважинный горный массив. Горная порода при этом приобретает дополнительную скорость в направлении движения взрывной волны. Из анализа представленных ниже материалов исследования, в этой связи, объяснима существенная разница измеряемых параметров фронта взрывной волны в противоположных граничных точках в сравниваемых модельных образцах конструкций зарядов [11, 12]. Представленные ниже табличные данные и закономерности базируются на численном решении динамических задач геомеханики методом сглаженных частиц SPH, в том числе на исследовании внутрискважинных детонационных волн и их различных аспектов взаимодействий.

Результаты

Результаты в виде физических величин (параметров волны напряжения) - массовой скорости и давления на фронте волны фиксировались в четырех противоположных точках контура «взрывания», что представлено в таблице 1, в которой приведены данные замеров во временной точке взрывания 3,5 мс из временного интервала замеряемого процесса от 0 до 4 мс и на рисунках 1, 2, 3. На рис. 1 в качестве примера показан фрагмент одного компьютерного эксперимента.

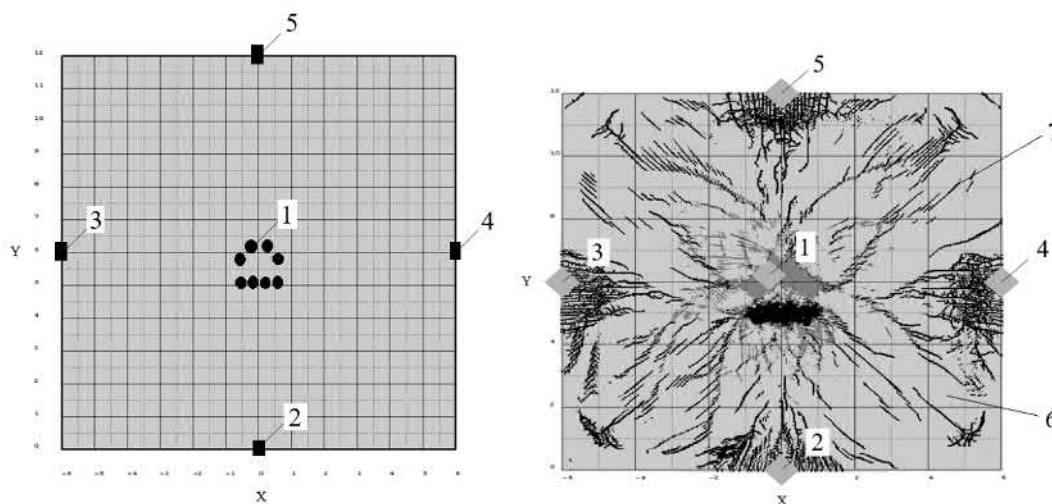


Рис. 1. Фрагмент компьютерного эксперимента: конфигурация двухрядного пучка с направлением параболического ряда зарядов вверх и под ним линейного ряда, где 2, 3, 4, 5- точки замеров, 1- скважины и одновременно точка замера, 6- порода; 7- разрушенная порода

На рис. 2 на одном из графиков показан характер изменения давления в противоположных точках модельного взрыва сравниваемых зарядов (слева одинарный заряд, справа пучок из четырех линейно-сближенных зарядов) при их одновременном в данном случае взрывании.

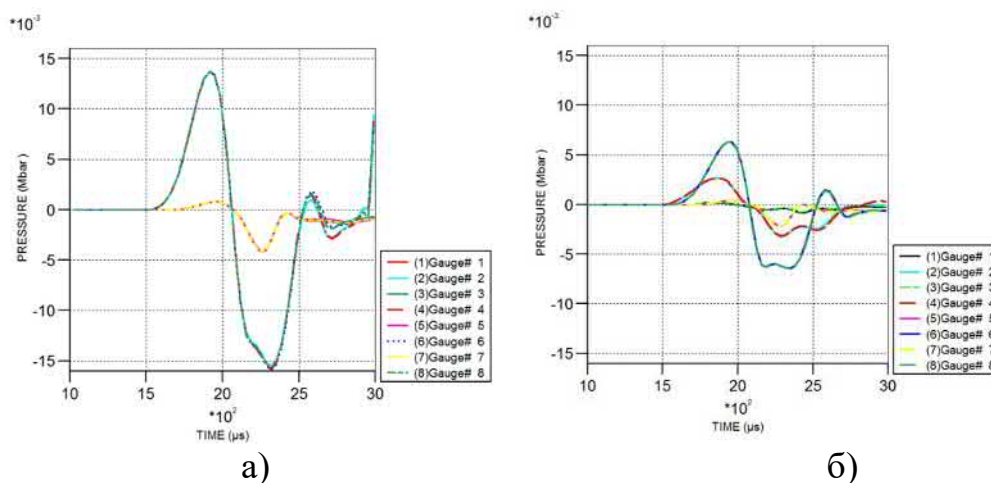


Рис.2. Зависимости давления от времени взрыва различных зарядов: Gauge 1-8 линии замеров, характеризующих сравнительную разницу отклонений величин давления в одинаковых точках замера

На рис. 3 дан сводный график изменения скорости смещения в зависимости от общего времени действия взрыва для одиночного заряда и некоторых пучковых конфигураций с разновременным взрыванием между рядами в одной из характерных точек наблюдения.

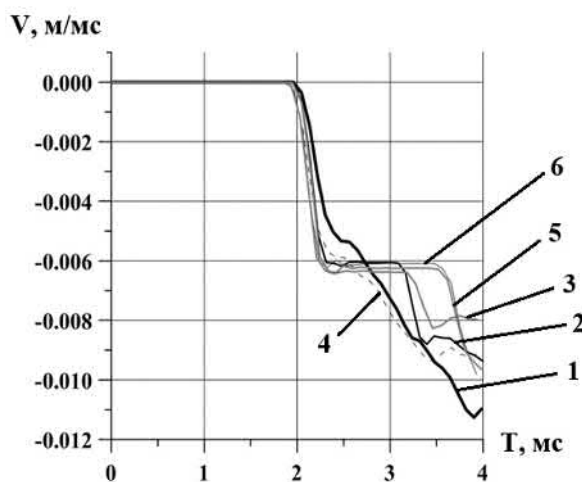


Рис. 3. Сводный график изменения скорости смещения в зависимости от общего времени действия взрыва для одиночного заряда и некоторых пучковых конфигураций

На нем: 1- линия для одинарного заряда, 2- для пучка, в котором верхний ряд с задержкой 50 мкс, а нижний линейный ряд с его одновременной детонацией, 3- ряды линейных зарядов, 4- выпуклый пучок однорядной параболической формы, 5- пучки, где два верхних заряда взрываются мгновенно, а два ряда нижних с задержкой 50 мкс, 6- вогнутый пучок однорядной параболической формы.

Обсуждение

На основе критериев сравнительной оценки массовой скорости, давления на фронте волны, вертикальной скорости, давления в горном массиве (тензорное напряжение), «взрыванием» зарядов в противоположных точках их контуров выполнен анализ полученных результатов, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Показатели компьютерного экспериментального исследования

№№ эксперимента взрыва заряда определенной формы	Характерное время измерения $T = 3,5$ мс								
	Скорость смещения в периферийной точке заряда №2, $V, 10^{-3}$, м/мс	Скорость смещения в периферийной точке заряда №5, $V, 10^{-3}$, м/мс	Скорость смещения в периферийной точке заряда №3, $V, 10^{-3}$, м/мс	Скорость смещения в периферийной точке заряда, №4, $V, 10^{-3}$, м/мс	Давление в центре заряда в точке №1, МПа	Давление в периферийной точке №2 заряда, МПа	Давление в точке в периферийной точке №5 заряда, МПа	Давление в периферийной точке №3 заряда, МПа	Давление в периферийной точке №4 заряда, МПа
№1 (одинарный скважинный заряд)	-9	8	-7	8	3414,21	0,4	-0,36	-0,2	0,5
№2 линейный	-9,6	9	-6,4	7	3402,77	0,02	1,3	-0,2	-0,3
№3 параболическая	-6	9,3	-6,4	7	2100	0,11	-0,35	-0,25	-0,35
№4 линейный (взрывается первым) и парабола (через - 50мкс)	-12	11	-15	13	2068,18	0	0,2	0	-1,26
линейный (взрывается первым) и парабола (через +50мкс)	-8,4	13	-11	11	2597,22	0,45	1,867	0	0,2
линейный (взрывается первым) и парабола (через -300 мкс)	-12	10,4	-13,8	13	1320	1,5	0	-0,4	-0,6
линейный (взрывается первым) и парабола (через +300 мкс)	-9,2	13,2	-12,2	12,2	2754,32	0,7	1,5	-0,05	-0,2

Эти данные, наглядно демонстрируя наличие асимметричного и симметричного эффектов, легли в основу механизма действия направленного импульса взрыва заряда различной конфигурации, что представляет основу реальной возможности направленного взрывания и возможностей способа.

Заключение

Установлено, что направленным короткозамедленным взрыванием достигается эффект последовательно нарастающего увеличения (наложении) параметров (фронта) суммарной взрывной волны сближенных зарядов в заданном направлении. При этом использование взрывчатых составов с растянутым импульсом взрыва и умеренным или низким начальным давлением продуктов взрыва типа игданита или разработанных на их базе разновидностей низко- или средне бризантных взрывчатых веществ позволит увеличить данный эффект.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трубецкой К.Н., Захаров В.Н., Викторов С.Д., Жариков И.Ф., Закалинский В.М. Взрывное разрушение горных пород при освоении недр // Сетевое периодическое научное издание «проблемы недропользования». – 2014. – № 3. – С. 80-95.
2. Викторов С.Д. Механика сдвижения и разрушения горных пород. / С.Д. Викторов, С.А. Гончаров, М.А. Иофис, В.М. Закалинский /Отв. ред. акад. РАН К.Н. Трубецкой; Ин-т проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН. – М.: РАН. – 2019. – 360 с.
3. Викторов С.Д. Технология крупномасштабной взрывной отбойки на удароопасных рудных месторождениях Сибири / С.Д. Викторов, А.А. Еременко, В.М. Закалинский, И.В. Машуков. – Новосибирск: Наука. – 2005. – 212 с.
4. Еременко А.А. Совершенствование технологии буровзрывных работ на железорудных месторождениях Западной Сибири / А.А. Еременко. — Новосибирск: Наука. – 2013. – 192 с.
5. Курления М.В. Техногенные геомеханические поля напряжений / М.В. Курления, В.М. Серяков, А.А. Еременко. – Новосибирск, 2005. – 264 с.
6. Галченко Ю.П. Об эффекте кумуляции при разрушении горных пород деконцентрированными зарядами. Записки Горного института. – С.-Петербург. – 2007. – Т.171. – С. 167-174. ISSN 0135-3500.
7. Шиповский И.Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода // Научный вестник НГУ. Днепропетровск. – Вып. 1 (145), 2015. – С. 76-82.
8. Changping Yi, Daniel Johansson, Ulf Nyberg, Ali Beyglou. Stress Wave Interaction Between Two Adjacent Blast Holes. Rock Mech Rock Eng. 2016. 49. pp.1803–1812. DOI 10.1007/s00603-015-0876-x.
9. Sang Ho Cho, Katsuhiko Kaneko. Rock Fragmentation Control in Blasting. Materials Transactions, Vol. 45, No. 5. 2004. pp. 1722-1730.
10. Simha KRY, Ramesh M. Borehole excitation by oscillating/moving pressure band. In: Fragblast 9, Proceedings of the 9th international symposium on rock fragmentation by blasting. Madrid. Spain. 2009. pp. 427–435.
11. XinPing Li, JunLin Lv, JunHong Huang, Yi Luo, TingTing Liu. Numerical Simulation Research of Smooth Wall Blasting Using the Timing Sequence Control Method under Different Primary Blast Hole Shapes. Shock and Vibration. Hindawi. 2019. pp. 1070-9622. <https://doi.org/10.1155/2019/2425904>.
12. Pengchang Sun, Wenbo Lu, Haoran Hu, Yuzhu Zhang, Ming Chen, Peng Yan. Bayesian Approach to Predict Blast-Induced Damage of High Rock Slope Using Vibration and Sonic Data. Sensors. 2021. 21(7). pp. 1424-8220; <https://doi.org/10.3390/s21072473>.

© С. Д. Викторов, В. М. Закалинский, А. А. Еременко,
И. Е. Шиповский, Р. Я. Мингазов, 2021

УГЛЕДОБЫВАЮЩИЙ КОМПЛЕКС В ЗОНЕ БАМ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Владимир Леонидович Гаврилов

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: gvlugorsk@mail.ru

Выполнен анализ состояния, перспектив и проблем развития угледобывающего комплекса в зоне Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. Представлены сведения о разрабатываемых и планируемых к освоению месторождениях угля в регионе. Рассмотрены требования рынка к качеству твёрдого топлива. Показано, что действующие документы федерального и регионального уровня, определяющие стратегию работы предприятий, которые осуществляют или планируют свою работу в области добычи, обогащения и поставок угля потребителям, требует дополнительного согласования и уточнения. Используемый системный подход позволяет выявить такие несоответствия и рассмотреть возможности корректировки. Предложены меры, направленные на повышение эффективности работы предприятий угольного комплекса. Рассмотрена проблема повышения эффективности и конкурентоспособности цепочек поставок угля. Обозначены роль и место управления качеством угольной продукции для достижения плановых целей.

Ключевые слова: уголь, добыча, Байкало-Амурская магистраль, качество, управление, цепочки поставок

COAL MINING COMPLEX IN THE BAIKAL-AMUR RAILWAY AREA: STATE AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT

Vladimir L. Gavrilov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Leading Researcher, Open-Pit Mining Laboratory, e-mail: gvlugorsk@mail.ru

The analysis of the state, prospects and problems for the development of the coal mining complex in the area of the Baikal-Amur railway is carried out. The information on the developed and planned for the development of coal deposits in the region is presented. The market requirements for the quality of solid fuel are considered. It is shown that the current documents of the federal and regional levels, which determine the strategy of the enterprises that carry out or plan their work in the field of mining, enrichment and supply of coal to consumers, require additional approval and clarification. The systematic approach used allows us to identify such inconsistencies and consider the possibilities of correction. Measures are proposed to improve the efficiency of the coal complex enterprises. The problem of improving the efficiency and competitiveness of coal supply chains is considered. The role and place of quality management of coal products in order to achieve planned goals are indicated.

Key words: coal, mining, Baikal-Amur railway, quality, management, supply chains

Введение

Изучение различных Стратегий и Программ [1-3 и др.], прямо или косвенно связанных с развитием российского угольного комплекса, а также основных публикаций [4-9 и др.], предшествующих их рассмотрению, утверждению и

реализации, показывает, что темпы перемещения центра тяжести отрасли на Дальний Восток и в Восточную Сибирь нарастают. При увеличении общих объёмов добычи по стране с 439,3 млн. т. в 2018 г. до 485 млн. т (по консервативному прогнозу) и 668 млн. т (по оптимистическому) к 2035 г. их доля, составляющая в 2018 г., соответственно, 17% и 18% может увеличиться до 25,9–23,7% и 18,8–25,6% [1].

Регионы, где интенсивно ведётся геологоразведка, действуют, расширяются, строятся и планируются к созданию крупные угольные предприятия: Амурская область – Сугодинско-Огоджинское месторождение; Республики Тыва – Элегестское. Каа-Хемское; Хакасия – Бейское, Черногорское; Саха (Якутия) – Эльгинское, Чульмаканское, Денисовское, Кабактинское; Красноярский край – Саяно-Партизанское, Лимберовское; Забайкальский – Апсатское; Хабаровский – Ургальское и другие. Большинство из обозначенных залежей находится на неосвоенных территориях со сложными природно-климатическими и горно-геологическими условиями ведения горных работ, что предопределяет риски их освоения и удорожание большинства технологических и бизнес процессов.

Однако такой тренд имеет и положительную сторону: значительно уменьшается расстояние транспортирования угля от мест добычи до основного для Дальнего Востока и наиболее перспективного Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) [5,7, 9]. Средняя дальность перевозки угля в России по данным Института экономики и развития транспорта составляет 2528 км (на экспорт 4538 км), в США – 1233 км, Китае – 619 км, Индии – 591 км. Несмотря на относительно низкие ставки железнодорожных тарифов в РФ, экспортные перевозки российского угля имеют самую большую долю транспортной составляющей в мире: 39% от средней стоимости тонны на международных рынках [10].

Фактическое и планируемое на среднесрочную перспективу увеличение объёмов перевозки угля, основного по количеству груза для РЖД, предопределило необходимость максимально быстрой модернизации Транссибирской и Байкало-Амурской железнодорожных магистралей (Транссиб и БАМ). Цель - значительное увеличение их пропускной способности от мест добычи угля до действующих и строящихся морских терминалов по перегрузке угля в Приморском и Хабаровском краях и пограничных переходов [1, 8, 11]. В случае ликвидации транспортных ограничений доля экспортных потоков угля на рынки АТР должна увеличиться с текущих 50% до 75% при росте экспортного потока в данном направлении со 100 млн. т в 2018 г. до 237–252 млн. т в 2035 г. [4].

Проведенный анализ показал, что при всей масштабности решаемых задач, часть актуальных вопросов, связанных с согласованным и эффективным взаимодействием всех участников существующих или создаваемых цепочек поставок угля в зоне БАМ, рассматривается не в полной мере. На некоторых по разным причинам внимание не акцентируется или они не изучаются. В такой ситуации целесообразно акцентировать внимание на явных и скрытых «узких» местах и предложить подходы к их решению, о чём и пойдёт речь ниже. Теоретическая и практическая значимость такого исследования связана с обоснованием путей снижения различных рисков на основе принятия рациональных решений при

существующем уровне информационно-аналитического обеспечения и точности различных прогнозов развития угольного комплекса БАМа, как подсистемы угольного комплекса страны и основного внешнего рынка сбыта угля.

Методы и материалы

Анализ сведений о роли и месте расположенных в зоне БАМ действующих и новых предприятий по добыче, обогащению и поставкам угля потребителям на внутренний и внешний рынок. Синтез подходов к оценке эффективности работы цепочек поставок и рациональному системному управлению ими. Сравнение и обобщение особенностей месторождений региона и их запасов. Оценка текущей и перспективной конъюнктуры рынка энергоресурсов, учитывающей особенности его энергетического и технологического сегментов.

Информационной основой исследования послужили материалы периодической печати, геологические и производственные отчеты ряда предприятий, сформированные и пополняемые авторские базы данных по месторождениям региона, работе на их запасах предприятий, входящих в цепочки разведки, добычи, обогащения и логистики угля, другие источники.

Результаты

Происходящие на рынке энергоносителей мира и динамично развивающихся стран АТР процессы оказывают сильное влияние на состояние рынка угля в России и в её регионах. К глобальным вызовам последнего времени следует отнести усиление конкуренции, активность «зелёного» лобби, рост доли возобновляемых источников энергии, газа, водородной энергетики в энергобалансах стран, в первую очередь развитых. Для всех субъектов Дальнего Востока, которые по уровню и качеству своего развития отстают не только от других частей России, но еще более от сопредельных зарубежных стран, это актуально вдвойне. Потеряв значительную часть экономических связей с центром РФ, они ориентируются на внешние рынки, специализируясь на сырьевом экспорте.

В границах зоны БАМ Дальневосточного федерального округа сосредоточены значительные запасы коксующегося и энергетического угля различного марочного состава в крупных, средних и мелких месторождениях (таблица). Их полноценное освоение и использование может и должно перейти в разряд устойчивых конкурентных преимуществ территорий, на которых они расположены, а также работающих здесь предприятий угольного комплекса.

Ранее [14-16] на основе ретроспективного анализа действовавших в разное время программ и концепций развития региона, отрасли и её смежников был сделан вывод о том, что при условной чёткости поставленных целей и приоритетов развития недостаточно корректно увязаны по времени и источникам обеспечения мероприятия и механизмы их реализации. Применённые при подготовке подходы были основаны на завышенных прогнозах цен, объёмов потребления сырья и его качества в недрах; традиционном отраслевом или региональном лоббизме; неполном учете тенденций развития техники и технологий, организации

и управления. Декларировавшееся интенсивное развитие важного для региона сектора экономики осталось в значительной степени бумажным. Примерами служат нереализованные в конце прошлого века проекты разработки месторождений Алдано-Чульманского района, за исключением Нерюнгринского. Развитие Апсатского проекта в конце 2020 г. временно законсервировано СУЭКом. Освоение Элегестского месторождения заморожено, как минимум, на срок до пяти лет, в том числе из-за приостановления действия концессионного соглашения на строительство железной дороги Элегест—Курагино.

Основные месторождения каменного угля в зоне БАМ*

Месторождение	Регион	Ранг	Освоенность
Апсатское	Забайкальский край	Среднее	Подготовка к освоению
Читкандинское	Забайкальский край	Мелкое	Нераспределенный фонд
Сыллахское	Республика Саха (Якутия)	Среднее	Нераспределенный фонд
Муастахское	Республика Саха (Якутия)	Среднее	Нераспределенный фонд
Верхне-Талуминское	Республика Саха (Якутия)	Среднее	Нераспределенный фонд
Нижне-Талуминское	Республика Саха (Якутия)	Крупное	Нераспределенный фонд
Алдакайское	Республика Саха (Якутия)	Крупное	Нераспределенный фонд
Синсирикское	Республика Саха (Якутия)	Среднее	Нераспределенный фонд
Налдинское	Республика Саха (Якутия)	Среднее	Нераспределенный фонд
Якокитское	Республика Саха (Якутия)	Крупное	Разрабатываемое
Нерюнгринское	Республика Саха (Якутия)	Среднее	Разрабатываемое
Кабактинское	Республика Саха (Якутия)	Среднее	Разведываемое
Денисовское	Республика Саха (Якутия)	Среднее	Разрабатываемое
Чульмаканское	Республика Саха (Якутия)	Крупное	Разрабатываемое
Эльгинское	Республика Саха (Якутия)	Крупное	Разрабатываемое
Алгоминская площадь	Республика Саха (Якутия)	—	Запасы не подсчитаны
Таикская площадь	Республика Саха (Якутия)	—	Запасы не подсчитаны
Эльгаканское	Амурская область	Среднее	Не осваиваемое
Огоджинское	Амурская область	Крупное	Разрабатываемое
Гербикианское	Амурская область	Крупное	Не осваиваемое
Сугодинское	Амурская область	Крупное	Не осваиваемое
Дигатканское	Амурская область	Среднее	Не осваиваемое
Синниканское	Амурская область	Мелкое	Не осваиваемое
Смолиха	Амурская область	Мелкое	Не осваиваемое
Ургальское	Хабаровский край	Крупное	Разрабатываемое
Ургал-Солони	Хабаровский край	Мелкое	Не распределенный фонд
Иорекское	Хабаровский край	Мелкое	Не осваиваемое

* Составлено с использованием [12-14]

На одном из крупнейших в России Эльгинском месторождении объём добычи рядового угля в 2019 г. составил 4,3 млн. т, после смены собственника в 2020 г. – 7,0 млн. т. И это вместо первоначальных планов в 27–30 млн. т в год. В настоящее время здесь действует только одна обогатительная фабрика без обогащения мелких классов угля, переоборудованная путём реконструкции с сезонной работы на круглогодичную. В комплексе из четырёх объектов она должна была быть пионерной для отработки технологических режимов обогащения углей трудной и очень трудной обогатимости.

На функционирование угольного комплекса Дальнего Востока в целом и его части в зоне БАМ оказывает влияние достаточно высокий уровень конкуренции с другими видами топливно-энергетических ресурсов. В регионе появились относительно новые их виды: нефть и газ Сахалина, Якутии и Восточной Сибири, интенсификация освоения которых осуществляется параллельно созданию транспортной инфраструктуры (нефтепровод Восточная Сибирь – Тихий океан, газопроводы Сахалин – Хабаровск – Владивосток, «Сила Сибири», морские терминалы в Приморье, Хабаровском крае и на Сахалине). Введены в действие или планируются к строительству и реконструкции мощности на Бурейской и Богучанской ГЭС, в Южной Якутии и Забайкалье.

Изучение имеющегося опыта экспортных поставок (уголь Южной Якутии, нефть ВСТО, газ «Силы Сибири», электроэнергия Бурейской ГЭС) показывает, что компромисс с азиатскими торговыми партнерами достигать сложно. Альтернативные каналы импорта сырья, дополняемые в случае Китая и Индии собственными значительными производственными мощностями по добыче и переработке, позволяют потребителям в странах Северо-Восточной и Южной Азии закрывать свои основные потребности с относительно невысокими рисками.

При необходимости страны данного региона могут решать проблемы не только экономического, но и политического характера. Наглядным примером служит масштабный конфликт интересов между Австралией и Китаем конца 2020 г.- начала 2021 г., приведший к блокированию поставок австралийского угля в регион и замещению его альтернативным топливом из третьих стран, включая Монголию, Россию и США. Или сбои, связанные с различными природными форс-мажорными обстоятельствами (наводнения, тайфуны). В основе периодически возникающих проблем в работе пограничных переходов между Россией и Китаем также нередко лежат вопросы, связанные с объемами поставок и различными аспектами несоответствия качества поставляемого из нашей страны угля требованиям конкурентного рынка.

Обсуждение

Масштабные планы развития угольного комплекса в районе БАМа имеют ряд «узких» мест, требующих устранения или смягчения влияния. Без этого трудно говорить об устойчивости и стабильности работы предприятий. Выделим и рассмотрим часть факторов, усложняющих освоение сырьевого потенциала угольных месторождений БАМа.

Инфраструктурные ограничения и противоречия при освоении в пioniрных районах новых месторождений. Транспортные и энергетические ограничения связаны как с широко обсуждаемыми аспектами, так и с теми, на которых внимание не акцентируется, несмотря на их значимость. К первым можно отнести низкую пропускную способность ряда действующих участков магистрали и тех, которые даже в случае успешной реконструкции БАМа останутся таковыми. Ограниченные возможности быстрого строительства и устойчивой эксплуатации новых тоннелей на севере от Байкала и подъездных путей к ним. Анонсированное «Сибантрацитом» строительство второго Северо-Муйского тоннеля из-за перемен, происходящих вокруг этой компании, в последнее время не актуализируется. Ненадежность существующих линий электропередач и большие потери в них из-за значительной протяжённости.

Вторые, исходя из выполненного анализа, связаны с рисками ограниченной пропускной способности плотины Братской ГЭС и отсутствием реальных планов строительства моста, который бы снял сверхнормативную нагрузку на гидросооружения данной станции и обеспечил перевозку угля из Сибири на Восток в ожидаемых объемах. Можно говорить и о недостаточном внимании к строительству новых крупных мощностей по выработке электроэнергии с использованием угля, который планируется к добыче в регионе, и получаемого в результате его обогащения промпродукта.

Имеется опыт государственной поддержки корпораций, реализующих угольные проекты. Например, «Колмар» через ТОО «Южная Якутия» получил ряд налоговых льгот и софинансирование для сооружения подъездных путей и линий электропередач к объектам недропользования. ООО «Эльгауголь», сменившее собственника с «Мечела» на «А-Проперти» и реструктуризовавшее свои долги перед банками с государственным участием, начало наращивать объемы добычи рядового угля. Следует отметить и определенное давление субъектов Федерации на бизнес в виде дополнительных затрат в рамках их «социальной ответственности», включая строительство и содержание не профильной инфраструктуры в местах дислокации предприятий.

Недостаточность и неполнота имеющейся информации о качестве и марочном составе угля в запасах месторождений. Анализ рынка угля в России и странах АТР, показывает, что в целом к качеству поставляемого топлива предъявляются высокие требования [7, 9, 15, 17]. Контроль качества выполняется по широко применяемым в нашей стране и мире параметрам и относительно новым, часть из которых в российской практике используется редко. Это относится и к углям, утилизируемым в металлургии и химическом производстве, и идущим на сжигание для выработки электрического и тепловой энергии. Данное обстоятельство и низкий относительно сложности изучаемых и разрабатываемых объектов уровень знаний о недрах приводит или может привести к принятию не оптимальных проектных и эксплуатационных решений.

Изучение первичных данных, синтезированных материалов геологических, проектных и научных организаций показывает, что уголь региональных месторождений по ряду показателей является достаточно привлекательным для

потребителей на рынке. В первую очередь это касается низких содержаний серы и фосфора, относительно высоких средних значений показателей спекаемости для коксующихся углей. Из неокисленных углей ряда месторождений [15, 18-20] при условии их низкой зольности ($A^d \leq 10\%$) возможно получение прочного кокса, включая его шихтование с менее ценными марками. В тоже время сложная структура большинства пластов, высокая природная зольность угля, трудная или очень трудная обогатимость его части, наличие зон окисления, широкий диапазон низко-, средне- и высокочастотных колебаний ряда важных показателей между пластами, по площади их распространения и в разрезе ставят решение задач управления качеством в число наиболее важных. Для нейтрализации негативного влияния этих факторов требуются разработка, внедрение и постоянное совершенствование специальных систем менеджмента качества.

Противоречия между планируемыми объёмами добычи угля в зоне БАМ и спросом на него со стороны внутренних и внешних потребителей. Успех развития отрасли в районе БАМа может быть снижен из-за отставания ввода в строй мощностей при первичной переработке угля всех классов крупности. Выход концентрата при обогащении обычно находится на уровне 55-70%, промпродукта – 25-40%. Поставки рядового угля на экспорт, где востребован концентрат с зольностью до 10 % и рядовой уголь с зольностью до 16%, могут быть эффективными только в благоприятные по конъюнктуре и крайне ограниченные по времени периоды. В настоящее время в Южно-Якутском бассейне в эксплуатации находятся «Нерюнгринская», «Денисовская», «Инаглинская-1», «Эльгинская» фабрики, которые обеспечивают переработку основного объема добываемого коксующегося угля, а также строящаяся «Инаглинская-2». ОФ «Чегдомын» в Хабаровском крае имеет проектную мощность по рядовому угля до 6 млн. т/год. Анонсированные «А-Проперти» масштабные планы увеличения объемов добычи на Эльге и в Амурской области в настоящее время не подкреплены мощностями по обогащению угля.

В условиях дефицита на внутреннем рынке отдельных марок коксующегося угля, которые имеются в зоне БАМ, возможны относительно небольшие по объёмам встречные поставки на запад России для удовлетворения потребностей металлургов. Остальной концентрат и наиболее качественный рядовой коксующийся и энергетический уголь может быть востребован внешним рынком.

Угли с высокой зольностью или низкими теплотехническими характеристиками на приемлемых экономических условиях имеют небольшой потенциал для реализации только на крайне ограниченном внутреннем рынке при условии наличия крупных потребителей. Ответ на вопрос, что делать с таким энергетическим сырьем и в таких больших объемах найти сложно. Варианты: строительство новых ТЭС, в которых должны быть реализованы самые передовые экологически безопасные технологии сжигания угля с высоким КПД; поставка получаемой электроэнергии на экспорт; её использование для производства, например, водорода посредством электролиза. Крупными потребителями водорода могут стать страны восточной Азии (Япония, Южная Корея, КНР). Техничко-экономические оценки возможности крупномасштабного производства электролизного

водорода за счет «избыточной» электроэнергии, приведенные в [21], показывают, что производство и реализация водорода может оказаться полезной для повышения экономической эффективности ряда проектов. В их число могут войти и угольные. По оценкам коммерчески доступная новая водородная энергетика будет востребована уже в ближайшие годы.

Заключение

Анализ состояния минерально-сырьевой базы, перспектив и проблем развития угледобывающего комплекса в зоне БАМ показал его возрастающую значимость для экономики не только Дальнего Востока, но и в целом России. В действующих программных документах федерального, регионального и отраслевого уровня, определяющих стратегию работы предприятий в области добычи, обогащения и поставок угля потребителям требуются дополнительные уточнения и согласования между заинтересованными сторонами-участниками.

Использованный системный подход позволил выявить и рассмотреть явные и неявные несоответствия в развитии угледобычи в регионе, требующие решения. К ним относятся: несогласованное развитие транспортной и энергетической инфраструктуры на протяжении всего БАМа; несоответствие заявляемых производителями угля объемов перевозки угля в восточном направлении пропускной способности железной дороги; недостаток мощностей по обогащению угля и сжиганию его низкокачественной части на локальных ТЭС.

Запросы рынка к потребительским свойствам поставляемого твердого топлива возрастают, что, наряду с усложнением вовлекаемых в оборот месторождений способствует росту противоречий между недостаточно изученным и объективно оцененным потенциалом самого георесурса и организационно-технологическими возможностями обеспечения требуемого уровня качества угля для повышения эффективности и конкурентоспособности его поставок.

Сказанное определяет целесообразность и направления проведения дальнейших исследований, целями которых должны быть повышение эффективности использования заинтересованными сторонами природного потенциала угольных месторождений в районе БАМ, снижение экологической нагрузки на окружающую среду и реальное социально-экономическое развитие региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 г. № 1582-р). – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/> (дата обращения: 17.04.2021).
2. Национальная программа социально-экономического развития Дальнего Востока на период до 2024 года и на перспективу до 2035 года [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 24.09.2020 г. № 2464-р). – Режим доступа: <https://minvr.gov.ru/upload/iblock/fdc/nats-programma.pdf> (дата обращения: 17.04.2021).
3. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 года [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2017 г. № 1209-р). – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/8504> (дата обращения: 14.04.2021).

4. Новак А. Угольная промышленность России: история на века // Энергетическая политика – 2020. – № 8. – С. 6–13.
5. BP. Statistical Review of World Energy // <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
6. Яновский А.Б. Перспективы развития угольной отрасли Российской Федерации // http://coal.sbras.ru/wp-content/uploads/2019/02/12/1_Яновский.pdf (дата обращения 24.07.2019).
7. Исмагилов С.Р. Будущее угля: в поисках новой парадигмы // Уголь. – 2018. – №9. – С. 26–32.
8. Малышев Ю., Ковальчук А., Рожков А. Новак А. Угольная отрасль: поиск ориентиров в эпоху перемен // Энергетическая политика – 2021. – № 2. – С. 18–29.
9. Ткач С.М., Гаврилов В.Л. О закономерностях развития угольной промышленности // Проблемы недропользования. – 2019. – № 3. – С. 49–61.
10. Лебедев А. ИЭРТ: транспортные издержки при экспорте российского угля – самые высокие в мире [Электронный ресурс]: 12.11.2020. – Режим доступа: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/iert-transportnye-izderzhki-pri-eksporte-rossiyskogo-uglya-samye-vysokie-v-mire> (дата обращения: 13.04.2021).
11. Головщиков В., Огнев Д., Петрякова Е. Перспективы БАМа и Транссиба с учетом состояния регионов и развития угольной отрасли // Энергетическая политика. – 2021. – № 2. – С. 30–43.
12. Актуализированные ГИС-пакеты оперативной геологической информации (ГИС-Атлас "Недра России") по состоянию на 01.09.2020 [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://atlaspacket.vsegei.ru/#75e47dcbcf3515f2> (дата обращения: 07.04.2021).
13. Угольная база России. Т. V. Кн. 2: Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока России (Республика Саха, Северо-Восток, Сахалин, Камчатка). – М.: ЗАО "Геоинформмарк". – 1999. – 639 с.
14. Гаврилов В.Л. Развитие угольного комплекса Дальнего Востока и Забайкалья в условиях меняющейся конкурентной среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – отд. выпуск № 4. Дальний Восток - 1 – С. 453–463.
15. Геотехнологии открытой добычи на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями / Батугин С.А. и др. – Новосибирск: Гео. – 2013. – 307 с.
16. Барашкова А.С., Батугина Н.С., Васильева Ф.Д. и др., Южная Якутия: ресурсный потенциал социально-экономических комплексов: коллективная монография, СВФУ им. М.К.Аммосова, Якутск. – Уфа, Аэтерна. – 2019. – 243 с.
17. Скрыль А.И. Резервы повышения потребительских свойств угольной продукции и роста эффективности ее использования. // Уголь. – № 9. – 2018. – С. 12–17. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-9-12-17>.
18. Цинюшкин Г.М., Дулин Д.В. Особенности степени метаморфизма и распределения марочного состава углей Апсатского месторождения // Уголь.. – 2018. – № 9. – С. 61–65.
19. Freidina E.V. Botvinnik A.A., Dvornikova A.N. Method and Estimation of Efficient Differentiation of Coal Reserves Based on Washability // Journal of Mining Science. – 2016. – № 4. – P. 712–724.
20. Гончарова Н.В. Структурирование запасов угольных месторождений сложного строения по уровням качества / Н.В. Гончарова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 6. – С. 165–172.
21. Соловьев Д.А. Направления развития водородных энергетических технологий // Энергетическая политика – 2020. – № 3. – С. 64–71.

© В. Л. Гаврилов, 2021

О ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СПЕКАЕМОСТИ КОКСУЮЩЕГОСЯ УГЛЯ

Владимир Леонидович Гаврилов

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: gvlugorsk@mail.ru

Евгений Александрович Хоютанов

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского ФИЦ ЯНЦ СО РАН, 677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 43, кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: khoiutanov@igds.ysn.ru

Рассмотрен рост сложности строения отрабатываемых месторождений коксующегося угля и изменчивости его качества в запасах. Отмечено, что добывающие предприятия в таких условиях вынуждены уделять повышенное внимание вопросам управления потребительскими свойствами угля для достижения требуемого рынком уровня качества. Показано, что цифровизация георесурса и геотехнологий освоения месторождений способствует получению более полной и точной картины производственно-сбытовых процессов, росту эффективности работы при разведке, добыче, обогащении и потреблении угля. Обозначены роль и место моделирования показателей спекаемости угля в пластах и построения карт качества в комплексных системах управления добывающих компаний Южной Якутии. Определена целесообразность применения результатов 3D моделирования, уточненной оценки запасов с учётом их качества и условий залегания для настройки работы предприятий под различные конкурентоспособные сценарии освоения сложных по строению месторождений.

Ключевые слова: коксующийся уголь, спекаемость, моделирование, карты качества, геотехнология, управление

ON GEOTECHNOLOGICAL MODELING OF COKING COAL SINTERABILITY INDICES

Vladimir L. Gavrilov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Leading Researcher, e-mail: gvlugorsk@mail.ru

Evgenii A. Khoiutanov

Chersky Institute of Mining of the North SB RAS, Lenina av., Yakutsk, 677980, Russia, Ph. D., Researcher, e-mail: khoiutanov@igds.ysn.ru

The increase in the complexity of the structure of mined coking coal deposits and the variability of its quality in reserves is considered. It was noted that under such conditions, mining enterprises had to pay more attention to the management of coal consumer properties in order to achieve the quality level required by the market. It has been shown that digitalization of georesource and geotechnologies in the development of deposits contributes to obtaining a more complete and accurate view of production and marketing processes, increasing the efficiency of work in the exploration, production, enrichment and consumption of coal. The role and place of modeling of coal sinterability indices in seams and quality mapping in complex management systems of mining companies of South Yakutia are outlined. The feasibility of applying the results of 3D modeling, enhanced assessment of reserves taking into account their quality and geological conditions to customize the work of enterprises for various competitive stages of development of complex deposits.

Keywords: coking coal, sinterability, modeling, quality maps, geotechnology, management

Введение

В развитии угольной отрасли страны обозначился устойчивый тренд на увеличение добычи не только в наиболее развитом Кузбассе, но и районах пионерного освоения со сложными горно-геологическими условиями в Амурской и Сахалинской областях, Якутии, Тыве, Хакасии, Забайкальском и Хабаровском краях [1, 2]. В этих регионах интерес недропользователей направлен в основном на освоение месторождений ценных марок угля, в первую очередь, коксующегося [2, 3]. Ужесточение конкуренции на внешнем и внутреннем рынке ведёт к необходимости устранения противоречий между высокой изменчивостью потребительских свойств твёрдого топлива в запасах и жёсткими запросами покупателей к качеству готовой продукции. Такой компромисс в цепочках поставок угля достигается путём: рационального управления качеством, базирующегося на точной и достоверной оценке природного потенциала георесурса; максимально возможном уровне его использования посредством реализации комплекса технологических и организационно-экономических мер [4-6].

Для коксующихся углей, наряду с зольностью, выходом летучих веществ, влажностью, содержанием вредных примесей, наиболее значимыми являются показатели спекаемости и коксуемости, характеризующие ценность угля и его пригодность к получению качественного и прочного кокса. В мире, как показывает анализ, используется ряд показателей для оценки с различных позиций возможностей угля к переходу через пластическое состояние в кокс, который бы по своим характеристикам соответствовал требованиям металлургов и коксохимиков. При этом прямые корреляции между этими показателями могут отсутствовать или быть статистически недостаточно значимыми [4, 7-8].

В нашей стране для оценки спекаемости, характеризующей способность угля преобразовываться при нагреве без доступа кислорода в кокс, по исторически сложившейся традиции широко применяют показатель «толщина пластического слоя», который присутствует в основных классификациях коксующегося угля и учитывается при подсчете запасов и ресурсов. Из-за требований реальных или потенциальных покупателей для дополнительной оценки свойств угля выполняется менее масштабная оценка и по другим показателям. Для Нерюнгринского, Эльгинского, Чульмаканского и Денисовского месторождений в Южной Якутии, на примере которых проводятся исследования, это индекс свободного вспучивания и степень окисленности угля. Совместное использование обозначенных показателей для оценки уровня соответствия угля аналогам-конкурентам повышает уровень обоснованности принимаемых решений в рамках комплексного управления качеством добываемого и поставляемого на экспорт минерального сырья.

Из сказанного вытекает актуальность проведения работы по геотехнологическому моделированию и картированию показателей спекаемости коксующегося угля в пластах сложных по строению месторождений для повышения эффективности функционирования комплексных систем управления качеством добываемого угля.

Методы и материалы

При выполнении работы использовались методы системного анализа, синтеза решений и обобщения, математической статистики и геостатистики. Компьютерное и геотехнологическое моделирование месторождений и их запасов проводилось с применением различных инструментов, входящих в арсенал в горно-геологических информационных систем (ГГИС) Mineframe [9] и Micromine.

Информационной базой для выполнения работ по картированию запасов коксующегося угля, включая показатели спекаемости, явились первичные и синтезированные на этой основе опубликованные и фондовые материалы многостадийной геологической разведки месторождений, данные опробования качества угля в технологических потоках при ведении добычных работ, его внутрикарьерной подготовке и обогащении. Для уточнения получаемых результатов при необходимости использованы карты-прототипы «Южякутгеологии», ИГД СО РАН [10, 11], ИГД УрО РАН [12], других организаций, а также различные публикации, например, [13].

Результаты

Комплексное управление качеством угля и менеджмент качества предприятий при разведке и разработке месторождений предусматривает достижение ряда целевых показателей, определяемых на основе требований рынка, учёта природных горно-геологических особенностей минерального сырья и характера его качественно-количественной трансформации при выемке в забое, углеподготовке, логистике и первичной переработке [4, 5, 14]. Их базисом является промышленный инжиниринг — вид деятельности, связанной с созданием, улучшением, внедрением и мониторингом производственных систем, позволяющих наилучшим образом объединять человеческие и материальные ресурсы.

В компании “Tata Steel” (Индия), одной из крупнейших в мире, при управлении качеством угля применяется ступенчатый подход, включающий изучение сырья в недрах, создание баз данных, каркасное и блочное моделирование месторождений, перспективное планирование и оперативное инженерное обеспечение добычи с постоянным мониторингом всех операций и процессов [15].

При исследовании месторождений со сложными геологическими условиями залегания и высокой изменчивостью показателей качества и геометрии пластов используются различные методы геостатистики [16, 17 и др.]. Их применение, дополняемое возможностями, вытекающими из предварительной подготовки угля к обогащению в карьерном пространстве [18], использованием понятия “углеминеральная однородность” [19], перспективами автоматизации и роботизации различных процессов открытых горных работ [20] в условиях нестабильности, неопределённости, сложности и неоднозначности внешней среды [21] позволяют организовать планирование горных работ на более высоком уровне.

В пределах литологического разреза месторождения или его участка в смежных пластах могут находиться разные марки и сорта угля, не говоря уже о разных

залежах одного и того же угленосного района. Дополнительное влияние оказывает наличие зон с окисленным или частично окисленным углем, приуроченных к выходам пластов под четвертичные отложения и к тектоническим нарушениям. Окисленность рассматриваемого полезного ископаемого, формируемая в результате длительного воздействия на него кислорода воздуха и воды, снижает в той или иной степени ценность углей с переходом их в разряд энергетических. При этом порядок оконтуривания и дифференциации запасов в целях их рационального ресурсосберегающего освоения усложняется, что вносит дополнительные возмущающие воздействия в процесс управления качеством добываемого и поставляемого на конкурентные рынки угля.

Последовательность действий при геотехнологическом моделировании показателей спекаемости, даже с учётом специфики их оценки, во многом схожа с моделированием других показателей качества, например, зольности [18, 22] или обогатимости [5, 10]. Она включает следующие основные этапы: анализ и использование открытой и фондовой информации об исследованиях спекаемости и коксуемости угля; формирование баз данных пластов и месторождений с максимальным учётом первичной геолого-маркшейдерской информации; статистическая и геостатистическая оценка качества угля в запасах и технологических потоках; построение различными методами цифровых моделей пластов месторождений с помощью горно-геологических информационных систем; планирование добычных работ в режиме управления качеством.

По Эльгинскому месторождению, одному из основных объектов исследований, с учётом наличия зон окисления рассчитаны основные статистические параметры распределения толщины пластического слоя (табл. 1) в запасах четырёх самых мощных пластов. С разной степенью детализации построен набор модифицированных карт в 2D (рисунок) и 3D вариантах, которые характеризуют изменчивость толщины пластического слоя в запасах по различным векторам пространства.

Таблица 1

Статистические характеристики толщины пластического слоя по основным пластам Эльгинского месторождения

Показатель/пласт	У5	У4	Н16	Н15
Количество значений по скважинам	310	339	404	486
Среднее	24,96	24,05	30,95	35,27
Стандартное отклонение	7,05	6,74	8,59	6,21
Коэффициент вариации	28,24	28,05	27,75	17,62
Эксцесс	0,82	0,90	2,54	3,45
Асимметричность	-0,93	-0,83	-1,62	-1,55

Обсуждение

В техническом проекте (2014 г.) в границах отработки Северо-Западного участка Эльгинского месторождения разрезом I очереди представлены данные о распределении балансовых запасов по направлению использования: угли с

В структуре балансовых запасов угля при варианте со схемой валовой отработки с присечкой вмещающих пород в кровле (для низкособольных пластов) и зачисткой почвы угольных пластов на долю окисленных углей приходится 13,0 %,

частично окисленных 21, 0%. В четырех основных пластах эти значения могут достигать 17,9 % и 42,8 % (табл. 2).

Таблица 2

Балансовые запасы угля в границах отработки Северо-Западного участка
Эльгинского месторождения разрезом I очереди

Пласт и марка угля	Балансовые запасы			
	По сумме чистых угольных па- чек		С учётом 100 % засорения по- родными прослоями	
	млн. т	%	млн. т	%
Всего по разрезу	364,2	100,0	412,9	100,0
в т.ч., Y = 0–13	47,3	13,0	55,3	13,4
Y = 14–20	76,4	21,0	88,3	21,4
Y ≥ 21	240,5	66,0	269,3	65,2
Пласт Н15, всего	48	100,0	59,4	100,0
в т.ч., Y = 0–13	0	-	0,1	0,2
Y = 14–20	2,5	5,2	3,1	5,2
Y ≥ 21	45,5	94,8	56,2	94,6
Пласт Н16, всего	112,5	100,0	119,1	100,0
в т.ч., Y = 0–13	4,8	4,3	5,1	4,3
Y = 14–20	6,9	6,1	7,3	6,1
Y ≥ 21	100,8	89,6	106,7	89,6
Пласт У4, всего	83,6	100,0	95,4	100,0
в т.ч., Y = 0–13	15	17,9	17,2	18,0
Y = 14–20	35,8	42,8	41,0	43,0
Y ≥ 21	32,8	39,2	37,2	39,0
Пласт У5, всего	51	100,0	58,3	100,0
в т.ч., Y = 0–13	7,4	14,5	8,6	14,8
Y = 14–20	15,4	30,2	17,9	30,7
Y ≥ 21	28,2	55,3	31,8	54,5

Многолетняя практика работы Нерюнгринского разреза, расположенного также в Южно-Якутском бассейне, показывает, что в процессе эксплуатационной доразведки и опережающего опробования структура запасов может измениться, к сожалению, в сторону ухудшения ожидаемых параметров потребительских свойств твёрдого топлива с одновременным усложнением на картах качества границ окисленной, переходной зон и области неокисленных, самых ценных марок углей.

Следует учесть также определённую ограниченность и сложность квалитетрической оценки запасов угля в пластах и применения имеющихся в арсенале ГГИС методов построения моделей спекаемости, целесообразность апробации нелинейных методов геостатистики для снижения уровня различных допущений и ограничений при моделировании неаддитивных показателей качества, к которым можно отнести и спекаемость.

Кроме того, говорить о достаточности картирования спекаемости запасов и последующего управления их извлечением только по толщине пластического слоя не вполне корректно. Технологическую ценность (коксуемость) угля или угольной смеси можно оценить с достаточной степенью точности по совокупности значений пяти показателей свойств – выходу летучих веществ V^d ; толщине пластического слоя Y ; отражательной способности витринита $R_{o,r}$; содержанию самого витринита Vt ; индексу свободного вспучивания SI [23]. Дополнить этот перечень может и химический состав золы углей, влияющий на технологические свойства кокса [24].

Решение задачи совместного картирования этих показателей, измеряемых в разных шкалах, дополняемое влиянием процесса окисления угля в недрах требует альтернативных решений с использованием, видимо, других методов моделирования и интерполирования. Также целесообразна разработка специальных процедур совмещения на картах графических представлений о показателях качества в запасах по различным пластам месторождения и оценки их достоверности.

Заключение

Дополнительное изучение георесурса с позиций оценки его спекаемости на примере толщины пластического слоя угля показывает, что выявляемые резервы совершенствования процесса управления потребительскими свойствами коксующегося угля позволяют повысить эффективность использования заложенного природой потенциала сложных по строению и неоднородных по качеству запасов месторождений.

В основе новых технологических и управленческих решений рационального освоения недр должны лежать не утвержденные по практически постоянным для недропользователя кондициям объёмы с унифицированным качеством угля, а реальные для текущего уровня планирования геологические запасы во всем их природном разнообразии.

Цифровизация георесурса и геотехнологий освоения месторождений позволяет формировать более полную, точную и достоверную картину производственно-сбытовых процессов, способствующую росту эффективности работы угледобывающих компаний при различных конкурентоспособных сценариях освоения сложных по строению месторождений коксующегося угля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 г. № 1582-р). – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/> (дата обращения: 17.04.2021).
2. Новак А. Угольная промышленность России: история на века // Энергетическая политика – 2020. – № 8. – С. 6–13.
3. Национальная программа социально-экономического развития Дальнего Востока на период до 2024 года и на перспективу до 2035 года [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 24.09.2020 г. № 2464-р). – Режим доступа: <https://minvr.gov.ru/upload/iblock/fdc/nats-programma.pdf> (дата обращения: 17.04.2021).

4. Геотехнологии открытой добычи на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями / Батугин С.А. и др. – Новосибирск: Гео. – 2013. – 307 с.
5. Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н. Системное управление качеством углей при открытой разработке месторождений Сибири. – Новосибирск: СО РАН; Наука, 2019. – 264 с.
6. Гаврилов В.Л. Фрейдина Е.В. О дифференциации и оценке потенциала угольных месторождений при их освоении // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2020, т. 7, № 1, С. 35-42.
7. Ткач С.М., Гаврилов В.Л. О закономерностях развития угольной промышленности // Проблемы недропользования. – 2019. – № 3. – С. 49-61.
8. Томаш А.А., Тарасов В.П., Ковальчик Р.В. и др. Влияние реакционной способности и «горячей» прочности кокса на технико-экономические показатели доменной плавки в условиях ОАО «МК «Азовсталь» // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2007. – № 17. – С. 9-13.
9. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Цифровое моделирование при решении задач открытой и подземной горной технологии // Горный журнал. – 2019. – № 6. – С. 51-55.
10. Freidina E.V. Botvinnik A.A., Dvornikova A.N. Method and Estimation of Efficient Differentiation of Coal Reserves Based on Washability // Journal of Mining Science. — 2016. — № 4. — P. 712–724.
11. Goncharova N.V. Structuring of Complex Coal Deposits with Respect to Quality // Journal of Mining Science. – 2015. – Т. 51. – № 6. – С. 1220-1225.
12. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья // Проблемы недропользования. –2016. – № 4. – С. 170-176.
13. Угольная база России. Т. V. Кн. 2: Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока России (Республика Саха, Северо-Восток, Сахалин, Камчатка). — М.: ЗАО «Геоинформмарк». –1999. – 639 с.
14. Yingde L. and Yanzhong W. Study on whole process quality control in coal production based on industry engineering, Proc. of 2008 Int. Conf. of Logistics Eng. and Supply Chain, 2008. — P. 886–890.
15. Srivastava R. R., Mohan S. R., and Verma S. Quality management of iron ore and coal by raw material division of Tata steel. Режим доступа: http://www.eoq.org/fileadmin/user_upload/Documents/Congress_proceedings/Budapest_June_2011/Proceedings/3_7_srivastava_s.pdf.
16. Webber T., Leite Costa J. F., and Salvadoretti P. Using borehole geophysical data as soft information in indicator kriging for coal quality estimation, Int. J. of Coal geology, 2013, Vol. 112. — P. 67–75.
17. Oliver M. A. and Webster R. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling variograms and kriging, Catena, 2014, Vol. 113. — P. 56–69.
18. Хоютанов Е.А., Гаврилов В.Л. Повышение полноты извлечения запасов сложноструктурных пластов с учетом зольности угля в приконтактных зонах // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2016. –Т. 22. – № 10. – С. 20-29.
19. Секисов Г. В., Якимов А. А., Чебан А. Ю. Технологическая углеминеральная однородность // Вестн. ЗабГУ. — 2017. — Т. 23. — № 9. — С. 32–44.
20. Клебанов А. Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная промышленность. – 2020. – № 1. – С. 8–11.
21. Гаврилов В. Л., Ткач С. М. О цифровых технологиях горных предприятий в условиях нестабильности, неопределённости, сложности и неоднозначности // ГИАБ. – 2019. – № 11 (37). – С. 112–121.

22. Khoiutanol E. A., Gavrilov V. L Procedure for Estimating Natural and Technological Components in Ash Content of Produced Coal // Journal of Mining Science. – 2018. – Vol. 54, – Is. 5. – PP. 782–792. DOI 10.1134/S1062739118054891.

23. Киселев Б.П., Стахеев С.Г. Угольное сырье и кокс. О предпосылках выпуска стабильного по свойствам кокса // Кокс и химия. – 2011. – № 10. – С. 2-7.

24. Козлов В.А. Влияние химического состава золы углей на технологические свойства кокса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 11. – С. 108-113.

© В. Л. Гаврилов. Е. А. Хоютанов, 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАДКОВ РЕАГЕНТОВ-СОБИРАТЕЛЕЙ В ЭЛЕМЕНТАРНОМ АКТЕ ФЛОТАЦИИ

Таисия Германовна Гаврилова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)205-30-30 доб.164, e-mail: gavriloa.t.g@mail.ru

Дарья Михайловна Цицилина

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)205-30-30 доб.164, e-mail: tsitsilinadm@mail.ru

Предложен механизм работы физически сорбированных производных форм собирателя, полученных при нестехиометрическом соотношении между реагентами-собирателями с солями тяжелых металлов. Установлено, что за счет изменения соотношения компонентов можно регулировать их поверхностно-активные по отношению к границе раздела «газ-жидкость» свойства, а следовательно, и способность к снятию кинетического ограничения образованию флотационного контакта.

Физическая форма сорбции на минерале может быть представлена осадками собирателей и ионно-молекулярными ассоциатами. Результаты исследований показывают, что указанные формы при прорыве прослойки могут десорбироваться с минерала и растекаться по поверхности пузырька, увлекая в свое движение жидкость из прослойки, тем самым «осушая» минеральную поверхность. В свою очередь, удаление жидкости из прослойки приводит к сокращению времени индукции, что оказывает влияние на эффективность флотации. Полученные результаты позволяют раскрыть механизм активации флотации солями тяжелых металлов и могут быть использованы в разработке принципиально новых технологических решений.

Ключевые слова: флотация, ксантогенаты, свинцово-цинковая руда, олеаты, апатитовая руда, физическая форма сорбции, активация

STUDY OF SEDIMENTS OF COLLECTING AGENTS IN ELEMENTARY FLOTATION ACT

Taisiya G. Gavrilova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher, Laboratory of Mineral Dressing and Engineering Ecology, office: +7 (383)205-30-30 ext.164, e-mail: gavriloa.t.g@mail.ru

Darya M. Tsitsilina

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher, Laboratory of Mineral Dressing and Engineering Ecology, office: +7 (383)205-30-30 ext.164, e-mail: tsitsilinadm@mail.ru

The operating mechanism of physically sorbed derivatives of collector obtained at a nonstoichiometric ratio between collecting agents with heavy metal salts is proposed. It is found that by changing the ratio of the components, it is possible to adjust their surface-active properties with respect to the gas-liquid interface and, consequently, the ability to remove the kinetic restriction to the formation of flotation contact.

The physical form of sorption on a mineral can be represented by collector sediments and ion-molecular associates. The research results show that when the interlayer breaks through, these forms can desorb from the mineral and spread over the bubble surface, dragging the liquid from the interlayer into motion, thereby “drying” the mineral surface. In turn, the removal of liquid from the interlayer leads to a reduction in the induction time, which affects the efficiency of flotation. The results make it possible to reveal the mechanism of flotation activation with heavy metal salts and can be used in the development of fundamentally new engineering solutions.

Keywords: flotation, xanthates, lead-zinc ore, oleates, apatite ore, physical form of sorption, activation

Введение

Вовлечение в переработку труднообогатимых руд сложного вещественного состава ведет к поиску форм флотационных реагентов, способных к повышению селективности извлечения полезных минералов во флотации. В своем большинстве существующие способы выбора реагентов-собирателей и активаторов для флотации ассоциируются с химией поверхностных соединений и повышением плотности сорбции собирателя на минерале и не учитывают кинетику элементарного акта флотации.

Изучение влияния солей поливалентных металлов на флотацию оксидов, силикатов, солеобразующих минералов с применением метода радиоактивных изотопов показало, что при малом расходе солей катионы металлов во многих случаях активируют флотацию. Согласно [1] активация флотации происходит при “расходе солей, равном тому, которое способно закрепляться на минеральной поверхности за счет повышения расхода и прочности закрепления анионного собирателя”. Повышенный расход соли ведет к подавлению флотации в результате связывания собирателя в объеме пульпы и образования олеатов поливалентных металлов, не обладающих собирательными свойствами.

Авторами [2] рассматривался вариант хемосорбции собирателя на минерале. Они полагают, что гидроксидные формы свинца взаимодействуют с протонными центрами Бренстеда на поверхности рутила, формируя поверхностные комплексы. Полученное поверхностное соединение оказывает положительное влияние на сорбцию салицил гидроксамовой кислоты и флотируемость минерала. Таким образом, закрепление реагента обусловлено хемосорбцией и ионно-электростатическим взаимодействием, рН максимального извлечения ~ 6.5. Пример повышения флотируемости ильменита активацией его ионами свинца представлен в [3]. Результаты микрофлотации не активированного ильменита олеатом натрия показали его максимальную (44.08 %) флотируемость в диапазоне рН 6 – 8. Наибольшая плотность адсорбции собирателя наблюдалась при рН 4 и превышала ее в области рН 6 – 8, то есть в области максимального извлечения ильменита. Адсорбция собирателя последовательно снижалась с увеличением рН.

В [4] изучалось влияние одно и двухвалентных солей (NaCl , $\text{Ca}(\text{Cl})_2$) на флотируемость искусственного малахита олеатом натрия. рН среды выбран равным 9.5. Установлено монотонное повышение флотируемости малахита с увеличением от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ М концентрации хлорида натрия. Обработанный

олеатом натрия (концентрация $2 \cdot 10^{-5}$ М), малахит имел отрицательный ζ -потенциал, который практически не менялся с увеличением концентрации NaCl. В растворе обработанный олеатом натрия малахит имел положительный заряд. Зависимость флотуемости малахита олеатом натрия от концентрации ионов носила экстремальный характер, но при этом заметного изменения ζ -потенциала минерала также не отмечено. Превышение концентрации величины $3 \cdot 10^{-5}$ М привело к падению флотуемости минерала.

В [5] исследовалось применение нитрата свинца, как селективного активатора флотации ильменита. Флотация выполнялась во флотационной машине Denver и трубке Hallimond олеатом натрия. Авторам на ряде экспериментов удалось показать, что свинец повышает флотуемость ильменита на 18 % в широком диапазоне pH. Положительное влияние объяснено смещением ζ -потенциала минерала в положительную сторону, что способствовало электростатическому закреплению анионов собирателя. Основным объяснением повышения флотуемости минерала является увеличение плотности сорбции собирателя за счет изменения знака заряда минерала металлом-активатором и электростатического взаимодействия его с анионами олеата.

В практике сульфидной флотации в качестве активаторов могут выступать соли различных тяжелых металлов (Pb, Cd, Fe, Hg, Ag), наиболее широко используется ион меди Cu^{2+} в форме сульфата или нитрата. Сфалерит (ZnS), плохо флотируется короткоцепочечными собирателями (ксантогенатами и дитиофосфатами). Причиной является образование недостаточно прочной связи “цинк – ксантогенат”. Т.о. при флотации сфалерита требуется использовать реагенты способные усиливать связь минерала с собирателем, поэтому ZnS активируют медным купоросом. Характерной особенностью реакции сульфидов цинка с Cu^{2+} является то, что Zn^{2+} высвобождается в раствор для каждого адсорбированного Cu (II). Аналогичное поведение наблюдается в реакции Pb (II), Cd (II) и Ag (I) с сульфидами цинка, а также с Cu (II) с пирротином и галенитом, но не с пиритом [6]. Активации ZnS сульфатом меди объясняется замещением атома цинка на поверхности сфалерита атомом меди. Образовавшееся соединение ксантогената меди имеет более низкое произведение растворимости в сравнении с ксантогенатом цинка, за счет чего собиратель более прочно закрепляется на минерале. В [7] показано, что растворимость сульфида металла-активатора не всегда определяет его активационные свойства, например, таллий (сульфид более растворимый, чем ZnS) активировал минеральную поверхность сфалерита, в то время как олово (сульфид менее растворимый, чем ZnS) нет.

Авторы [8, 9] говорят о том, что активация Cu (II) приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны, что содействует реакциям переноса электронов и позволяет сульфгидрильным собирателям образовывать нерастворимый коллекторный комплекс на поверхности сфалерита посредством электрохимических реакций смешанного потенциала [9, 10]. Авторы (Finkelstein N. P., Allison S. A. 1976) полагают, что активация сфалерита ионами тяжелого металла увеличивает проводимость поверхностного слоя минерала, а внедренные в кристаллическую решетку атомы меди повышают акцепторную способность сфалерита.

Исследования [11] диэлектрических свойств суспензий ZnS активированного с помощью Cu (II), Hg (II) и Ag (I) показали, что ртуть и серебро в отличие от меди не увеличивают электропроводность сфалерита.

Интерес представляют работы по исследованию осадков ксантогенатов тяжелых металлов и их роли в процессе обогащения полезных ископаемых. Влияние осадков ксантогенатов меди на процесс флотации изучено в работе [12]. В момент достижения стехиометрии между тиольным собирателем и сульфатом меди, видимые ассоциаты частиц осадка наблюдаются у всех рассматриваемых собирателей с числом углерода в радикале, равным 2. Автор считает, что адгезия коллоидных гидрофобных осадков бутилового ксантогената меди на поверхности минералов снижает селективность разделения сульфидных минералов за счет неселективного налипания. В [13] показано, что большой избыток ионов меди снижает стабильность гидрозолей и приводит к образованию осадка. Вблизи стехиометрического отношения реагентов обнаружено резкое увеличение гидродинамического диаметра частиц, а при избыточной концентрации ксантогената наблюдается стабилизация золей. При увеличении количества меди свыше стехиометрического спектральные максимумы характерные для ксантогената исчезают и наблюдается полосы характерные для диксантогенида.

Обнаружено, что при участии коротких углеводородных цепей адсорбция объемного осадка солей ксантогената на предварительно хемосорбированном ксантогенате может быть нужна для того, чтобы сульфидные поверхности были достаточно гидрофобными. В работе [14] показана необходимость образования и адсорбции объемного осажденного ксантогената цинка на сфалерите. Авторы полагают, что молекулярный ксантогенат цинка может служить дополнительным гидрофобизатором минеральной поверхности, а флотация достигается только после того, как произошла ассоциация углеводородных цепей или осаждение и адсорбция объемных осадков. В работе [15] при флотации сфалерита ($\text{pH} = 12$) бутиловым ксантогенатом калия проявилось активирующее действие сульфата цинка при его расходе 20 г/т, несмотря на то что, он считается депрессором флотации.

Создание общих принципов выбора композиций флотационных реагентов, состоящих из коллектора и солей металлов-активаторов, является актуальной задачей. Интерес представляют работы по изучению собирательных свойств продуктов взаимодействия, полученных при разной степени стехиометрического соотношения концентраций между реагентом-собирателем и солями тяжелых металлов [16, 17]. Данные продукты способны физически сорбироваться по поверхности минерала и согласно механизму, представленному в работах [18, 19] удалять прослойку жидкости, разделяющей минеральную частицу и пузырек газа, тем самым снимая кинетическое ограничение образования флотационного контакта. Физическая форма сорбции растекаясь по поверхности пузырька, способна к захвату прилегающих слоёв воды в свое движение и «осушению» минеральной поверхности, обращенной к пузырьку. Влияние физической формы сорбции проявляется на границе раздела «газ-жидкость», и не зависит от состояния поверхности минерала.

Основная цель работы - определение применимости механизма работы физически сорбируемых форм собирателя к описанию процесса активации флотации сульфидов и несульфидов солями металлов.

Методы и материалы

Коллоидная система готовилась растворением солей тяжелых металлов и реагентов-собирателей в дистиллированной воде при различной степени стехиометрического соотношения концентраций данных компонентов: для бутилового ксантогената калия (БКК) – 1:2, 1:3, 1:10, для олеиновой кислоты - 1:2, 1:5, 1:10. Исходные концентрации коллекторов приняты постоянными и составили для БКК 0,1 моль/л, для олеиновой кислоты 0,01 моль/л.

С помощью тензиометра LAUDA MPT C определялось поверхностное натяжение производных форм, полученных, а) при взаимодействии БКК (СТО 00204168-003-2009) с сульфатом меди (ГОСТ 19347-2014) или сульфатом цинка (ГОСТ 4174-77) и б) при взаимодействии олеиновой кислоты (ТУ 9145-172-4731297-94) с сульфатом меди (ГОСТ 19347-2014). Опыты проводили на свежеприготовленных растворах.

Растекание десорбируемой физически закрепившейся формы сорбции собирателя обусловлено локальным поверхностным давлением, которое формируется в пленке физической формы сорбции реагента на границе раздела «газ-жидкость». Поверхностное давление рассчитывали, как разность значений поверхностных натяжений воды и коллоидной системы.

Определение скорости растекания коллоидной системы проводилось согласно [20]. Для этого каплю свежеприготовленного раствора подавали на поверхность дистиллированной воды, ее распространение от точки соприкосновения с жидкостью и далее по всему фронту растекания фиксировали с помощью скоростной камеры Evercam 4000-16-с со скоростью 15000 кадров в секунду и разрешением 1280x192.

Флотационные эксперименты проводились на свинцово-цинковой руде (Горевское месторождение) и апатитовой руде (г. Кировск), химический состав которых приведен в табл. 1.

Перед флотацией исследуемые руды измельчались на рольганговой мельнице при соотношении Т:Ж:Ш = 1:1:7. Флотацию апатитовой руды (200 г) выполняли в лабораторной флотационной машине ФМП-Л1 с объемом камеры 0,5 л. Крупность флотируемого материала 50 % класса -71 мкм, расход олеиновой кислоты – 540 г/т и соотношениях в осадках 1:10 и 1:3 (для сульфата меди), рН флотации = 10. Флотация свинцово-цинковой руды (100 г) осуществлялась во флотационной машине 189 ФЛ с объемом камеры 0,3 л. Крупность флотируемого материала составляла до 85 % класса -71 мкм. В каждом опыте во флотокамеру подавался БКК и пенообразователь Т-80 с расходами 100 г/т и соотношениях в осадках 1:10 и 1:3 (для сульфатов меди и цинка), рН флотации = 7.

Время агитации и флотации составило 3 и 5 мин соответственно для каждого опыта.

Таблица 1

Химический состав исследуемых руд

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
Свинцово-цинковая руда (Горевское месторождение)					
Na ₂ O	0,036	FeO	15,4	P ₂ O ₅	0,067
MgO	3,58	SiO ₂	34,5	TiO ₂	0,16
Al ₂ O ₃	3,81	Pb	5,31	S	3,7
K ₂ O	0,69	Cu	<0,01	Cd	<0,001
CaO	10,0	As	<0,001	CO ₂	15,63
MnO	1,24	Zn	4,97		
Апатитовая руда (г. Кировск)					
SiO ₂	26,97	Na ₂ O	11,54	MgO	1,54
CaO	17,18	Fe ₂ O ₃	4,80	SrO	0,92
Al ₂ O ₃	16,41	K ₂ O	4,52	MnO	0,13
P ₂ O ₅	13,58	TiO ₂	1,58		

Результаты

Результаты сульфидной флотации показали:

- при добавлении в пульпу только БКК без солей металла-активатора извлечение по свинцу составило 57,28 %, по цинку 33,21 %;
- при добавлении в пульпу свежеприготовленного раствора с осадком ксантогената меди при соотношении (1:3) извлечение по свинцу составило - 78,13 %, по цинку - 74,13 %, при соотношении (1:10) 77,50 % и 74,38 % соответственно, для растворов с осадком ксантогената цинка при соотношении (1:3) извлечение составило по свинцу - 72,23 %, по цинку - 49,89 %, при соотношении (1:10) 70,02 % и 49,93 % соответственно.

Результаты несulfидной флотации показали:

- при добавлении в пульпу только олеиновой кислоты извлечение P₂O₅ составило 46,39 %;
- при использовании в качестве собирателя растворов диолеата меди, соотношения концентраций исходных веществ в которых приняты 1:5 и 1:10, извлечение P₂O₅ составило 94,18 % и 92,21 % соответственно.

Сопоставляя показатели флотации со скоростью растекания и величиной поверхностного давления (табл. 2) растворов полученных при различных концентрациях собирателей и солей металлов-активаторов, следует отметить, что оценивать флотационную активность только по этим двум параметрам недостаточно.

Таблица 2

Характеристики исследуемых флотационных смесей реагентов

Собира- тель	Металл- активатор	Соотношение кон- центраций собира- тель: соль металла- активатора	Максимальная скорость растека- ния растворов, см/с	Поверхност- ное давление π , мН/м	Мощность поверх- ностного потока, мН·м/с
Олеи- новая кис- лота	Cu (II)	1:2	14,88	14,35	2,14
		1:5	15,67	15,20	2,38
		1:10	20,09	17,75	3,56
БКК	Cu (II)	1:2	23,26	2,2	0,51
		1:3	17,54	1,80	0,32
		1:10	22,87	3,30	0,75
	Zn (II)	1:2	0,5	0,2	0,001
		1:3	25,65	18,20	4,67
		1:10	28,29	8,75	2,48

Критерием способным учитывать поверхностное давление и скорость, с ко-
торо

й перемещается фронт пленки является мощность поверхностного потока. Он позволяет численно оценить изменение собирательной способности при изменении концентраций исходных реагентов и равен произведению скорости поверхностного потока на поверхностное давление указанных форм реагента (табл. 2). С целью доказательства активации флотации по механизму работы физической формы сорбции показатели флотации сопоставлялись со значением данного критерия.

Обсуждение

Установлено, что при несulfидной флотации значение мощности поверхностного потока растворов коррелирует с показателями извлечения P_2O_5 , что доказывает связь поверхностной активности производных форм олеиновой кислоты по отношению к границе раздела «газ – жидкость» с их флотационной активностью.

Высокие показатели активации сульфидной руды медью обусловлены ее окислительными свойствами по отношению к ксантогенату и образованию ионно-молекулярных ассоциатов «ксантогенат – диксантоген», которые обладают высокой скоростью растекания по поверхности воды и мощным поверхностным потоком пленки производных форм реагента-собирающего вне зависимости от нестехиометрических соотношений. Показатели извлечения при активации цинком коррелирует со значением мощности поверхностного потока растворов.

Результаты экспериментов показывают, что, меняя соотношение компонентов, можно регулировать собирательные свойства полученных смесей. Для оценки собирательной способности физической формы сорбции целесообразно

использовать такой параметр, как мощность поверхностного потока. Однако в дальнейшем также необходимо учитывать соотношение физической и химической форм сорбции.

Заключение

Для того чтобы физическая форма сорбции закрепились на гидрофобизированной минеральной поверхности необходимо формирование хемосорбционного покрытия. Предложенный механизм активации, основанный на работе физической формы сорбции в элементарном акте флотации способен дополнить существующие механизмы активации ионами тяжелых металлов, раскрыть возможные причины различий в активационных свойствах металлов, а также послужить основой для создания новых принципов выбора реагентов для флотации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полькин С. И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов. Изд-е второе, перераб. и доп. — М.: Недра, 1987. — С. 428.
2. Li H., Mu S., Weng X., Zhao Y., Song S. Rutile flotation with Pb^{2+} ions as activator: Adsorption of Pb^{2+} at rutile / water interface / Colloid and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, vol. 506, pp. 431–437.
3. Chen P., Zhai J., Sun W., Hu Y., Yin Z. The activation mechanism of lead ions in the flotation of ilmenite using sodium oleate as a collector, Min. Eng., 2017, vol. 111, pp. 100–107.
4. Choi J., Choi S. Q., Park K., Han Y., Kim H. Flotation behaviour of malachite in mono- and di-valent salt solutions using sodium oleate as a collector, Int. J. of Min. Proc., 2016, vol. 146, pp. 38–45.
5. Fan X., Rowson N. A. The effect of $Pb(NO_3)_2$ on ilmenite flotation, Min. Eng., 2000, vol. 13, pp. 205–215.
6. Finkelstein, N.P. The activation of sulphide minerals for flotation: a review / N.P. Finkelstein // International Journal Mineral Processing, 1997, vol. 52, pp. 81-120.
7. Sutherland, K. L. Principles of Flotation // Australas. Inst. Min. and Met., 1955, pp. 157-159.
8. Fornasiero, D. Effect of surface oxide/hydroxide products on the collectorless flotation of copper-activated sphalerite / D. Fornasiero, J. Ralston // International Journal of Mineral Processing, 2006, vol. 78, Issue 4, pp. 231-237.
9. Kartio, I.J. An XPS study of sphalerite activation by copper / I.J. Kartio, C.I. Basilio, R.-H. Yoon // Langmuir, 1998, vol. 14, pp. 5274-5278.
10. Chandra, A.P. A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite / A.P. Chandra, A.R. Gerson // Advances in Colloid and Interface Science, 2009, vol. 145, pp. 97-110.
11. Bessiere J., Chlihi K., Thiebaut J.M., Roussy G. Dielectric study of the activation and deactivation of sphalerite by metallic ions, Int. J. of Mineral Processing, 1990, vol. 28, pp. 1–13.
12. Игнаткина В.А. Исследование процесса образования осадков катионов меди с сульфгидрильными собирателями // Известия вузов. Цветная металлургия. — 2009. — № 4. — С. 14-16.
13. Михлин Ю.Л., Воробьев С.А., Романенко А.С. Ультрадисперсные частицы в переработке руд цветных и редких металлов Красноярского края : монография — Красноярск : СФУ, 2016. — 108 с.
14. Fuerstenau M. C., Clifford K. L., and Kuhn M. C. The role of zinc – xanthate precipitation in sphalerite flotation, Int. J. of Mineral Processing, 1974, vol. 1, pp. 307–318.

15. Горячев, Б.Е. Исследование влияния сульфатов меди, цинка и железа на флотацию сфалерита сульфгидрильными собирателями / Б.Е. Горячев, Чжоу За Яя, А.А. Николаев // Цветные металлы. – 2017. – № 3. – С. 7-11
16. Гаврилова, Т.Г. Развитие механизма активации сульфидной флотации ионами тяжелых металлов / Т.Г. Гаврилова, С.А. Кондратьев // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения - 2020): Материалы Международной конференции. – 2020. – С. 147-149.
17. Цицилина, Д.М. Изменение показателей обогащения апатитовой руды при флотации олеатом свинца / Д.М. Цицилина // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – Новосибирск. - 2020. – Т.7 : №1. – С. 239-242.
18. Кондратьев С.А., Бурдакова Е.А., Коновалов И.А. О собирательной способности физически сорбируемых ассоциатов «ксантогенат ион – диксантогенид» / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2016. — № 3. — С. 123 – 133.
19. Кондратьев С.А., Мошкин Н.П., Бурдакова Е.А. К вопросу определения соотношения активностей и селективностей работы физической и химической форм сорбции реагента / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2016. — № 5. — С. 141 – 150.
20. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П., Коновалов И. А. Оценка собирательной способности легко десорбируемых форм ксантогенатов / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2015. - № 4. – С. 164 – 173.

© Т. Г. Гаврилова, Д. М. Цицилина, 2021

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ КОВШЕЙ АКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ КАРЬЕРНЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ ЭКСКВАТОРОВ¹

Леонид Владимирович Городилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией моделирования импульсных систем, тел. (383)205-30-30 доб. 118, e-mail: gor@misd.ru

Александр Николаевич Коровин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, инженер, тел. (383)205-30-30 доб. 154, e-mail: alexh523vt@mail.ru

Подвергнуты анализу конструкции ковшей активного действия. Выявлено, что динамическое воздействие ковшей на разрабатываемый породный массив может быть вибрационное или ударное. Динамическим исполнительным органом может служить весь ковш, его передняя стенка или отдельные виброударные устройства, вмонтированные в переднюю стенку. Привод активных органов может быть электромагнитным, гидромеханическим, пневматический или гидравлический. Отмечается, что наиболее удачное исполнение ковша активного действия – это встроенные в ковш ударные зубья с пневматическим приводом. Делается вывод, что наиболее продуктивной идеей является ковш активного действия со встроенными ударными устройствами и гидравлическим приводом.

Ключевые слова: экскаватор, ковш активного действия, удар, вибрация, ударное устройство, породный массив, рыхление

ANALYSIS OF ACTIVE BUCKET DESIGNS OF OPEN-PIT AND CONSTRUCTION EXCAVATORS

Leonid V. Gorodilov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, office: +7 (383)205-30-30, ext. 118, e-mail: gor@misd.ru

Alexander N. Korovin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny Prospect, Novosibirsk, 630091, Russia, Engineer, office: +7 (383) 205-30-30 ext.154, e-mail: alexh523vt@mail.ru

The designs of active buckets are analyzed. It is revealed that dynamic impact of buckets on the rock mass can be vibrational or impact. The entire bucket, its front wall, or individual vibration impact devices mounted in the front wall can serve as a dynamic actuator. The drive of the active elements can be electromagnetic, hydromechanical, pneumatic or hydraulic. It is noted that the most successful design of the active bucket is the impact teeth built into the bucket with a pneumatic drive. It is concluded that the most productive idea is an active bucket with built-in impact devices and a hydraulic drive.

Keywords: excavator, active bucket, impact, vibration, impact device, rock mass, rock ripping

¹Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № кода (шифр) научной темы FWNZ-2021-0003

Введение

Идея совмещения процессов отбойки и погрузки горных пород и других твердых материалов (в случае экскаваторов – при помощи ковша активного действия) сейчас представляется очевидной. В СССР впервые она была предложена в 1938 г. Ю.С. Верниковским [1]. Зарегистрированы десятки изобретений возможных конструкций ковша активного действия (КАД), в которых различался как характер и способ приложения виброударной нагрузки, так и вид, геометрия и расположение активных исполнительных органов. Имеется опыт создания КАД и даже серийного производства оснащенных ими экскаваторов [2]. Однако к настоящему времени это в прошлом и такое оборудование не выпускается и не используется. Несколько угас и интерес к этому вопросу. Вместе с тем имеется уверенность, что на современном этапе развития машиноведения и, в частности теории и практики ударных машин, возможно создание ковшей активного действия, которые могут занять определенную нишу при разработке горных пород и других твердых материалов в горной промышленности и в городском хозяйстве. Очевидно, что новый этап разработки и создания такого оборудования требует анализа предыдущего опыта, принципов и источников создания динамической нагрузки и конструкций ковшей активного действия, выбора наиболее подходящей схемы КАД.

Анализ конструктивных исполнений ковшей активного действия

Значительная часть конструкций активных исполнительных органов рассматривает вибрационный способ воздействия на породный массив. Хотя такое воздействия для целей разрушения больших объемов твердого материала представляется недостаточным, приведем примеры конструкций вибрирующего ковша, ковшей с вибрирующей передней кромкой и вибрирующими зубьями.

На рис. 1 показан один из вариантов вибрирующего ковша [2]. Колебания его корпусу (и передней режущей кромке) сообщаются гидроцилиндром 1, соединенным с гидровибратором 2, питаемым от гидронасоса 3. Дополнительные нагрузки, возникающие от колебаний ковша с породой, воспринимаются рабочим оборудованием экскаватора.

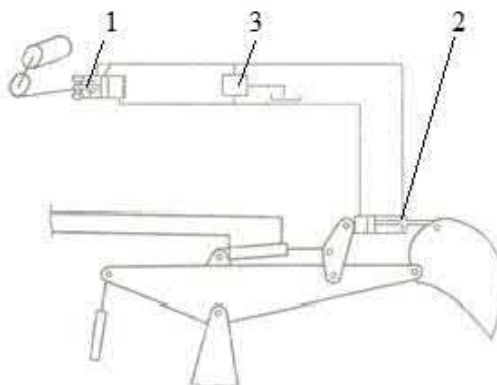


Рис. 1. Принципиальная схема виброковша по патенту № 2092564 Франция

Следующие 3-и разработки рассматривают составные ковши с подвижной передней кромкой или передней стенкой. У ковша с вибрирующей кромкой (рис. 2) U-образная режущая кромка 1 соединена с корпусом ковша 2 шарниром 3. Ковш имеет двойное дно 4, 5, в котором расположен гидроцилиндр 6 с вращающимся золотником управления. Поршень гидроцилиндра через шарнирные соединения 7, палец 8 и траверсу 9 воздействует на зубья 10.

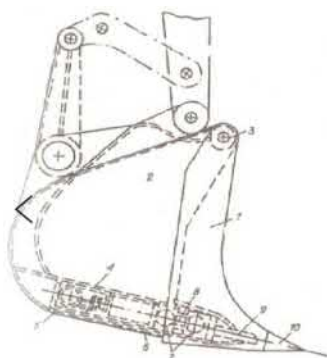


Рис. 2. Ковш с вибрирующей режущей кромкой по патенту № 33228426 ФРГ

Ковш с вибрирующей передней стенкой, приводимой магнитострикционным вибратором, жестко соединенным со стенкой и смонтированным в специальной полости, приведен на рис. 3а. Между передней 3 и задней 2 стенками ковша установлены амортизационные прокладки 5.

Привод вибрирующей передней стенки 1 (рис. 3б), подвешенной вместе с закрепленными на ее козырьке зубьями к боковым стенкам 2 с помощью шарниров 3, выполнен в виде шатунно-эксцентриковых механизмов 4, приводимых во вращение от электродвигателя 5, установленного на рукояти 6. Шатунно-эксцентриковые механизмы преобразуют вращательное движение трансмиссионного вала 7 в возвратно-поступательное движение головок шатунов 8. Последние, будучи шарнирно соединенными с передней стенкой, сообщают ей вынужденные колебательные движения.

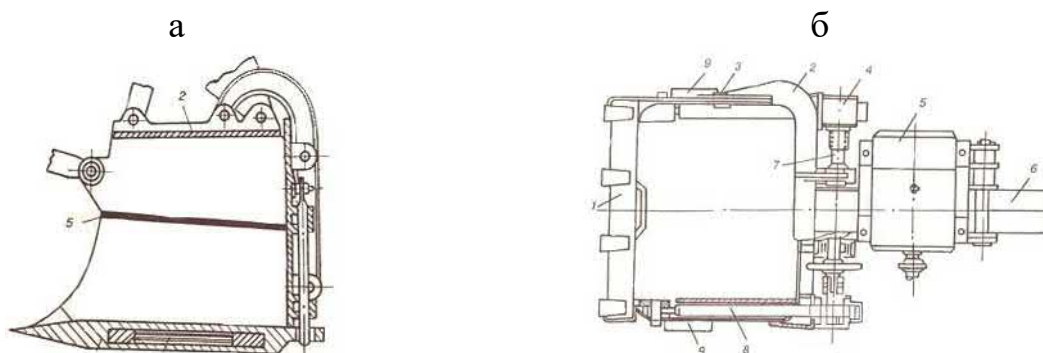


Рис. 3. Ковши с вибрирующей передней стенкой:

а — с магнитострикционным вибратором (а.с. № 333253 СССР), б — с электромеханическим приводом (а.с. № 167192 СССР)

На рис. 4, 5 представлены ковши с вибрирующими зубьями. В качестве источников вибрации зубьев в ковше (рис. 4а) предлагается использовать магнитострикторы, кулачковые валики или коленчатые валы с приводом от гидро- или электродвигателя, гидровибраторы различных конструкций, дебалансные вибраторы. Вибрирующие зубья 1 крепятся к стенке 2 через упругую прокладку 3 гибкой шпилькой 4 таким образом, чтобы вибратор 5 мог сообщать зубьям колебания в направлении резания или перпендикулярно ему.

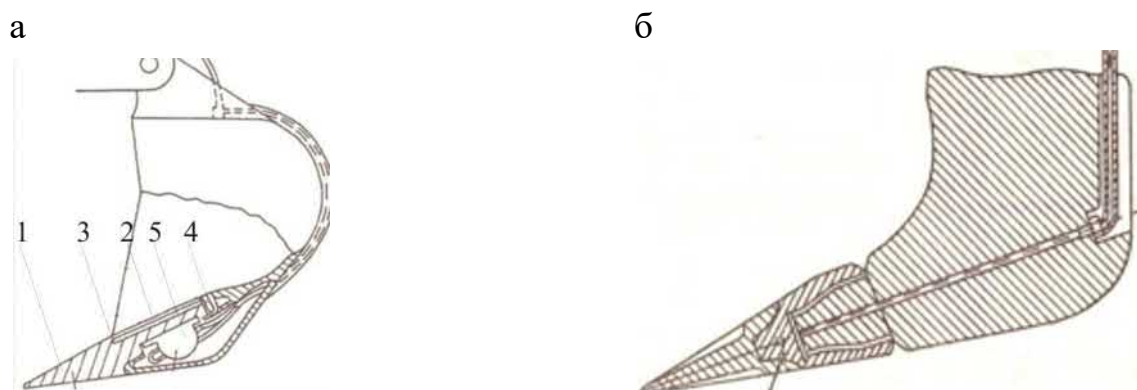


Рис. 4. Ковши с вибрирующими зубьями: а) патент № 2317424 Франция [2], б) с приводом от гидровибратора (патенту № 2082069 Франция)

В патенте № 3550960 (рис. 5) предлагается оснастить ковши роторного экскаватора обычными зубьями и зубьями с виброприводом. При возникновении большого сопротивления копания обычные зубья сдвигаются назад и в работу вступают вибрирующие зубья.

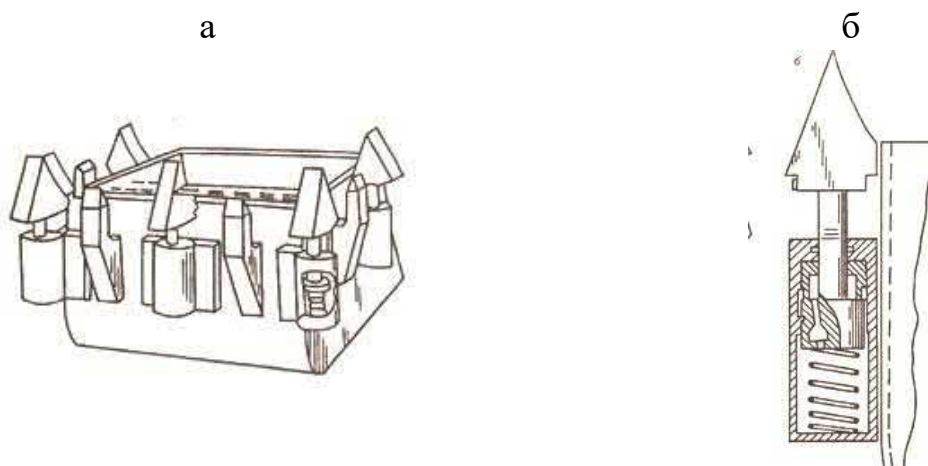


Рис. 5. Ковш роторного экскаватора с виброзубьями (патенту № 3550960 США) а – общий вид, б – виброзуб

Ряд конструкций КАД (рис. 6, 7) основан на принципе перераспределения нагрузки между зубьями. В ковше по а.с. № 616371 СССР (рис. 6) зубья

установлены в сообщающихся гнездах с возможностью возвратно-поступательного перемещения под действием жидкости и пружин. Наиболее нагруженные зубья сдвигаются назад, и в работу вступают зубья, где сопротивление меньше. Таким образом, выравниваются нагрузка и износ зубьев.

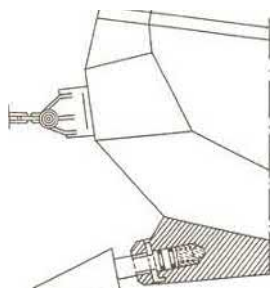


Рис. 6. Ковш экскаватора с подвижными зубьями (а.с. № 616371 СССР)

В японском патенте (рис. 7) зуб 1 выдвигается гидроцилиндром вперед и на нем концентрируются усилия копания экскаватора. Условия работы остальных зубьев облегчаются, что позволяет разрабатывать более прочные породы.

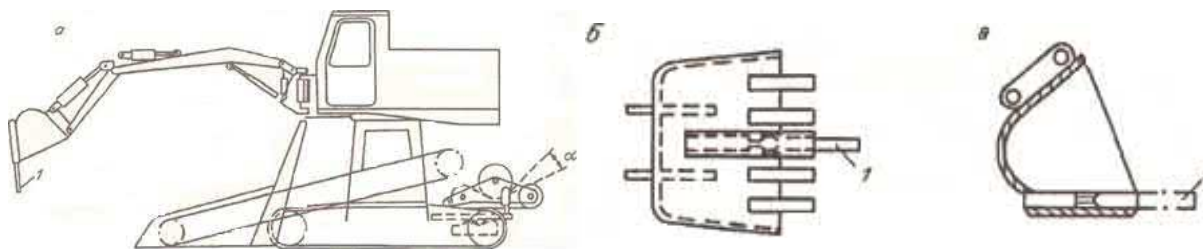


Рис. 7. Ковш с выдвигающимся зубом по патенту № 5743703 Япония:
а — общий вид экскаватора; б — вид ковша снизу, в — вид ковша сбоку

Имеются предложения об оснащении ковшей экскаваторов подвижными зубьями с приводом от гидродвигателя, совершающими благодаря подвеске сложное движение, за счет чего зубья врезаются в породу и отламывают стружку (рис. 8). Внедрение зубьев происходит под действием удара, вибрации или вдавливания.

Экспериментальные образцы ковшей, активное действие которых основано на вибрации, прошли испытания при разработке мерзлых грунтов и слабых горных пород [3][4][5], однако сведений об их дальнейшем практическом применении нет. Основная причина этого — трудность реализации усилий, достаточных для их эффективной работы в породном массиве. Кроме того большинства предложенных конструктивных схем вызывают значительную вибрацию, воздействующую также и на привод и конструкцию базового экскаватора.

Более предпочтительными для работы по прочным горным породам (до 60-80 МПа) представляются КАД, в которых в качестве активных применяются ударные зубья. Они, в связи с особенностями явления удара, могут создать нагрузку на

породный массив, достаточную для его предварительного рыхления с последующей экскавацией ковшом. Об этом свидетельствует и имеющийся у Института горного дела СО РАН положительный опыт испытаний и исследований разработки мерзлых грунтов и горных пород с пределом прочности до 60 МПа КАД экскаваторов ЭО-4121 и ЭКГ-5В с пневматическим приводом зубьев [2][6][7][8][9].

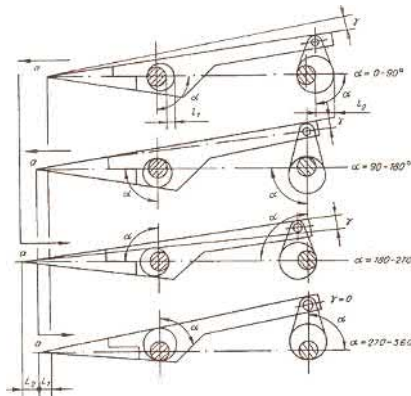


Рис. 8. Схема подвески подвижных зубьев экскаваторного ковша (а.с. № 1071710 СССР)

Приведем несколько примеров конструктивного исполнения таких ковшей, активные зубья которых включаются при появлении на них повышенных сил сопротивления копанию. На рис. 8 показан ковш активного действия с ударными зубьями, пневмомолотами (рис. 8а) и с механическим приводом (рис. 8б). В последнем случае боек, наносящий удары по хвостовику зуба, соединен с подпружиненным рычагом, который взводится канатом, соединенным с шатуном своеобразного кривошипного механизма, установленного на платформе экскаватора.

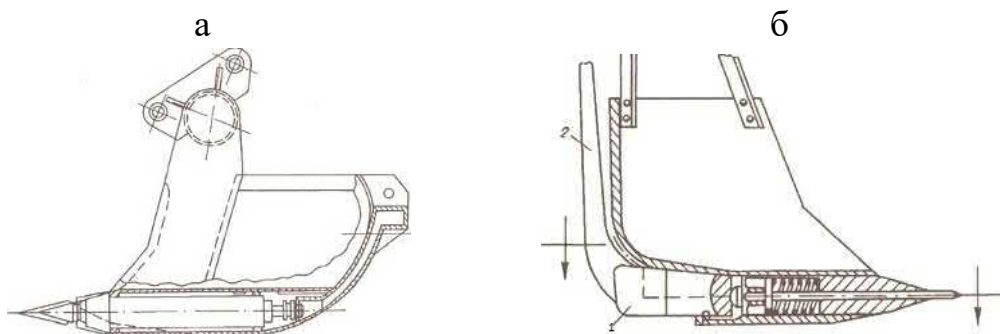


Рис. 8. Ковши с ударными зубьями: а) с пневматическим приводом (а.с. № 207809 СССР), б) с механическим приводом (патенту № 3293778 США)

Активный ковш вместимостью 0.11 м³ с ударным устройством на режущей кромке (рис. 9) предназначался для рыхления и погрузки мерзлого грунта. Ударное устройство состоит из гидродвигателя 1, питаемого от гидросистемы экскаватора, передаточной цепи 2, диска-эксцентрика 3, многопластинчатой рессоры

4, цилиндрического ударника 5 и ударного зуба 6. Эксцентрик заставляет колебаться рессору и укрепленный на ее конце ударник, который наносит удары по хвостовику зуба с частотой 8-10 Гц и энергией 400 Дж.

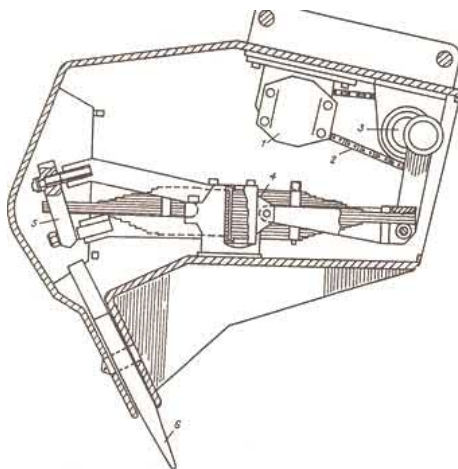


Рис. 9. Ковш с ударными зубьями (патент № 396107 Швеция)

В некоторых конструкциях рассматриваются разнообразные навесные устройства для рыхления мерзлых грунтов и горных пород. Это навесные пневмо- и гидромолоты, рыхлительные зубья. На рис. 10 приведена схема навески пневмомолота 1 на рабочее оборудование обратной лопаты. В рабочее положение пневмомолот приводится гидродомкратом 2.

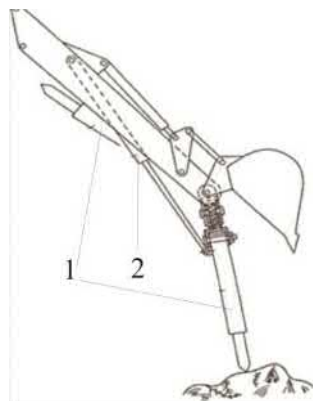


Рис. 10. Рабочее оборудование экскаватора с навесным пневмомолотом (патент № 2194849 Франция)

Ряд конструкции КАД для строительных экскаваторов ЭО-3322 разработан в СибАДИ [10] (рис. 11), в них в качестве активных зубьев применяется гидромолоты.

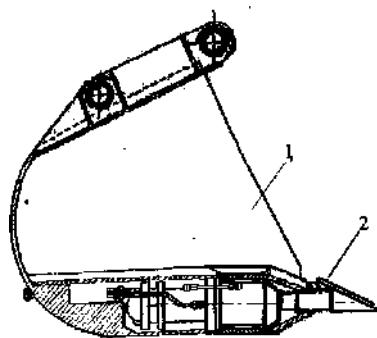


Рис. 11. Конструкция ковша активного действия экскаватора экскаватора ЭО-4121 разработки СибАДИ: 1 - корпус ковша; 2 - ударные зубья

В 80-90-х годах прошлого века в ИГД СО РАН были созданы ковши активного действия к строительным и карьерным экскаваторам соответственно ЭО-4121 и ЭКГ-5В, фотографии которых представлены на рис. 12. Передняя стенка их ковшей оснащена тремя ударными зубьями, размещенными в индивидуальных трубчатых кожухах. У КАД ЭКГ-5В наряду с динамическими оставлены и статические зубья. Приводом зубьев являлись пневмомолоты, каждый из которых имел свой автомат пуска. Испытания и доводка ковшей производились при выемке крепкого угля, цементированного галечника, алевро-литов, песчаников, свинцово-цинковой руды, кварцитов, разработке мерзлых грунтов.



Рис. 12. Общий вид ковша с ударными зубьями экскаваторов ЭКГ-5В (а) и ЭО-4121

Приведенный обзор лишь в небольшой степени отражает многообразие вариантов исполнения активных ковшей. В работах [9][11][12] обсуждается возможность создание ковша с использованием активных ударных зубьев - гидро-ударных устройств. На примере гидравлических строительных экскаваторов показано, что маслостанции строительных экскаваторов достаточно для обеспечения их эффективной работы по прочным горным породам и мерзлым грунтам

Заключение

Исходя из него можно сделать вывод, что наиболее удачным конструктивным исполнением такого ковша является встраивание в его переднюю стенку активных зубьев, в качестве привода которых следует использовать ударные устройства. Гидравлически привод ударных устройств представляются наиболее приемлемыми для этой цели, так как позволяют, во-первых, в качестве источника рабочего тела ГУ применять штатную маслостанцию гидравлического экскаватора и, во-вторых, по ударной мощности ГУ превосходят все остальные типы ударных устройств и могут обеспечить эффективное разрушение твердых материалов с пределом прочности на сжатие до 80 МПа и выше.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № кода (шифр) научной темы FWNZ-2021-0003

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верниковский Ю.С. Ковш экскаватора. Оpubл. 25.05.1954, Бюл. № 11: Пат. 99240 СССР, 1954. С. 4.
2. Маттис А.Р. и др. Экскаваторы с ковшом активного действия: опыт создания, перспективы применения. Новосибирск: Наука, Сиб. издат. фирма РАН, 1996. 174 р.
3. Ветров Ю.А., Баландинский В.Л., Баранников В.Ф. Разрушение прочных грунтов. Киев: Будивельник, 1973. 352 р.
4. Шкуренко Н.С., Рахлин А.Б., Спектор М.Д. Виброметод разработки мерзлых грунтов. Москва: Стройиздат, 1965. 185 р.
5. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. Москва: Машиностроение, 1968. 376 р.
6. Шишаев С.В., Федулов А.И., Маттис А.Р. Расчет и создание ковша активного действия. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989. 115 р.
7. Маттис А.Р. и др. Безвзрывные технологии открытой добычи твердых полезных ископаемых: моногр. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 335 р.
8. Маттис А.Р., Лабутин В.Н. К созданию ковшей активного действия гидравлических строительных экскаваторов/Материалы Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» т. III, г. Новосибирск, 2010г. с.152-159. Новосибирск, 2010. Р. 152–159.
9. Городилов Л.В., Лабутин В.Н. Ковш активного действия к строительным экскаваторам // Машиноведение. 2016. № 2(4). Р. 45–53.
10. Галдин Н.С., Бедрина Е.А. Ковши активного действия для экскаваторов: Учеб. пособие. Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. 53 р.
11. Городилов Л.В., Лабутин В.Н. Перспективы создания ковшей активного действия к гидравлическим строительным экскаваторам ОрелГТУ, 2013. С. 112-119 // Материалы V междунар. науч. симп. «Ударно-вибрационные системы, машины и технологии» (23-25 апреля 2013 г., Орел). Орел: ОрелГТУ, 2013. Р. 112–119.
12. Городилов Л.В., Маслов Н., Коровин А.Н. Оценка параметров системы гидроударных устройств ковша активного действия при прямом подключении к гидросистеме экскаватора 2 размерной группы // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Vol. 2. Р. 45–51.

© Л. В. Городилов, А. Н. Коровин, 2021

РАЗРАБОТКА И СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕВЕРСИВНОГО ГИДРОУДАРНОГО УСТРОЙСТВА

Леонид Владимирович Городилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией, тел. (383) 205-30-30 доб. 118, e-mail: gor@misd.ru

Виталий Геннадьевич Кудрявцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник, тел. (383) 205-30-30 доб. 155, e-mail: vit22@mail.ru

Алексей Игоревич Першин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, инженер, тел. (383) 205-30-30 доб. 155, e-mail: a.ig.pershin@gmail.com

В работе представлена физическая модель реверсивного гидроударного устройства одностороннего действия (с двумя ограничителями движения бойка). В результате проведенных изысканий разработаны конструкция устройства и стенд для ее испытаний, моделирующей сопротивление среды при возможном движении корпуса. Проведены испытания гидроударного устройства с жестко заделанным корпусом показали его работоспособность и вход в полученные в расчетах режимы работы: боек при изменении расхода жидкости совершает удары как в прямом, так и в обратном направлении.

Ключевые слова: реверсивное гидроударное устройство, ограничители движения бойка, трение, расход, частота, предударная скорость

DEVELOPMENT AND BENCH TESTS OF A PHYSICAL MODEL OF REVERSIBLE HYDRAULIC IMPACT DEVICE

Leonid V. Gorodilov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, office: +7(383)205-30-30, ext. 118, e-mail: gor@misd.ru

Vitaly G. Kudryavtsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Researcher, office: +7 (383)205-30-30, ext. 155, e-mail: vit22@mail.ru

Alexey I. Pershin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Engineer, office: +7 (383) 205-30-30 ext. 155, e-mail: a.ig.pershin@gmail.com

The paper presents a physical model of reversible one-way hydraulic impact device (with two striker movement limiters). The researches helped to develop the design of the device and a test bench

simulating the resistance of the medium in case of possible body movement. Tests of a hydraulic impact device with a rigidly sealed body showed its efficiency in the operating modes obtained in the calculations: when changing the flow rate of the liquid, the striker strikes both in the forward and reverse directions.

Keywords: reversible hydraulic impact device, striker movement limiters, friction, flow rate, frequency, pre-impact speed

Введение

Одной из проблем, возникающих при бурении и использовании в уже пробуренных скважинах специального оборудования, является его заклинивание во время проведения технологических операций [1][2][3][4]. В [5] для решения этой проблемы предлагается использовать гидроударное устройства одностороннего действия с двумя ограничителями движения бойка, которое в зависимости от подаваемого к нему расхода может совершать удары как в прямом, так и в обратном направлениях. Присоединение такого устройства к технологическому оборудованию позволит преодолевать заклинивание также в обоих направлениях, что облегчает решение поставленной задачи.

Численное исследование на модели с заданными параметрами [6] и в общем виде в широком диапазоне входных параметров [7] позволило установить основные свойства устройства с двумя ограничителями движения бойка, его способность в одном конструктивном исполнении только за счет изменения подачи жидкости реализовать режимы с ударами в прямом или обратном направлениях.

Следующим этапом исследования является разработка и испытания физической модели такого устройства. В последнее время работы в области разработки новых физических моделей гидроударных устройств работы активизировались, создаются модели как с традиционной позиционной системой управления рабочим циклом, так и как с системами управления, основанными на новых принципах, создаются устройства с независимым регулированием частоты и энергии удара, в том числе адаптированным к условиям обрабатываемой среды [8][9][10][11][12][13][14]. В настоящей работе представлена процедура выбора и обоснования конструкции физической модели реверсивного гидроударного устройства, а также начальные результаты его стендовых испытаний.

Выбор и обоснование конструкции

К техническим устройствам, работающим в скважине, предъявляются особые требования, связанные с геометрией проходимой выработки и необходимостью компоновки их элементов в цилиндрическом корпусе, диаметр которого ограничен диаметром скважины. С учетом необходимости размещения в теле машины каналов подвода и отвода потоков рабочей жидкости, создание конструкции для работы непосредственно в скважине является непростой задачей. Так же в этом случае возникают определенные сложности и в регистрации динамических характеристик рабочих циклов, что необходимо по условиям проекта и при доводке конструкции и параметров устройства.

С учетом вышеуказанных причин на начальном этапе при создании физической модели не ставилось задачи создания устройства, способного работать в скважине или в грунте. Основное назначение разработанной модели должно заключаться в проверке работоспособности реверсивного ГУ, получении на ней обнаруженных при теоретических исследованиях режимов работы, сравнении полученных экспериментальных и теоретических результатов и верификации разработанной нами имитационной модели.

Поэтому была выбрана конструкция ГУ с подводными и управляющими каналами, выведенными за пределы цилиндрической поверхности, ограничивающей боковые стенки устройства. Это удобно с точки зрения: 1) создания макета устройства, 2) сборки и разборки при испытаниях; 3) регистрации динамических характеристик и визуального наблюдения за работой устройства; 4) удешевления изготовления деталей устройства.

На рис. 1 представлен разрез разработанный нами физической модели ГУ, в таблице 1 – параметры его основных элементов. Физическая модель устройства состояла из соединенных резьбовыми соединениями цилиндрических кожухов 1, 13, 5, 10, 17, внутрь которых с небольшим зазором или натягом устанавливались гильзы ударного узла 6, распределителя 11, аккумулятора 15, 16 и наковальни 2, 14, в свою очередь в гильзы 6 и 11 устанавливали соответственно боек 7 и золотник 12. Подача жидкости от источника к ударному устройству производили через внешние штуцеры, соединение распределителя и ударного узла производили также через штуцеры и металлические трубки. Наковальни были посажены на конусы в крайние левую и правую части кожуха. По оси устройства предусмотрено сквозное отверстие, которое в конструкции, предназначенной для работы в скважине, может быть использовано для подачи и отвода рабочей жидкости.

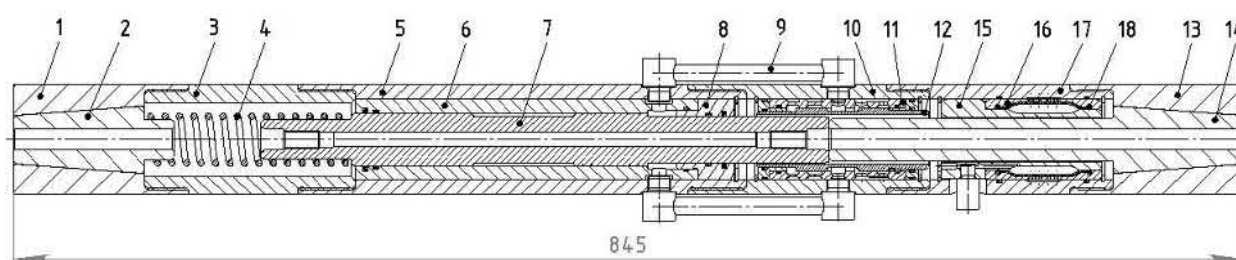


Рис. 1. Разрез сборки реверсивного ГУ:

1, 13, 5, 10, 17 – кожухи наковален, ударного узла, распределителя, аккумулятора; 3 – вставка; 2, 14 – наковальни; 4 – пружина; 6, 7, 8 – гильза, боек и втулка-подшипник ударного узла; 9 – трубки, соединяющие распределитель с гидравлической камерой ударного узла; 11, 12 – гильза ударного узла со втулками, золотник; 15, 16, 18 – внутренняя, внешняя гильзы, мембрана газожидкостного аккумулятора

Основные параметры реверсивного ГУ

Наименование	Значение
Масса бойка m , кг	2.2
Площадь поверхности бойка со стороны гидравлической камеры S_A , см ²	2.14
Положение бойка, при котором происходит соединение канала управления распределителя со сливной линией $x[1]$, мм	39.0
Положение бойка, при котором происходит соединение канала управления распределителя с напорной линией $x[2]$, мм	21.0
Расстояние между ограничителями, мм	60
Объем газа в напорном аккумуляторе V_0 , см ³	35.0
Давление зарядки аккумулятора p_0 , МПа	2.0
Диаметры сечений каналов в ГУ, мм	10.0
Диаметры РВД, соединяющих маслостанцию с ударным устройством, мм	12.0
Ход золотника распределителя, мм	6.0

Методики экспериментальных исследований

Кожухи 1, 13 устройства (рисунок 1) крепили в специальных обоймах с зажимами 3, 4 (рисунок 2а), обоймы в свою очередь болтами крепили к швеллеру, жестко связанному с металлическим столом 1, прикрепленным к основанию из бетона массой ~10 Т. В зажимах крепили кожух ГУ 5 в местах установки наковален.

Методика экспериментальных исследований, регистрации динамических и статических характеристик системы подробно описана в работе [15]. Отметим, что в опытах была задействована маслостанция с насосом НШ14, приводом которой служит электродвигатель мощностью 5.9 кВт, и регулятором расхода МПГ55-12. Регулятор позволял изменять подачу насоса в диапазоне 2 – 32 л/мин, предохранительный клапан маслостанции настроен на максимальное давление 11 МПа.

Для регистрации динамических характеристик использовали датчики давления Honeywell AP121DN и Kistler 6001 с классом точности 0.3, Honeywell MLH03 с классом точности 2, датчик перемещения EDS-150 фирм «Microepsilon» и расходомер DV04.7 с классом точности 0.3, для обработки сигналов – согласующее устройство, аналого-цифровой преобразователь Е-440 и персональный компьютер с программой PowerGraph 3.

Общая схема эксперимента показана на рисунке 2б. Сигналы от датчиков через согласующее устройство СУ поступали на аналого-цифровой преобразователь АЦП (L-Card Е-440) и передавались на персональный компьютер ПК с установленной программой обработки экспериментальных данных PowerGraph 3.3.

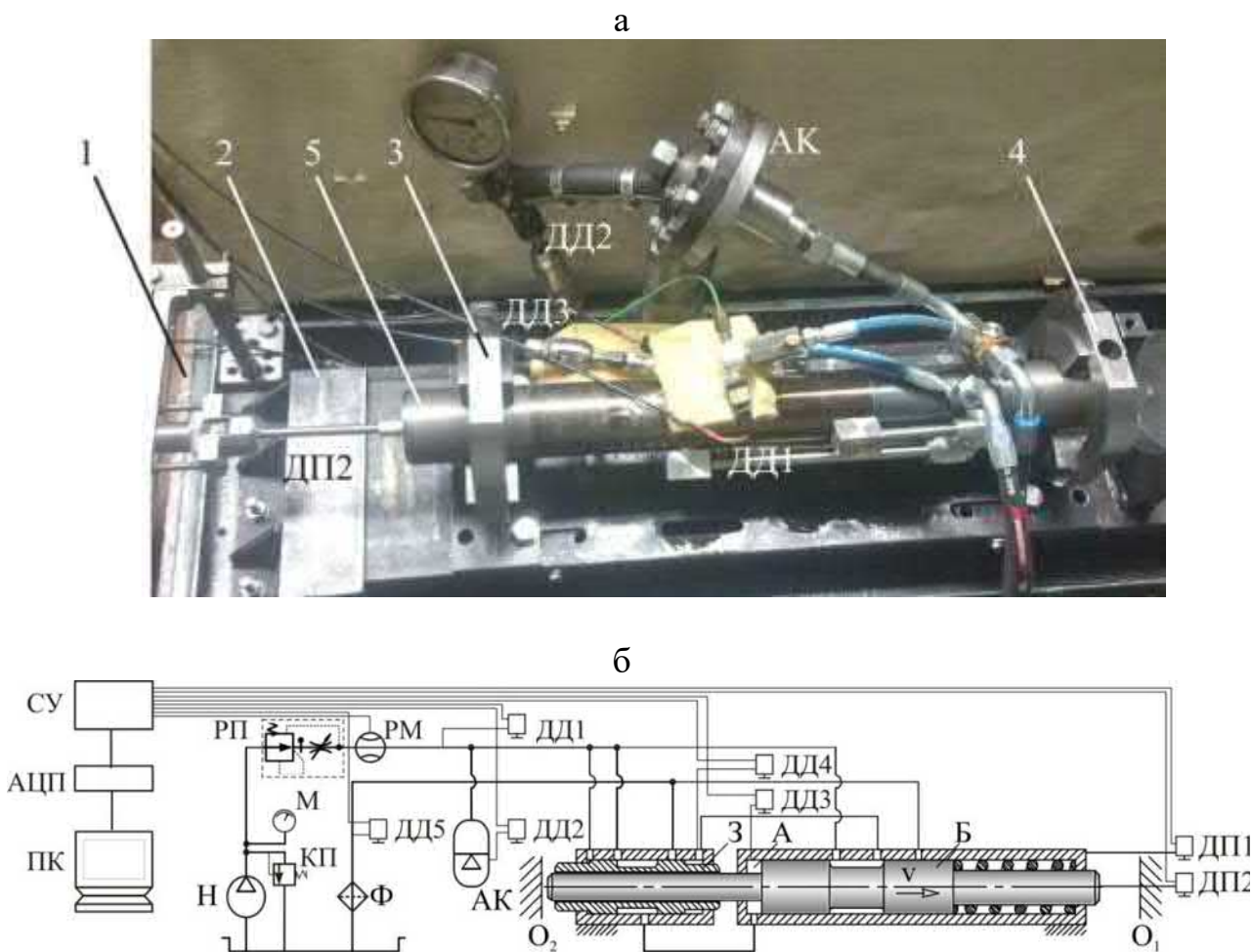


Рис. 2. Фотография устройства (а) и схема эксперимента (б):

Б – боек; 3 – золотник; АК – аккумулятор; РП – регулятор потока; КП – предохранительный клапан; Н – насос; О₁, О₂ – наковальни; СУ – согласующее устройство; АЦП – аналого-цифровой преобразователь L-Card E-440; ПК – персональный компьютер; М – манометр; ДП1, ДП2 – датчики перемещения RIDS-100; ДД1 – ДД5 – датчики давления Honeywell серии ML; РМ – расходомер

Результаты испытаний

Испытания реверсивного гидроударного устройства были проведены при неподвижном кожухе (он жестко закреплялся в обоймах). На рисунке 3 представлен характерный скриншот экрана компьютера с полученными в программе Power-Graph 3 осциллограммами.

На рисунках 4а-в представлены экспериментальные осциллограммы динамических характеристик физической модели ГУ при изменении расхода жидкости, подаваемого к ГУ от $q = 8.8$ до 16.1 л/мин, в таблице 2 – результаты обработки полученных осциллограмм – характеристики ее рабочих циклов.

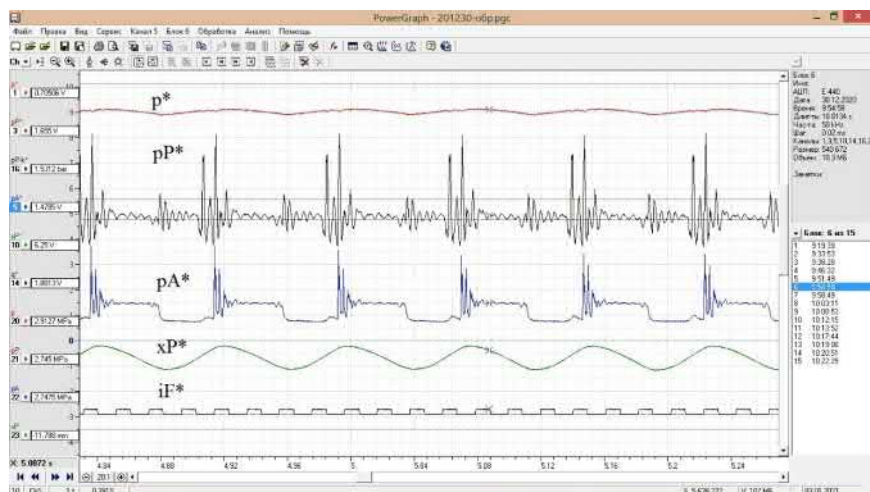


Рис. 3. Осциллограммы регистрируемых в программе PowerGraph 3.3 сигналов: p^* , pP^* и pA^* – соответственно давления в аккумуляторе, напорной линии и гидравлической камере ударного узла, xP^* – перемещение бойка; iF^* – импульсы расходомера

Представленные осциллограммы демонстрируют одноударные режимы в прямом (рисунок 4а) и обратном (рисунок 4в) направлениях и переходной режим (рисунок 4б). В переходном режиме (в расчетах всегда – это двухударный цикл) боек при работе не касался наковален, не доходя до них 5-10 мм. Объяснение этого может быть в высоком трении в паре «боек-гильза» гидроударного устройства и сравнительно больших утечках в элементах гидроударного устройства. При включении насоса устройство стабильно запускалось, однако при небольших расходах давление в начальный момент поднималась выше устанавливающегося затем среднего уровня. При работе в установившихся режимах координаты бойка, при которых происходило переключение золотника распределительного устройства (определялось по давлению в гидравлической камере ударного узла), могли отличаться на 15-20% от цикла к циклу. Эти эффекты также могут быть объяснены достаточно высоким трением в трущихся парах подвижных элементах распределителя и ударного узла, наблюдавшемся уже в процессе сборки устройства.

Таблица 2

Характеристики рабочих циклов физической модели реверсивного ГУ

Расход Q , л/мин	Среднее давление в аккумуляторе p , МПа	Частота f , Гц	Пред-ударная скорость V_{I+}	Максимальная скорость V_{max+}	Пред-ударная скорость V_{I-}	Минимальная скорость V_{min-}
8.8	2.9	13.9	0.9	1.4	—	–1.3
12.5	4.0	15.0	—	1.9	—	–1.8
16.1	6.8	20.0	—	1.7	–1.8	–3.1

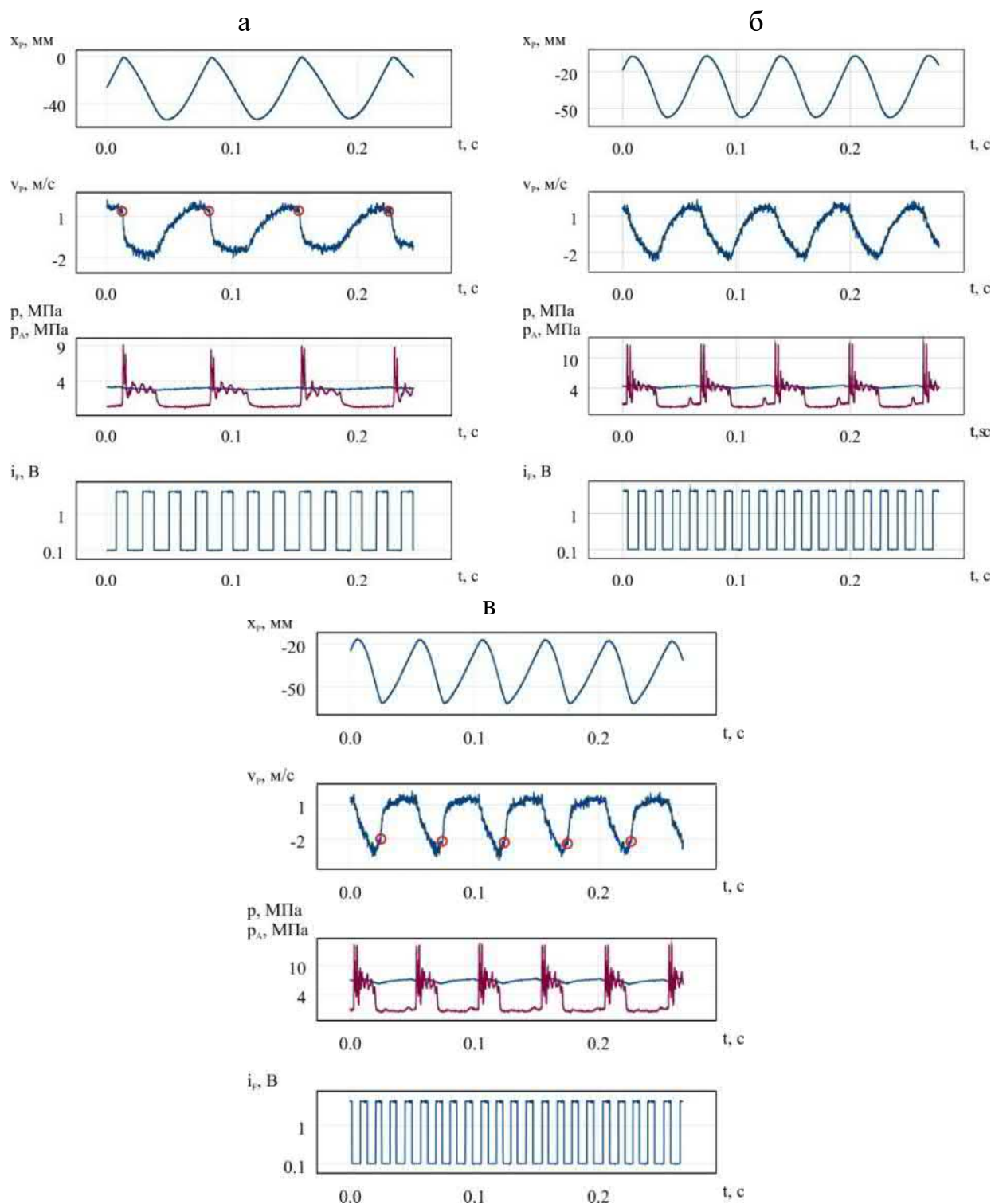


Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы динамических характеристик реверсивного гидроударного устройства при расходе жидкости, подаваемый к ГУ $q = 8.8$ л/мин (а), $q = 12.5$ л/мин (б), $q = 16.1$ л/мин (в): x_p и v_p – соответственно координата и скорость бойка, p и p_Δ – соответственно давления в аккумуляторе (синяя линия) и в гидравлической камере ударного узла (красная линия), i_F – импульсы расходомера, кружками $\circ$ на графиках скорости обозначены моменты соударения бойка с ограничителями

Таким образом, несмотря на выявленные недостатки, испытания физической модели показали ее пригодность для экспериментальных исследований рабочих циклов реверсивного ГУ, а также определили основное направление доводки устройства: это выявление причин высокого трения, оснащение уплотняющих элементов подвижных пар устройства материалами с низким трением.

Заключение

Разработана физическая модель реверсивного гидроударного устройства и стенд для его испытаний и экспериментальных исследований, позволяющий осуществлять фиксацию корпуса устройства с различной силой.

В результате испытаний физической модели установлена ее работоспособность, устройство входит в установившиеся режимы с ударами (при разном расходе насоса) в прямом и обратном направлении.

Высокое трение и утечки не позволили получить промежуточный двухударный режим, устройство входило в автоколебательный цикл с возвратно-поступательным движением без ударов. Устранение указанных недостатков позволит продолжить исследование особенностей его рабочих циклов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00721)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леконцев Ю.М., Сажин П.В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. 2014. № 5. Р. 137–142.
2. Леконцев, Ю.М., Сажин П.В. Способ дегазации угольного пласта: pat. 2480589 USA.
3. Манжосов, В. К., Новиков Д.А. Моделирование переходных процессов и предельных циклов движения виброударных систем с разрывными характеристиками. УлГТУ. Ульяновск, 2015. 236 р.
4. Калининченко, О. И., Комарь П.Л. Перспективы создания ударных механизмов для ликвидации прихватов при бурении геологоразведочных скважин // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. 2012. № 12. Р. 44–49.
5. Городилов Л.В., Сажин П.В. Патент № 27003029 РФ. Устройство для поинтервального гидроразрыва прочных горных пород. БИ № 29 от 15 октября 2019. РФ, 2019.
6. Gorodilov L. Analysis of self-oscillating single-acting hydro-impact system operational modes with two limiters of striker movement // Int J Fluid Power. 2019. № 20_2. Р. 209–224.
7. Городилов Л.В. Исследование основных свойств гидроударной системы одностороннего действия с двумя ограничителями движения бойка // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 6. Р. 105–115.
8. Guoping Y., Yubao C. The Research of New Type Hydraulic Breaker with Strike Energy and Frequency of Adjusted // Mech Eng Res. 2012. Vol. 2, № 2. Р. 45–51.
9. Yang G., Chen L., Huang H. The research of a full hydraulic pressure hydraulic impactor with strike energy and frequency adjusted independently // Proceedings of the 6th International

Conference on Fluid Power Transmission and Control, ICFP 2005. International Academic Publishers, 2005. P. 262–265.

10. Xu Z., Yang G. Modeling and Simulation of Hydraulic Hammer for Sleeve Valve // Engineering. 2016. Vol. 08, № 09. P. 657–668.

11. Liu W. et al. Simulation study on the control valve in hydraulic operating mechanism of the high voltage circuit breaker // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings. 2009.

12. Xu Z. et al. Dynamic Performance Analysis of Gas-Liquid United Hydraulic Hammer // Engineering. 2015. Vol. 07, № 08. P. 499–505.

13. Yang G.P. Research of a Full Hydraulic Pressure Hydraulic Impactor with Strike Energy and Frequency Adjusted Independently // J Hunan Univ Sci Technol (Natural Sci Ed. 2006. Vol. 21, № 1. P. 25–28.

14. Cao Z.Y., Huang X.Y., Wu W.R. Mechanism Study on the Impact of Low Pressure Accumulator with Mechanical Mechanics to Hydraulic Impactor // Adv Mater Res. 2014. Vol. 908. P. 296–300.

15. Городилов Л.В., Кудрявцев В.Г., Пашина О.А. Стенд и методика экспериментальных исследований гидроударных систем // ФТПРПИ. 2011. № 6. P. 67–76.

© Л. В. Городилов, В. Г. Кудрявцев, А. И. Першин, 2021

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ В ПНЕВМОУДАРНЫХ МАШИНАХ И ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ СТАЦИОНАРНО УСТАНОВЛЕННОГО УПРУГОГО КЛАПАНА

Борис Борисович Данилов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. Отдела горной и строительной геотехники, тел. (383) 205-30-30 доб. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Александр Аркадьевич Речкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (383) 205-30-30 доб. 157, e-mail: lexher68@gmail.com

Рассмотрена возможность использования в пневмоударных машинах конструктивных схем со стационарно установленным коническим кольцевым эластичным клапаном. С помощью имитационной модели контактного взаимодействия бойка машины с клапаном оптимизирована форма клапана и доказана его применимость для герметизации камеры обратного хода.

Ключевые слова: Пневмоударные машины, эластичный клапан, имитационная модель, контактная задача, гиперупругий материал, оптимизация формы

APPLICABILITY EVALUATION AND SHAPE OPTIMIZATION OF THE ELASTIC VALVE STATIONARILY INSTALLED IN PNEUMATIC IMPACT MACHINES

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk, 630091, Russia, Dr. Sci., Head of Mining and Construction Geo Equipment Department, office: +7 (383)205-30-30, ext. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Alexandr A. Rechkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk, 630091, Russia, Researcher of Mining and Construction Geo Equipment Department, office: +7 (383) 205-30-30, ext. 157, E-mail: lexher68@gmail.com

The possibility of using construction design with a stationarily installed conical ring-shaped elastic valve in pneumatic impact machines is considered. Using a simulation model of the contact interaction of the striker with the valve, the shape of the valve was optimized and its applicability was proved for sealing the return strike chamber.

Keywords: Pneumatic impact machines, elastic valve, simulation model, contact problem, hyperelastic material, shape optimization

Введение

В последнее время при создании пневматических и гидравлических ударных машин все чаще используются упругие запорно-регулирующие элементы из эластомеров (резины, полиуретана и т.п.). В частности, работы по разработке клапанов такого типа ведутся в СибАДИ (г. Омск) [1, 2], в ИГД СО РАН [3]. В ИГД СО РАН были разработаны пневмомолоты "Тайфун" [4] различных массогабаритных характеристик, в которых в качестве запорно-регулирующего элемента используется кольцевой упругий клапан, обеспечивающий запираание камеры обратного хода. Эти машины уже длительное время применяются в строительстве и горном деле, и показали эффективность и надежность в эксплуатации.

В данной работе предложен вариант пневмоударной машины с коническим кольцевым клапаном, который используется для герметизации камеры обратного хода.

Возможные варианты рабочих схем представлены на Рис. 1. Боек ударной машины под действием давления воздуха, подаваемого в камеру прямого хода движется до соударения с наковальней. Воздух из камеры обратного хода вытесняется при этом через первое выхлопное отверстие. При ударе бойка происходит деформация упругого клапана, выхлопное отверстие закрывается, давление в загерметизированной камере обратного хода за счет поступления воздуха через межкамерный дроссель моментально растет. Под действием давления клапан остается в деформированном состоянии, а за счет разности площадей возникает сила, толкающая ударник назад. Когда передний торец бойка ударника достигает второго выхлопного отверстия, давление в камере обратного хода падает, клапан принимает первоначальную форму и открывает первое выхлопное отверстие, увеличивая сброс воздуха. За счет разности давлений в камерах боек начинает двигаться вперед, цикл повторяется.

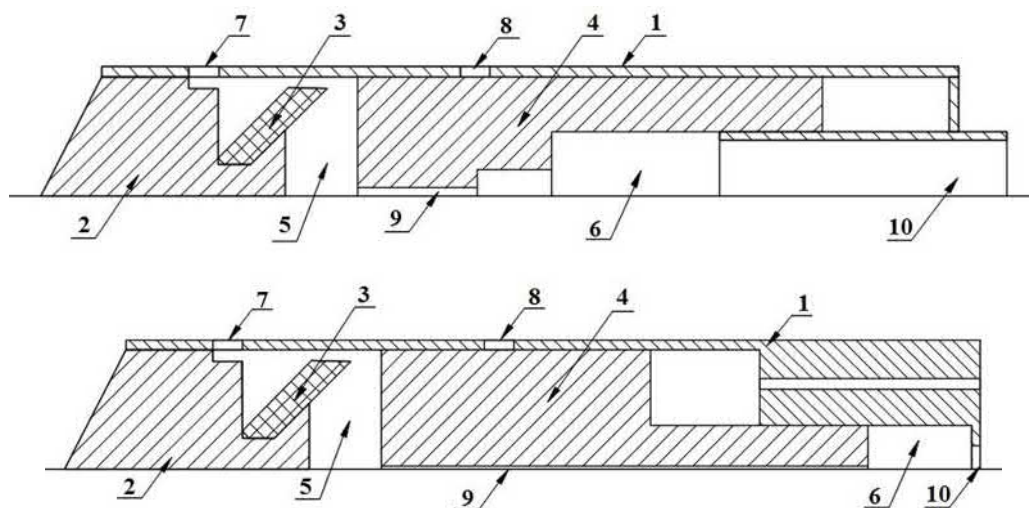


Рис. 1. Рабочие схемы пневмоударной машины. 1-корпус, 2-наковальня, 3-клапан, 4-бойк, 5-камера обратного хода, 6-камера прямого хода, 7-первое выхлопное отверстие, 8-второе выхлопное отверстие, 9-межкамерный дроссель, 10-подача воздуха

Преимуществом такой схемы является то, что наружная поверхность клапана не скользит по внутренней поверхности корпуса, как например в пневмомолотах «Тайфун», а установлена на наковальне стационарно, что уменьшает истирание рабочей поверхности и увеличивает срок службы клапана.

Форма клапана должна быть выбрана так, чтобы он надежно герметизировал камеру обратного хода, перекрывая выхлопной зазор между наружной поверхностью клапана и корпусом. Для оптимизации формы упругого клапана необходимо решить задачу деформации клапана под воздействием бойка ударника.

Методы и материалы

Известно, что зависимость напряжения от деформации для резины, как и для других эластомеров, вообще говоря не подчиняется закону Гука. Это объясняется ее гиперупругими свойствами, наличием одновременно упругих и пластических свойств, отсутствием, в отличие от металла, резкого деления области упругих и пластических деформаций [5].

Для описания поведения резин при сложном напряженном состоянии Мелвином Муни и Рональдом Ривлиным в 1948 г. была разработана феноменологическая теория больших деформаций. Упругий потенциал для изотропного несжимаемого материала можно, согласно теории Муни, записать в виде [6]:

$$W = c_1(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + c_2\left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} - 3\right),$$

где c_1, c_2 – константы материала,

λ_i – главные удлинения.

Зависимость $\sigma(\varepsilon)$ записывается в виде:

$$\sigma = 2c_1\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right) + 2c_2\left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right).$$

Ривлин предложил выражать упругий потенциал через инварианты деформации:

$$W = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j,$$

где $c_{00} = 0$, $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$, $I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$

Выражения для определения нормальных напряжений при однородной деформации тогда запишутся:

$$\sigma_i = 2\left(\lambda_i^2 \frac{\partial W}{\partial I_1} - \frac{1}{\lambda_i^2} \frac{\partial W}{\partial I_2}\right) + p,$$

где p – гидростатическое давление.

Т. е. вследствие нелинейной зависимости напряжения от деформации модуль упругости резины можно определить лишь в дифференциальной форме. Так как точное решение системы нелинейных уравнений невозможно, такие задачи решаются численными методами. Константы материала находятся в результате испытаний образцов, проводимым по специальным методикам.

В последствии был разработан еще ряд моделей гиперупругости, среди которых наиболее широкое распространение получили модели Огдена и Арруда-Бойса.

Расчетная схема задачи взаимодействия бойка ударника с коническим кольцевым резиновым клапаном представлена на рис. 2 а). Данная контактная задача решалась в модуле явной динамики программного комплекса Ansys Mechanical.

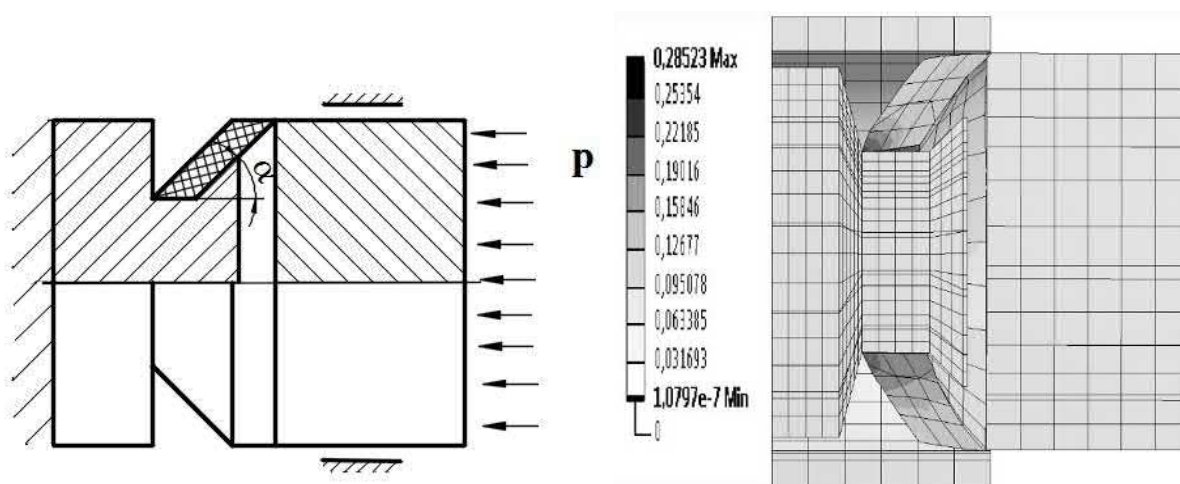


Рис 2. а) – расчетная схема имитационной модели
б) поле деформаций (разрез).

Сложность решения контактных задач состоит в том, что вообще говоря, при взаимодействии двух тел область контакта заранее не известна и может меняться в зависимости от приложенной нагрузки, материала, граничных условий и т.д. Контактующие поверхности могут входить и выходить из контакта часто непредсказуемым образом. Другой проблемой является учет трения, что приводит к нелинейности и ухудшает сходимость решения. Впервые задачу контактного взаимодействия решил в 1881-1882 г.г. Генрих Герц, который изучал оптическую интерференцию при упругой деформации стеклянных линз, находящихся в контакте. Применимость теории Герца ограничивается идеально упругими телами и отсутствием трения в контакте [7]. В настоящее время такие задачи решаются численными методами, в частности МКЭ [8]. На первом этапе решения выполняется поиск точек поверхностей или ребер (узлов конечноэлементной сетки) сблизившихся на заранее установленное расстояние, при котором контакт считается закрытым. На втором этапе вычисляются контактные силы [9].

Результаты

После предварительных исследований за основу был принят резиновый клапан в виде конического кольца с углом $\alpha=45^\circ$ (рис. 2а). Величина давления p , действующего на боек ударника была принята равной рабочему давлению пневмоударной машины - 0,6 МПа. Из результатов расчета (рис. 2б) видно, что наибольшие эквивалентные деформации возникают в окрестности левого (по рисунку) внутреннего ребра клапана, что препятствует дальнейшему «раскрытию» клапана и уменьшает перекрываемый зазор. Исходя из этого, чтобы оптимизировать форму клапана, целесообразно сделать фаску на этом ребре.

По результатам расчета клапана доработанной формы (рис. 3.) клапан наружным диаметром 0,072 м способен при соударении с бойком с запасом перекрыть радиальный зазор до 0,003 м, т.е. герметизировать камеру цилиндра внутренним диаметром 0,078 м. Максимальные радиальные перемещения на наружной поверхности клапана составили 0,0036 м (рис.3 б).

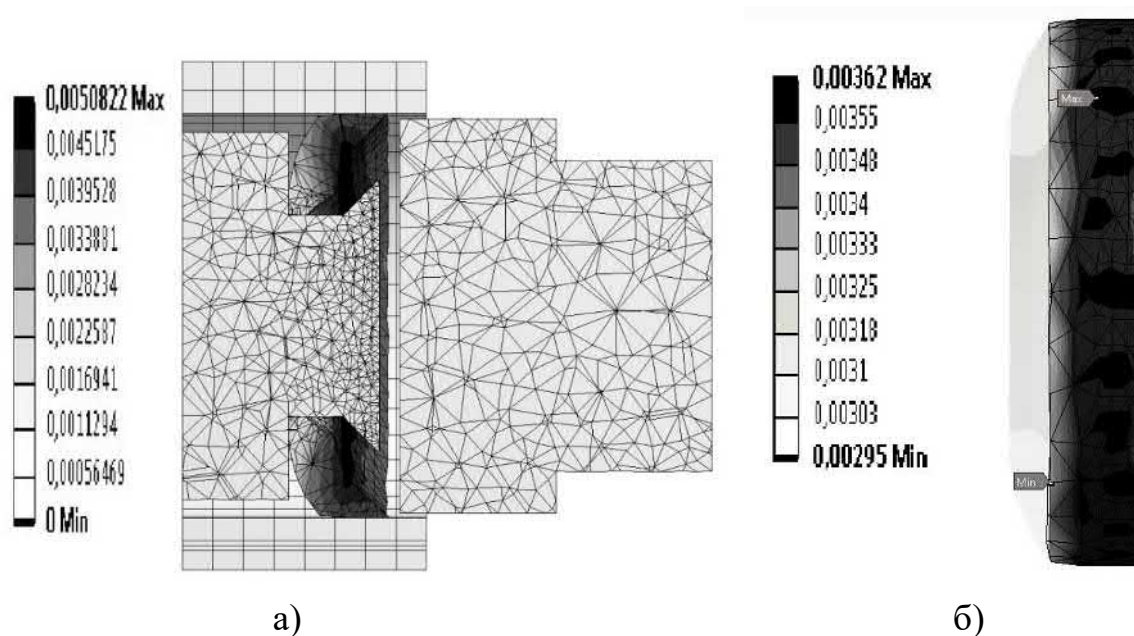


Рис. 3. Поле радиальных перемещений в разрезе модели (а) и на наружной поверхности клапана (б).

Заключение

Таким образом, в рамках построенной имитационной модели, конический упругий клапан выбранных характеристик обеспечивает при деформации перекрытие выхлопного зазора камеры обратного хода и может быть использован для ее герметизации в пневмоударных машинах. Тем не менее, следует верифицировать решение, исследовав модель в программах вычислительной гидрогазодинамики с учетом взаимодействия текучей среды с телом (FSI), при котором будет учтено взаимное влияние деформаций клапана и сил, действующих на клапан.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галдин, Н. С. Многоцелевые гидроударные рабочие органы дорожно-строительных машин. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2005. – 223 с.
2. Галдин Н. С., Бедрина Е. А. Ковши активного действия на основе гидроударников для экскаваторов: Учеб. пособие /М-во образования Рос. Федерации. Сиб. гос. автомоб.-дорож. акад. - Омск: Изд-во СибАДИ. – 2003
3. Данилов Б.Б., Речкин А.А. Обоснование принципиальной схемы и определение энергетических и конструктивных параметров гидромолота объемного типа для проходки скважин в грунте методом виброударного продавливания: Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2018. Т. 5. № 2. с. 234-237.
4. Смоляницкий Б.Н., Червов В.В. Повышение эффективности использования энергоносителя в пневмомолотах для подземного строительства // ФТПРПИ. - № 5. – 2014. – С. 143-157
5. Потураев В.Н. Резиновые и резино-металлические детали машин. - М.: Машиностроение, 1966. – 299 с.
6. Потураев В.Н., Дырда В.И. Резиновые детали машин. - М.: Машиностроение, 1977 - 216 с.
7. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. - М.: Мир, 1989. – 510 с.
8. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с.
9. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

© Б. Б. Данилов, А. А. Речкин, 2021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТРАЖЕНИЯ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЕ: НЕФТЕНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ, ВМЕЩАЮЩИЙ ТРЕЩИНУ ГИДРОРАЗРЫВА

Екатерина Вячеславовна Денисова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), 630091, Новосибирск, ул. Красный проспект 54, к.т.н., с.н.с. лаб. горной геофизики, тел. (383)2170-952, e-mail: slimthing@mail.ru

Алексей Павлович Хмелинин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), 630091, Новосибирск, ул. Красный проспект 54, врио директора ИГД СО РАН, тел. (383) 205-30-30, e-mail: hmelinin@misd.ru

Антон Игоревич Конурин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), 630091, Новосибирск, ул. Красный проспект 54, к.т.н., с.н.с. лаб. физико-технических геотехнологий, тел. (383) 205-30-30, e-mail: konurin@misd.ru

Выполнено моделирование распространения плоской электромагнитной волны СВЧ диапазона для расчета коэффициента ее отражения от однородного слоя. Рассмотрен частный случай многослойной геосреды: нефтенасыщенный пласт, вмещающий трещину гидроразрыва. При обосновании выбора частотного диапазона учитывалась величина неровности поверхности трещины. Выполнен расчет зависимости коэффициента отражения от частоты для электрически менее плотного непоглощающего слоя внутри более плотного непоглощающего вещества (пустотный слой внутри горной породы).

Ключевые слова: трещина гидроразрыва, нефтенасыщенный пласт, плоская электромагнитная волна, однородный слой, коэффициент отражения, электромагнитные свойства, длина волны, шероховатость

SIMULATION OF REFLECTION OF A PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE IN A MULTILAYER MEDIUM: OIL-SATURATED FORMATION ENCLOSING A HYDRAULIC FRACTURE

Ekaterina V. Denisova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Mining Geophysics Laboratory, office: +7 (383) 217-09-52, e-mail: slimthing@mail.ru

Alexey P. Khmelinin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Acting Director of the Institute of Mining, office: +7 (383) 205-30-30, e-mail: hmelinin@misd.ru

Anton I. Konurin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Physical and Engineering Geotechnology, office: +7(383) 205-30-30, e-mail: konurin@misd.ru

Propagation of a plane electromagnetic wave of the microwave range is simulated to calculate the coefficient of its reflection from a homogeneous layer. A particular case of a multilayer geome-dium is considered: an oil-saturated formation enclosing a hydraulic fracture. When justifying the choice of the frequency range, the value of fracture surface irregularity was taken into account. The dependence of the reflection coefficient on frequency for an electrically less dense non-absorbing layer inside a denser non-absorbing substance (a void layer inside a rock) has been calculated.

Keywords: hydraulic fracture, oil-saturated formation, plane electromagnetic wave, homogeneous layer, reflection coefficient, electromagnetic properties, wavelength, irregularity

Введение

Проблема распространения электромагнитных волн в слоистых средах стала чрезвычайно важной за счет теоретического и практического применения в различных областях, в том числе в инженерной геологии. Большинство реальных структур, представляющих интерес, в том числе встречающиеся в природе и искусственно созданные, могут быть в какой-то степени представлены слоистыми структурами. Решение уравнений Максвелла для электромагнитных волн, распространяющихся в таких средах представляет собой серьезные трудности математического характера, и нет общего и единого подхода для их вычисления. В научной статье [1] выполнен обзор современных подходов к изучению процессов распространения электромагнитных волн в многослойных средах, рассмотрены решения прямых и обратных задач.

В рамках данной статьи авторы рассматривают многослойную среду: нефтенасыщенный пласт, вмещающий трещину гидроразрыва. Понимание того, какая часть излучаемой энергии отразится от верхней и нижней границы слоя (в данном случае трещины гидроразрыва), позволит получить информацию о его толщине и свойствах заполняющей среды (проппант или пустота). Таким образом, с помощью методов георадиолокации можно решать важную задачу о равномерности распределения проппанта в сети трещин гидроразрыва, что существенно повысит эффективность технологии гидроразрыва при разработке месторождений углеводородов.

Постановка задачи

Простейший случай распространения электромагнитной волны в слоистой среде показан на рисунке 1, когда волна нормально падает на ряд параллельных плоских слоев, каждый из которых однороден и обладает соответствующими параметрами: диэлектрической проницаемостью ϵ , электропроводностью σ , магнитной проницаемостью μ .

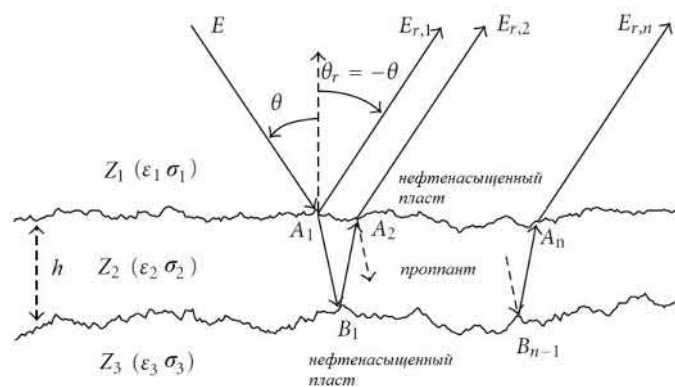


Рис. 1. Процессы отражения в многослойной среде

При рассмотрении явлений отражений плоских электромагнитных волн задача нахождения коэффициентов отражения значительно усложняется вследствие возникновения внутри слоя сложного интерференционного волнового процесса. Данный процесс обуславливается многократным переотражением на верхней и нижних границах слоя прошедшей через верхнюю границу волны. В результате таких многократных актов отражения и прохождения на каждой из границ слоя образуются интерференционные волновые поля как в самом слое, так и в окружающих полупространствах ($A_1 \dots A_n$, $B_1 \dots B_n$). Вследствие гармонического характера изменения характеристик падающей на слой волны, а, следовательно, и всех отраженных и прошедших волн как в слое, так и вне его, в результате интерференции создается стационарный единый волновой процесс, характеризующийся определенными амплитудными и фазовыми характеристиками, количественно зависящими от электромагнитных свойств сред и отношения длины электромагнитной волны, падающей на слой к толщине слоя [2].

Целью исследований данной работы является получение амплитудно-частотных зависимостей коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от трещины гидроразрыванефтенасыщенного пласта с учетом вариации электромагнитных свойств материала (проппанта) заполняющего эту трещину. Полученные результаты позволят оценить возможности применения методов георадиолокации для картирования трещин гидроразрыва.

Принятые допущения и электромагнитные свойства исследуемых слоев

Согласно рис. 1 слой 2 представляет собой трещину, заполненную проппантом толщиной h в первом приближении с плоскими границами раздела. В качестве проппанта, как правило используют песок, насыщенный водой, или в последнее время для обеспечения контрастности сред, с целью повышения разрешающей способности электромагнитных методов картирования трещин гидроразрыва, применяют проппант повышенной электропроводности, например, содержащий солевые растворы или металлические частицы [3-10]. Относительная диэлектрическая проницаемость Слой 2 – проппанта равна ϵ_2 , магнитная проницаемость $\mu_2=1$, электропроводность σ_2 . Слой 2 расположен между

полубесконечными геосредами 1 и 3, которые являются вмещающим трещину массивом и представляют собой нефтенасыщенный пласт с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1=\varepsilon_3$, магнитной проницаемостью $\mu_1=\mu_3=1$ и электропроводностью $\sigma_1=\sigma_3$. Параметры используемых при расчетах сред представлены в таблице 1.

Оценим влияние величины шероховатости поверхности трещины на рассеяние когерентного поля от такой поверхности с учетом вариации частоты. В последние годы понятие шероховатости границ раздела сред стало применяться при моделировании сложных многослойных структур в различных областях [11]. Авторы статей [11-12] рассматривают решение задачи по рассеянию электромагнитных волн от слоистых сред, состоящих из одной или нескольких случайных шероховатых поверхностей. Для изучения влияния шероховатости поверхности на когерентные рассеянные поля используется параметр шероховатости Рэля. Разделение отражающих поверхностей на гладкие и шероховатые связано с соотношениями между длиной облучающей радиоволны λ , среднеквадратической высотой неровностей поверхности r_h и углом θ между нормалью к среднему уровню поверхности и направлением распространения волны. Считают, что для условно гладкой поверхности согласно критерию Рэля выполняется неравенство: $r_h \cos \theta < \frac{\lambda}{8}$. В обратном случае поверхность считается шероховатой [13]. Поскольку при измерении высоты угол падения θ близок к нулю, приближенно считают, что условием гладкости поверхности является превышение λ над r_h на порядок и больше. При неровностях порядка сантиметров поверхность можно считать гладкой лишь для электромагнитных волн дециметрового и более длинноволнового диапазона. Георадиолокационные системы для сантиметровых волн должны при этом проектироваться на основе модели шероховатой поверхности. Когда электромагнитная волна достигает гладкой поверхности, имеет место зеркальное отражение с равными друг другу углами падения и отражения. При падении волны на шероховатую поверхность отражение носит диффузный характер [13].

Таблица 1

Электромагнитные свойства слоев, частотный диапазон

Среда и ее параметры	f , МГц	$60\lambda\sigma$	λ , м	λ_{cp} , м
Вариант 1.Слой 2: трещина, заполненная проппантом – песок, насыщенный пресной водой: $\varepsilon_2=30$, $\sigma_2=3 \cdot 10^{-2} 1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	500	1,08	0,6	0,109
	1000	0,54	0,3	0,054
	3000	0,18	0,1	0,018
1. Вариант 2.Слой 2: трещина, заполненная проппантом – песок, насыщенный соленой водой: $\varepsilon_2=30$, $\sigma_2=2 1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	500	72	0,6	0,081
	1000	36	0,3	0,048
	3000	12	0,1	0,017
Вариант 3.Слой 2: трещина, заполненная проппантом – влажный песок: $\varepsilon_2=20$, $\sigma_2=10^{-2} 1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	500	0,36	0,6	0,134
	1000	0,18	0,3	0,067
	3000	0,06	0,1	0,022
2. Вмещающий слой 1 и 3 (одинаковый для 1-3 вариантов расчета) – песчаник нефтенасыщенный: $\varepsilon_1=\varepsilon_3=15$, $\sigma_1=\sigma_3=10^{-2} 1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	500	0,36	0,6	0,154
	1000	0,18	0,3	0,077
	3000	0,06	0,1	0,025

По методике, предложенной в работах [12, 14, 15] были выполнены расчеты полей, рассеянных от шероховатых слоев, с разной величиной неровностей ($r_h=2,5$ мм, 5 мм и 10 мм). На рисунке 2 представлено частотное поведение полей E_r рассеянных на шероховатых слоях по отношению к амплитуде $E_{амп}$ рассеянного поля для эквивалентной идеально плоской поверхности в широком диапазоне частот $[0,5-8\text{ ГГц}]$ для трех вариантов заполнения трещины проппантом при неизменных свойствах вмещающего слоя (см. Таблицу 1).

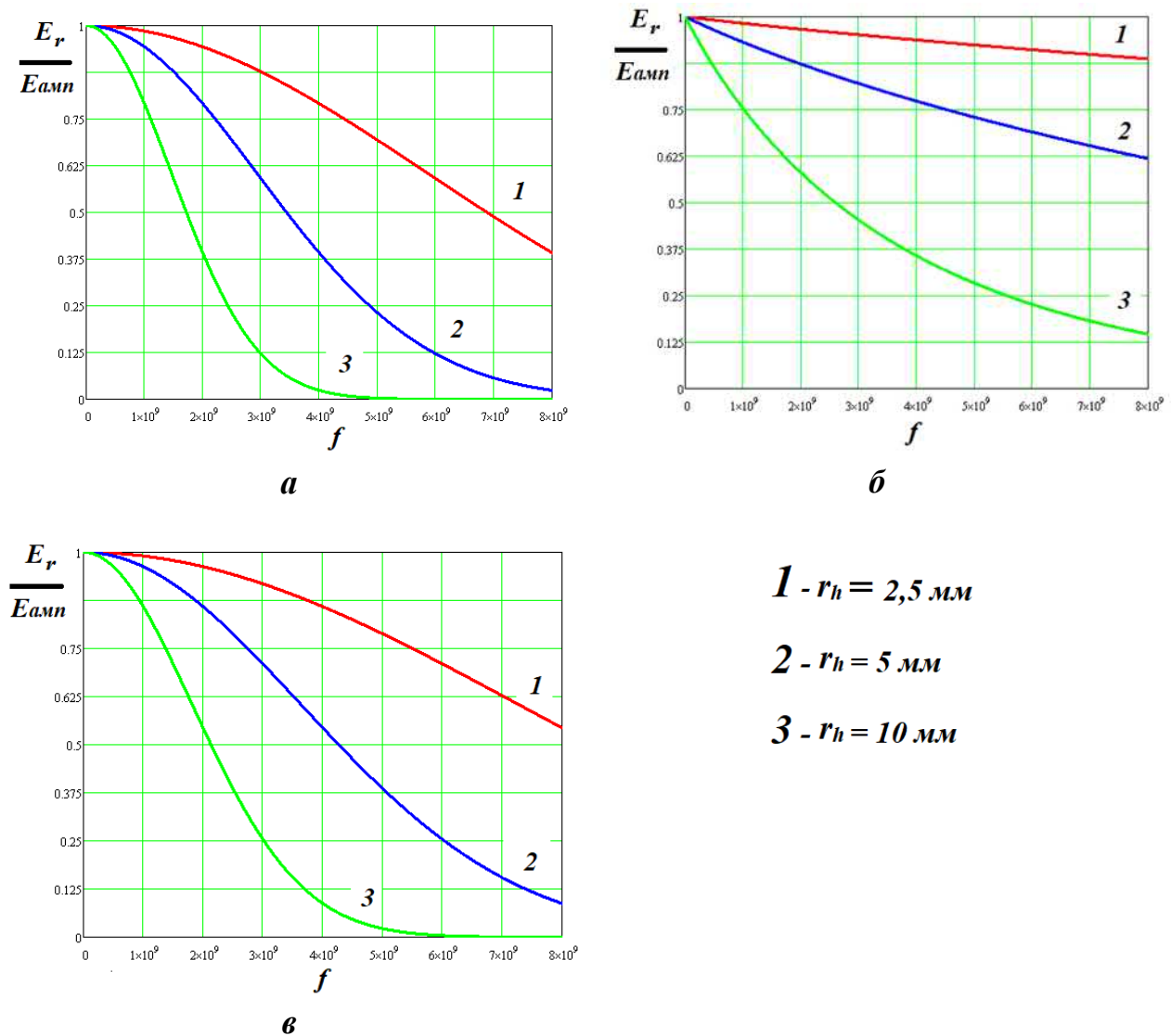


Рис. 2. Затухание когерентного поля из-за шероховатости слоя от частоты:

а – для Варианта 1 ($\epsilon_2=30$, $\sigma_2=3 \cdot 10^{-2} \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}$); б – для Варианта 2 ($\epsilon_2=30$, $\sigma_2=2 \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}$); в – для Варианта 3 ($\epsilon_2=20$, $\sigma_2=10^{-2} \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}$)

Влияние шероховатости границ раздела непрерывно возрастает с частотой, вызывая уменьшение рассеянной величины E_r в слое. Это подтверждается параметрами рэлеевской шероховатости, которые увеличиваются с увеличением частоты. Согласно полученным расчетам для заданных параметров, рассеянии напряжённости E_r можно считать несущественным (до 25%) в диапазоне частот до

3 ГГц при величине шероховатости слоя не превышающей 2,5 мм. При этом, чем выше электропроводящие свойства проппанта ($\epsilon\sigma$), тем менее существенно сказывается шероховатость поверхности слоя трещины гидроразрыва на обнаруженные характеристики. Для дальнейших расчетов примем, что поверхность трещины не имеет шероховатостей по своей величине превышающих 2,5 мм. Частота распространения электромагнитных волн в рассматриваемых средах не превышает 3 ГГц ввиду их существенного поглощения в более высоком диапазоне частот. Фронт волны принят плоским.

***Аналитический расчет зависимости коэффициента
отражения плоской электромагнитной волны от слоя
(трещины, заполненной проппантом),
расположенного внутри нефтенасыщенного пласта***

Чтобы рассчитать коэффициент отражения от слоя, достаточно вычислить «входной импеданс» слоя $Z_{вх}$ т.е. импеданс на границе 1-2. В литературе [16] получена формула, позволяющая пересчитывать импеданс с одной границы слоя на другую:

$$Z_{вх} = \frac{Z_1 - iZ_2 \operatorname{tg} k_2 h}{Z_2 - iZ_1 \operatorname{tg} k_2 h} Z_2 \quad (1)$$

Коэффициент отражения от слоя будет определяется формулой [16]:

$$V = \frac{Z_{вх} - Z_3}{Z_{вх} + Z_3}, \quad (2)$$

где Z_1, Z_2 и Z_3 – нормальные импедансы на соответствующих границах слоя, определяемые при данном виде поляризации падающей волны:

$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_k}}$, т.к. μ рассматриваемых слоев равна 1, а $\epsilon_k = \epsilon' - i60\lambda\sigma$ – комплексная диэлектрическая проницаемость, то расчет сопротивлений слоев сводится к вычислению $Z = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_k}}$. Постоянная распространения в слое равна $k_2 = \frac{i\omega\sqrt{\epsilon_k}}{c} = \frac{\omega}{c}(n + pi)$. В литературе [17] введено обозначение $\sqrt{\epsilon_k} = n - ip$, и формулы для расчетов коэффициентов p и n :

$$n = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left[\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + (60\lambda\sigma)^2} \right]}, p = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left[-\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + (60\lambda\sigma)^2} \right]}. \quad (3)$$

Интерпретация уравнений Френеля и Снелиуса при расчете коэффициентов отражения и преломления проста в случае падения электромагнитной волны на границу раздела сред двух диэлектриков. В среде с потерями по своим свойствам

приближающихся к проводникам или «неидеальным диэлектрикам» волновое число k и импеданс Z необходимо рассматривать как комплексные числа. [18-19]

При выполнении условия: $\varepsilon' \gg 60\lambda\sigma$ плотность токов смещения ($j_{\text{см}}$) значительно больше, чем плотность тока проводимости $j_{\text{пр}}$, значения $\frac{j_{\text{см}}}{j_{\text{пр}}}$ много больше 1. Это имеет место в средах по своим свойствам приближающихся к диэлектрику, при этом упразднены выражения для коэффициентов p и n [17, 20]: $n \approx \sqrt{\varepsilon}$ и $p = \frac{60\lambda\sigma}{2\sqrt{\varepsilon'}}$. Подставив эти коэффициенты в формулы для расчета скорости распространения волн в среде: $v_{\text{ср}} \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}}$.

Упрощение формул для расчета коэффициентов n и p в случае сред, приближающихся по своим свойствам к полупроводнику. Если плотность токов проводимости значительно превосходит плотность токов смещения, то имеет место условие: $\varepsilon' \ll 60\lambda\sigma$. Тогда коэффициенты n и p равны соответственно [17, 20]: $n \approx \sqrt{30\lambda\sigma}$, $p \approx \sqrt{30\lambda\sigma}$. Скорость распространения волн в среде будет равна: $v_{\text{ср}} \approx \frac{c}{\sqrt{30\lambda\sigma}}$.

Подставляя (1) в (2) получена формула для расчета коэффициента отражения от слоя [2, 16]:

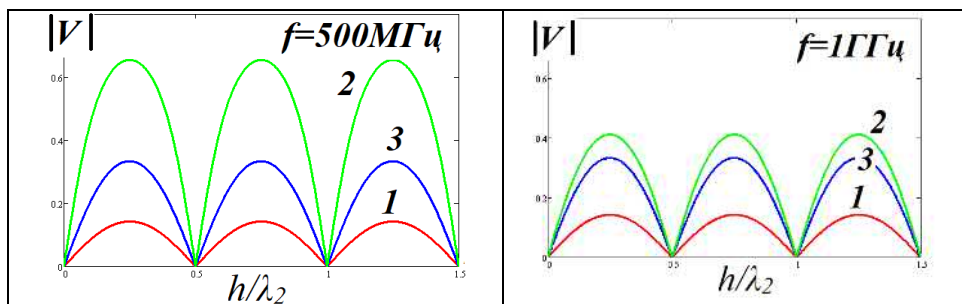
$$V = \frac{(Z_2 - Z_3)(Z_1 - Z_2)e^{-ik_2h} + (Z_2 - Z_3)(Z_1 + Z_2)e^{ik_2h}}{(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)e^{-ik_2h} + (Z_2 - Z_3)(Z_1 - Z_2)e^{ik_2h}} \quad (4)$$

Данную формулу можно переписать в виде выражений, в которые входят коэффициенты отражения на верхней V_{12} и нижней V_{23} границах слоя [2, 16]:

$$V = \frac{V_{12} + V_{23} e^{2ik_2h}}{1 + V_{12}V_{23} e^{2ik_2h}}, \quad (5)$$

где: $V_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$; $V_{23} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}$.

На рис.3 представлена частотная зависимость модуля коэффициента отражения $|V|$ от волновой толщины слоя $\frac{h}{\lambda_2}$ (где λ_2 – длина волны в слое 2, т.е. в пропанте).



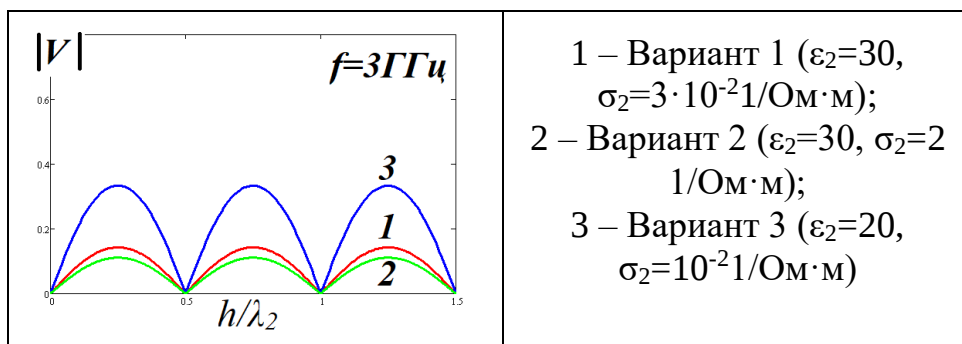


Рис. 3. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения при нормальном падении электромагнитной волны на трещину гидроразрыва, заполненную проппантом

Полученные зависимости модуля коэффициента отражения имеют осциллирующий характер и представляют собой чередование максимумов и минимумов этих величин при определенных периодических значениях $\frac{h}{\lambda_2}$. Причем положение максимумов $|V|$ соответствует той частоте падающей волны, на которой при заданной толщине слоя и его электромагнитных параметрах, определяющих величину λ_2 , слой в наибольшей степени пропускает через себя энергию падающей на него волны. При этом для более проводящего проппанта в виде песка насыщенного соленой водой (Вариант 2) модуль коэффициента отражения существенно зависит от частоты электромагнитной волны, которая определяет поглощение излучаемой энергии в слое. Для двух других вариантов проппанта по своим свойствам приближающихся к диэлектрикам модуль коэффициента отражения практически не зависит от частоты электромагнитной волны. Предложенная модель расчета не учитывает поглощающие свойства слоя, при $h \rightarrow \infty$ необходимо учитывать поглощение электромагнитной волны в среде и рассматривать коэффициенты поглощения k_1, k_2 и k_3 как комплексные величины. При этом зависимость модуля коэффициента отражения от волновой толщины слоя будет иметь также осциллирующий характер, однако с увеличением толщины слоя h наблюдается уменьшение амплитудных значений ($|V_{max}|$ и $|V_{min}|$) этой осциллирующей функции.

При нормальном падении волны на слой ($\theta=0$) и условии, что $h=m\lambda_2/2$, где m – целое число 1, 2, 3... (имеет место так называемый *полуволновой слой*), из выражения (5) следует что коэффициент отражения от такого слоя равен [20]:

$$V = \frac{V_{12} + V_{23}}{1 + V_{12}V_{23}} = \frac{Z_3 - Z_1}{Z_3 + Z_1} = V_{13}.$$

Это соответствует коэффициенту отражения от границы между окружающими слой полупространствами. И, если импедансы полупространств

одинаковы, как в нашем случае: $Z_1=Z_3$, то отражение от слоя полностью отсутствует $V=0$ и волна проходит без потерь на отражение, не замечая слоя [2].

***Аналитический расчет амплитудно-частотной зависимости
коэффициента отражения от электрически менее плотного
слоя внутри горной породы***

После осуществления технологии гидроразрыва и до процесса распределения расклинивающего трещины проппанта целесообразно оценить распределение участков трещинообразования вдоль исследуемой скважины. В связи с этим, рассмотрена модель слоя электрически менее плотного непоглощающего вещества внутри более плотного непоглощающего вещества – это пустотный слой трещины внутри нефтенасыщенного пласта.

Обозначим $V_{12}=V$, тогда $V_{23}=-V$. Постоянная распространения в слое при этом равна $k_2 = \frac{j\omega\sqrt{\varepsilon}}{c} = j\omega/v_{cp}$, откуда [21]:

$$V'(f) = V(f)e^{j\varphi(f)} = \frac{V - Ve^{-j2\pi f\Delta t}}{1 - V^2e^{-j2\pi f\Delta t}}$$

где $\Delta t = 2h/v_{cp}$ – время двойного распространения волны в слое. Модуль коэффициента отражения [21]:

$$|V(f)| = \frac{2V|\sin\pi f\Delta t|}{\sqrt{1 - 2V^2\cos 2\pi f\Delta t + V^4}}$$

На рис. 4 представлена амплитудно-частотная характеристика модуля коэффициента отражения с периодом $1/\Delta t$. Максимумы равны $2V/(1+V^2)$, т.е. несколько больше V . Таким образом такой слой можно рассматривать как режекторный гребенчатый фильтр, у которого «зубья» режекции расположены на частотах $m/\Delta t$, где $m=1, 2, 3, \dots, m$.

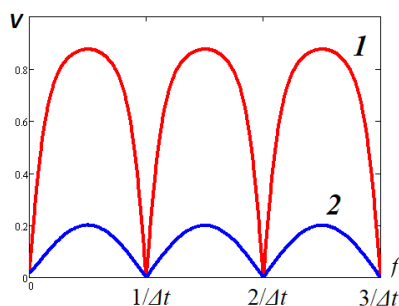


Рис. 4. Амплитудно-частотная зависимость модуля коэффициента отражения электромагнитной волны от менее электрически плотного слоя внутри нефтенасыщенного пласта: 1 – пустотный слой с $\varepsilon_2=1$; 2 – слой влажного песка с $\varepsilon_2=10$

При этом, согласно данным рис. 4 модуль коэффициента отражения электромагнитной волны от пустотного слоя (т.е. трещины не заполненной проппантом) значительно превышает модуль коэффициента отражения электромагнитной волны от трещины, заполненной влажным песком с диэлектрической проницаемостью соизмеримой с диэлектрической проницаемостью нефтенасыщенного пласта, что на практике позволит выделять зоны трещинообразования после осуществления гидроразрыва пласта электромагнитными методами. Это позволит проводить картирование трещин гидроразрыва для расчета требуемого объема проппанта.

Выводы

Выполнен аналитический расчет амплитудно-частотной зависимости коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от слоя (трещины, заполненной проппантом), расположенного внутри нефтенасыщенного пласта. При расчетах диэлектрическая проницаемость слоев и волновое число рассматривались как комплексные величины. Установлено, что модуль коэффициента отражения существенно зависит от волновой толщины слоя трещины гидроразрыва, а также электромагнитных свойств заполняющего ее проппанта. При этом, чем выше его электропроводность, тем более выражена эта зависимость. Расчеты были выполнены с учетом когерентного рассеяния электромагнитного поля на шероховатой поверхности трещины. Была определена минимальная величина шероховатости слоя для заданных условий при которой поверхность можно рассматривать как плоскую границу раздела сред. Предложенные методики расчета и полученные результаты дадут возможность обосновывать использование проводящего проппанта, выбирать его оптимальные электромагнитные параметры для обеспечения высокой разрешающей способности при картировании трещин гидроразрыва.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Imperatore P., Iodice A., Pastorino M., Pinel N. Modelling Scattering of Electromagnetic Waves in Layered Media: An Up-to-Date Perspective // International Journal of Antennas and Propagation Volume 2017.
2. Рубан А.Д., Бауков Ю.Н., Шкурятник В.Л. Горная геофизика. Электрометрические методы геоконтроля. Ч.3. Высокочастотные электромагнитные методы. – Учебное пособие. – М.: МГГУ, 2002. – 147с.
3. Hoversten G., Commer M. Electromagnetic Characterization of Hydraulic Fracture Shape and Permeability // 77th EAGE Conference and Exhibition. – 2015.
4. Khmelinin, A.P., Konurin, A.I., Khmelinin, D.P., Konurina, M.I. Antenna assembly for down-the-hole measuring probe for locating and sizing hydraulic fracturing cracks in rock mass // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 523(1), 012032.
5. Патент на изобретение №2374438. Способ контроля развития трещины гидроразрыва пласта и ее геометрии / О.Н. Журавлев, Д.А. Коротеев, М. Чарара // Оpubл. в БИ. – 2009. – № 18.
6. Patent US №6330914. Method and apparatus for tracking hydraulic fractures in unconsolidated and weakly cemented soils and sediments / Hocking Grant, Wells Samuel L // Pub. 18.12.2001.

7. Патент на изобретение №2695411. Способ определения геометрии трещин при гидро-разрыве пласта / Г.В. Падерин, Е.В. Шель // Оpubл. в БИ. – 2019. – № 21.
8. Hoversten G., Schwarzbach C. Monitoring Hydraulic Fracture Volume using Borehole to Surface EM and Conductive Proppant. – October 2020, Geophysics 86(1):1-76.
9. Hoversten G., Schwarzbach C. Monitoring hydraulic-fracture volume using surface-to-borehole EM and conductive proppant // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018. – 2018. 863-867.
10. Hoversten G., Schwarzbach C., Belliveau P., Haber Eldad, Shekhtman R. Borehole to Surface Electromagnetic Monitoring of Hydraulic Fractures // Conference: 79th EAGE Conference and Exhibition 2017. – 2017.
11. Tabatabaenejad A., Duan X., Moghaddam M. Coherent scattering of electromagnetic waves from two-layer rough surfaces within the kirchhoff regime // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2013. – vol. 51. – no. 7. – pp. 3943–3953.
12. Pinel N., Le Bastard C., Bourlier C., Sun M. Asymptotic modeling of coherent scattering from random rough layers: Application to road survey by GPR at nadir // International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2012.
13. Алексеев О.А., Баскаков А.И., Терехов В.А. Радионавигационные системы. Часть 1. Автономные радионавигационные системы летательных аппаратов. – Учебное пособие: под ред. Ю.Н. Бугаева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 68 с.
14. Pinel N., Bourlier C., Saillard J. Degree of roughness of rough layers: extensions of the rayleigh roughness criterion and some applications // Progress In Electromagnetics Research B. – 2009. – vol. 19. – pp. 41–63.
15. Pinel N., Bourlier C. Scattering from very rough layers under the geometric optics approximation: further investigation // Journal of the Optical Society of America A. – 2008. – vol. 25. – no. 6. – pp. 1293–1306.
16. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 343 с.
17. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Гос. изд. литературы по вопросам связи и радио, 1960. – 392 с.
18. Kadlec R., Fiala P. The response of layered materials to EMG waves from a pulse source // Progress In Electromagnetics Research. – 2015. – Vol. 42. – pp. 179–187.
19. Kadlec R., Fiala P. Electromagnetic Wave Propagation in Heterogeneous Structures // Piers Online. 6. – 2010. – 613-616.
20. Миролюбов Н.Н. Курс теоретических основ радиотехники (распространение и излучение электромагнитной энергии). – Воен. ордена Ленина и ордена Суворова артиллер. инж. акад. им. Ф. Э. Дзержинского. – Москва: [АИА им. Дзержинского], 1957. – 653 с.
21. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. – М.: Недра, 1986. – 128 с.

© Е. В. Денисова, А. П. Хмелинин, А. И. Конурин, 2021

ПОВЕДЕНИЕ НЕХРУПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИЗГИБЕ

Виктор Прокопьевич Ефимов

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект 54, д. ф.-м. н., зав. лаб. тел. (383)330-14-15, e-mail: efimov-pedan@mail.ru

Представлены экспериментальные результаты определения несущей способности балки из мрамора. Отмечено существенное влияние пластических свойств на прочностные характеристики балки. На основе модели разнопрочных материалов построена упругопластическая эпюра напряжений в балке. Предлагается для горных пород и аналогичных им гетерогенных материалов, обладающих разной прочностью на сжатие и растяжение, использовать упругое распределение напряжений в зоне сжатия, а в области растяжения упруго-пластическое. Такая эпюра напряжений позволяет объяснить высокие значения изгибной прочности по сравнению с прочностью на растяжение представленных материалов.

Ключевые слова: горные породы, прочность, упруго-пластический изгиб, эффект разнопрочности материала

BEHAVIOR OF NON-BRITTLE ROCKS UNDER BENDING CONDITION

Viktor P. Efimov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Krasny prospect 54, Novosibirsk, Russia, Ph.D. Sci., Head. lab., Phone (383) 330-14-15, e-mail: efimov-pedan@mail.ru

Experimental results of determining the bearing capacity of a marble beam are presented. A significant influence of plastic properties on the strength characteristics of the beam is noted. On the basis of a model of strength-different materials, an elastoplastic profile of stresses in a beam is constructed. It is proposed to use elastic stress distribution in the compression zone for rocks and similar heterogeneous materials with different compressive and tensile strengths, and elastic-plastic distribution in the tensile zone. Such a stress diagram makes it possible to explain the high values of bending strength in comparison with the tensile strength of the presented materials.

Keywords: rocks, strength, elastic-plastic bending, SD (Strength-Differential) effect

Введение

Прочность горных пород на растяжение является ключевым параметром для определения несущей способности и пригодности к эксплуатации горных конструкций и их элементов, так же широко используется для расчетов по разрушению, дроблению, скалыванию и другим технологическим процессам при добычи полезных ископаемых. Хотя природный массив горных пород находится в условиях сжимающих напряжений, но при проведении в нем горных работ, например, при выемки туннеля, исходное состояние массива изменяется, и некоторые области его подвергаются растягивающему напряжению. Горные породы в отличие от других твердых сред характеризуются тем, что прочность пород на растяжение намного ниже, чем прочность на сжатие. По этой причине горные породы наиболее подвержены разрушению при растяжении, и потому характеристики

горных пород при растяжении имеют первостепенное значение в инженерно-геотехнических приложениях. Для определения прочности горных пород на растяжение можно использовать прямые и косвенные методы. Из-за специфических трудностей приготовления образцов на прямой разрыв и сложностей центрирования образцов при проведении тестов прямые испытания используются в основном как калибровочные [1-3], а основными испытаниями на практике стали косвенные, такие как метод бразильской пробы, внецентренного сжатия, испытания на изгиб [4-7]. Хотя Бразильский способ на не прямое растяжение является наиболее часто используемым, установлено, что полученные с его помощью величины не точно отображают истинное значение прочности на разрыв [8, 9]. Прочность на трехточечный и четырехточечный изгиб – это другие косвенные методы, которые используются для определения прочности на растяжение в горных породах [6, 10, 11]. С изгибом также связаны проблемы нестабильности свода туннелей, прогиба потолочины шахты или прослойки в горнодобывающей зоне [12-14]. В технических приложениях моделей изгиба важно знать соотношение прочности породы на растяжение с несущей способностью балки. На сегодняшний день накоплен большой материал по изгибу балок из горных пород, имеющий различную направленность. Существует насущная потребность развития новых моделей, способных обосновать отличия изгибной прочности пород от прочности на растяжение. Как показали исследования автора, в этом вопросе существенную роль играют пластические свойства породы.

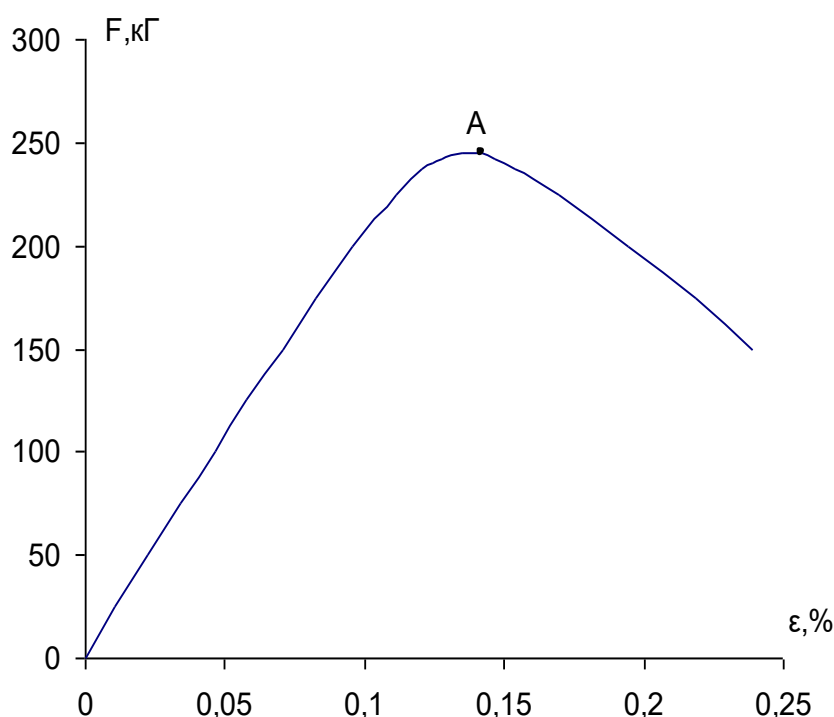


Рис. 1а. Диаграмма нагружения балки из габброида.
Точка А – старт магистральной трещины, зафиксированный по акустической эмиссии

На рис.1 а и б представлены диаграммы нагружения хрупкой породы (габброид) и породы с явно выраженными пластическими свойствами (мрамор). Деформация крайнего волокна балки была измерена с помощью тензорезистора, наклеенного на стороне растяжения. Разрушение балки – старт магистральной трещины, был зафиксирован с помощью датчика акустической эмиссии, точка А на кривой $F(\epsilon)$. Из рисунков хорошо видно отличие этих пород по деформационным признакам.

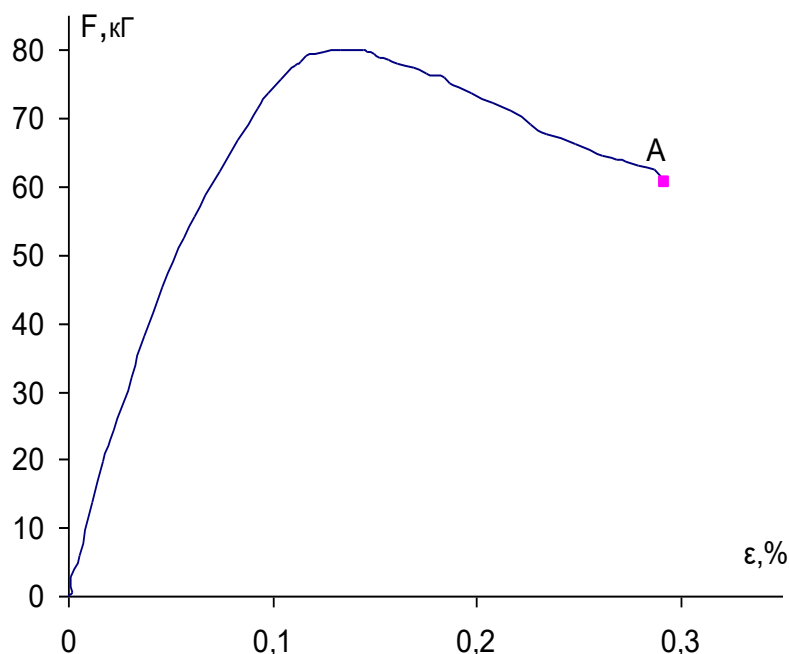


Рис. 1б. Диаграмма нагружения балки из мрамора Уфалейского.
Точка А – старт магистральной трещины, зафиксированный по акустической эмиссии

Для многих пород наблюдается превышение изгибной прочности (расчет напряжений в крайнем слое балки в упругом приближении) над прочностью на растяжение, измеренное либо прямым, либо бразильским методом. Но это отношение для хрупких пород и пород с явными пластическими свойствами сильно разнится. Так для хрупких горных пород, рассчитанные напряжения в крайнем слое балки в упругом приближении при использовании локального критерия прочности были выше в 1,2 – 1,5 раза, чем прочность на растяжение. Такую более высокую несущую способность балки удалось объяснить для хрупких пород применением моделей, основанных на нелокальных критериях разрушения [11]. Полученные расчетные напряжения в крайнем слое балки со стороны растяжения, при таком подходе близки к прочности на разрыв балки из хрупкой породы. Для нехрупких горных пород отношение расчетных напряжений в крайнем слое в упругом приближении, к прочности на растяжение достигает высоких значений, существенно выше, чем 1,5. Так для мелкокристаллического мрамора авторы [15] сообщают, что отношение изгибной

прочности к прямой прочности на растяжение составляет от 2,61 до 4. Для гранита [16] прочность на изгиб также превышает прочность на растяжение, измеренную бразильским способом, примерно в 3 раза, для мрамора Уфалейского [17] изгибная прочность (четырёхточечный изгиб) в 2,26 раза выше, чем прочность по бразильскому методу. Упомянутое отношение 1,5, как известно, отличает расчет несущей способности балки по предельному состоянию (пластическая эпюра напряжений для изотропного материала) от расчета по предельной нагрузке (упругое приближение) для изотропного материала. Таким образом, имеется противоречие между практической несущей способностью балки из нехрупкой горной породы и применяемыми расчетными моделями на основе изотропного материала.

Постановка задачи

Рассматривается балка из горной породы или геоматериала прямоугольного сечения, свободно опертая и подвергнутая четырех-точечному изгибу. Среда характеризуется большим отношением прочности на сжатие к прочности на растяжение, типичное отношение порядка 10. Будем следовать модели разнопрочного (SD effect) материала [18]. Первые упоминания об металлах с SD эффектом относятся к 70 годам прошлого столетия [19-21]. В отличие от упомянутых авторов, модель которых была ориентирована на металлы, материал балки имеет предел текучести мало отличающийся от предела прочности, (рис. 1а, б), которыми мы и воспользуемся в дальнейшем.

На рис.2 представлена схема нагружения балки и эпюры напряжений по мере возрастания нагрузки. В процессе нагружения материал балки проходит стадию упругого состояния с симметричной эпюрой напряжений до величины σ_p (рис. 2 положение а). Далее по мере нагружения появляется пластический слой, для пород с пластическими свойствами, или слой предразрушения для хрупких пород в нижней части балки, испытывающей растяжение. В верхней части балки, находящейся при сжатии, напряжения распределены линейно, в соответствии с упругостью. При этом нейтральная ось смещается на величину y_0 от геометрической оси балки (рис. 2 положение б). Балка потеряет несущую способность, когда величина пластической площадки (или предразрушения) достигнет величины структурного параметра δ , характерного для каждой среды [22].

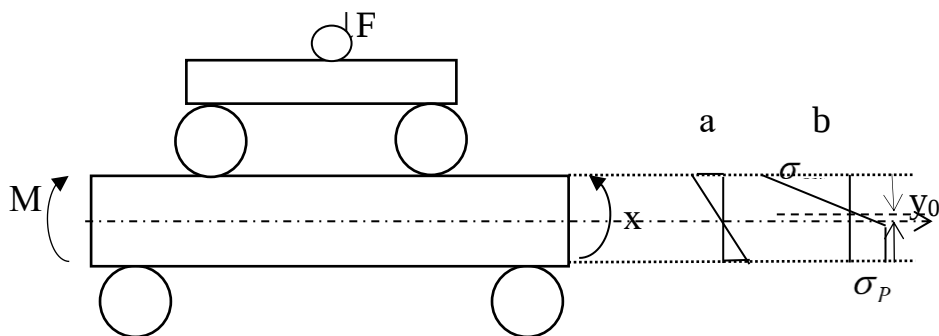


Рис. 2. Изгиб балки и изменение эпюры напряжений с ростом нагрузки

Расчет несущей способности балки.

Проведем расчет балки в случае, когда область сжатия не перешла в пластическое состояние. Такая модель соответствует случаю большого отношения прочностных характеристик горных пород при сжатии и растяжении. Равенство площадей с обеих сторон нейтральной оси, диктуется условиями равновесия и позволяет определить положение нейтральной оси y_0 , глубину сжатия $y_{сж}$, область упругого растяжения y_p и пластический слой a_p со стороны растяжения:

$$0,5y_{сж}\sigma_{сж} = 0,5y_p\sigma_p + a_p\sigma_p \quad (1)$$

С учетом, что $\sigma_{сж} / \sigma_p = d$, а толщина балки $H = y_{сж} + y_p + a_p$, получаем следующие соотношения:

$$y_{сж} = \frac{2Hd}{(1+d)^2}; y_p = \frac{2H}{(1+d)^2}; y_0 = \frac{H(d-1)^2}{2(1+d)^2}; a_p = H \frac{d-1}{d+1} \quad (2)$$

Дальше определим момент внутренних напряжений балки:

$$M = B \left(\int_{-H/2}^{y_0} \sigma_p(y) y dy + \int_{y_0}^{H/2} (-\sigma_{сж}(y)) y dy \right), \quad (3)$$

B – ширина балки. Совместив ось X с положением нейтральной оси, сдвинутой на величину y_0 , и выполнив интегрирование с учетом, что распределение напряжений соответствует положению b рис.2, получаем

$$M = B\sigma_p \left(\frac{(H/2 + y_0)^2}{2} - \frac{y_p^2}{2} \right) + \frac{BE}{\rho} \left(\frac{y_p^3}{3} + \frac{y_{сж}^3}{3} \right) \quad (4)$$

Здесь E – модуль Юнга, ρ – радиус кривизны. В положении a рис.2, при упругой эпюре по всей толщине балки, в (4) остается второе слагаемое

$$M_{упр} = \frac{BH^2}{6} \sigma_{упр} \quad (5)$$

Напряжение $\sigma_{упр}$ в крайних слоях балки при достижении величины σ_p изменяет эпюру напряжений со стороны растяжения. Начиная с этого значения и до величины M^* , эпюра в зоне сжатия упругая. Значение M^* получим из (4) подставив (2)

$$M^* = \frac{BH^2}{6} \sigma_p \frac{3d^* - 1}{d^* + 1}, \quad (6)$$

где $d^* = \sigma_{com} / \sigma_p$, соответствует переходу к пластичности в области сжатия.

Обсуждение полученных результатов

Сравнение полученных результатов с экспериментально наблюдаемой несущей способностью балки проведем на примере мрамора Уфалейского [17]. Отношение момента M^* к упругому моменту $M_{упр}$ в предельном случае определяется соотношением (6), в котором фигурируют прочность мрамора на сжатие $\sigma_{com} = 80 \text{ МПа}$ и прочность на растяжение $\sigma_p = 5,9 \text{ МПа}$. Используя эти значения, определим отношение этих моментов $M^*/M_{упр} = 2,73$ и сравним его с отношением изгибной прочности к прочности на растяжение, вычисленной в предположении упругих напряжений $\sigma_{изг} / \sigma_p = 2,66$. Видно, что в данном случае разрушение балки произошло согласно представленному подходу, и напряжения в зоне сжатия немного меньше предельного для этой модели. Этот вывод подтверждается сравнением расчетного максимального пластического слоя a_p со структурным параметром δ . Так согласно (2) $a_p = 17,2$ мм, а параметр $\delta = \frac{2}{\pi} \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_p} \right)^2 = 14,8$ мм. Это означает, что исчерпание несущей способности балки произошло немного раньше, чем определяется соотношением (6).

Заключение

Представленное исследование определения характеристик разрушения при изгибе балки из нехрупкого материала, каким является мрамор, позволило на основе модели разнопрочных материалов, объяснить высокое отношение изгибной прочности к прочности на растяжение. Как показали расчеты, высокие значения несущей способности балки, определяются пластическими свойствами подобных пород.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и образования Российской Федерации проект № АААА-А17-117121140065-7

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Unlu T. and Yilmaz O. A. Development of a new push–pull direct tensile strength testing apparatus (PPTA)// Geotechnical Testing Journal. – 2014. – v.37. - pp. 60-70.
2. Qi, S., Lan, H., Martin, D. *et al.* Factors Controlling the Difference in Brazilian and Direct Tensile Strengths of the Lac du Bonnet Granite// Rock Mech Rock Eng. – 2020. - v. 53. - pp. 1005–1019.

3. L. Biolzi, S. Cattaneo, G. Rosati. Flexural/Tensile strength ratio in rock-like materials //Rock Mech Rock Eng. – 2001. – v. 34 (3). – pp. 217-233.
4. Bawn E.T. and D.H. Trollope. The failure of linear brittle materials under effective tensile stress.// Rock Mech. Eng. Geol. – 1967. - v.5. - p 229-241.
5. T. Efe, N. Sengun, S. Demirdag, K. Tufekci, R. Altindag. Effect of Sample Dimension on Three and Four Points Bending Tests of Fine Crystalline Marble and its Relationship with Direct Tensile Strength. – 2019. - IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 221(1). 012093.
6. Mardalizad A., Scazzosi R., Manes A. and Giglio M. Four-point bending test on a middle strength rock: numerical and experimental investigations.// Fracture and Structural Integrity. – 2017. – v. 41. - 504-523.
7. Ефимов В.П. Применение градиентного подхода к определению прочности горных пород на растяжение. // ФТПРПИ. – 2002. - №5. – С. 49-53.
8. Зайцев Г.Г., Барабанов В.Н., Лаухина Н.С. Сравнительный метод определения предела прочности графита методом сжатия цилиндрических образцов по образующей. – Конструкционные материалы на основе графита. Сб. тр. №6. – М.: Металлургия. – 1971. – с.153-156.
9. S. Demirdag, K. Tufekci, N.i Sengun, T. Efe, R. Altindag. Determination of the Direct Tensile Strength of Granite Rock by Using a New Dumbbell Shape and its Relationship with Brazilian Tensile Strength. – 2019. – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science – 221 (1). – 012094.
10. Xiang Fan, Hang Lin, Rihong Cao. Bending Properties of Granite Beams with Various Section-Sizes in Three-Point Bending Tests. //Geotechnical and Geological Engineering. – 2019. - v. 37. - pp 1–11.
11. Ефимов В.П. Определение прочности на растяжение по результатам измерений изгибной прочности горных пород // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. — С. 46–53.
12. D.P. Adhikary, A.V. Dyskin, R.J. Jewell, D.P. Stewart. A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes.//Rock Mech Rock Eng. – 1997. – v.30 (2). – pp. 75-93.
13. K. Feng, C. He, J. Wang, C. Qi, S.J. Liu. Bending behavior of segmental joint structure of under-river shield tunnel.//Adv Mater Res. – 2012. – pp. 2132-2138.
14. M. Amini, A. Majdi. Aydan O. Stability analysis and the stabilisation of flexural toppling failure. // Rock Mech Rock Eng. – 2009. – v. 42 (5). – pp. 751-782.
15. T. Efe, N. Sengun, S. Demirdag, K. Tufekci, R. Altindag. Effect of Sample Dimension on Three and Four Points Bending Tests of Fine Crystalline Marble and its Relationship with Direct Tensile Strength. – 2019. – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science – 221(1), 012093.
16. Xiang Fan, Hang Lin, Rihong Cao. Bending Properties of Granite Beams with Various Section-Sizes in Three-Point Bending Tests. //Geotechnical and Geological Engineering. – 2019. – v.37. – p. 1–11.
17. Ефимов В. П. Прочностные свойства горных пород при растяжении в разных условиях нагружения // ФТПРПИ. — 2009. — № 6. – С. 46-55.
18. Павилайнен Г.В. Упруго-пластический изгиб разнопрочных балок // Вестн. С.-Петербург. ун-та. – Сер. 1. – 2015. – Т. 2(60). – Вып. 4. – С. 633-638.
19. Hirth J.P., Cohen M. On the strength-differential phenomenon in hardened steel // Metallurgical Transactions. – 1970. – v. 1, – P. 3-8.
20. Chait R. Factors influencing the strength differential of high strength steels // Metallurgical Transactions. – 1972. – v. 3, – P. 365-371.
21. Drucker, D.C. Plasticity theory strength-differential (SD) phenomenon, and volume expansion in metals and plastics // Metallurgical Transactions. – 1973. – v. 4, – P. 667-673.
22. Ефимов В. П. Испытания горных пород в неоднородных полях растягивающих напряжений // ПМТФ. — 2013. — Т. 54. — № 5. — С. 199–209.

© В. П. Ефимов, 2021

К РАСЧЕТУ КОЭФФИЦИЕНТОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТОННЕЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Дмитрий Владиленович Зедгенизов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Красный проспект, 54, г. Новосибирск, Россия, к.т.н., доцент, с.н.с. лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383) 205-30-30, доб. 339, e-mail: dimzed2001@mail.ru

Проведен анализ существующих методов расчета коэффициентов пропорционально-интегрального регулятора системы автоматического управления производительностью осевого вентилятора метрополитена мелкого заложения. Представлена методика расчета коэффициентов регулятора в среде Mathlab (Simulink).

Ключевые слова: Тоннельный вентилятор, регулятор, производительность, расчет коэффициентов

TO CALCULATION OF THE COEFFICIENTS OF AUTOMATIC REGULATOR OF TUNNEL FAN CAPACITY

Dmitry V. Zedgenizov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Associate Professor, Senior Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 339, e-mail: dimzed2001@mail.ru

Analysis of the existing methods for calculating the coefficients of the proportional-integral regulator of the automatic control system for the capacity of the axial fan of the shallow subway was carried out. The technique of calculating the controller coefficients in the Mathlab (Simulink) environment is presented.

Keywords: Tunnel fan, regulator, performance, calculation of coefficients

В настоящее время при модернизации вентиляторных агрегатов метрополитенов, либо при строительстве новых станций у служб эксплуатации вентиляторов появляется возможность оперативного регулирования частоты вращения рабочего колеса вентилятора [1]. В большинстве таких случаев скорость вращения вала вентилятора регулируется преобразователем частоты (ПЧ) тока статора приводного электродвигателя вентилятора [2]. При настройке ПЧ службами эксплуатации возникает проблема задания числовых значений коэффициентов пропорциональной и интегральной части пропорционально-интегрального регулятора (ПИР) частоты вращения ротора вентилятора, встроенного в ПЧ. Ввод некорректных значений указанных коэффициентов и последующее регулирование производительности тоннельного вентилятора может привести к поломке оборудования и опасности нарушения требований документов, нормирующих микроклиматические параметры воздуха в подземных сооружениях [3-5]. Поэтому создание инженерной методики настройки ПИР системы автоматического

управления производительностью (САУП) тоннельного вентилятора (ТВ) является актуальной задачей.

В теории автоматического управления разработан ряд методов расчета коэффициентов настройки для систем автоматического регулирования [6]. Однако использование этих методов на практике имеет ряд недостатков.

Так, например, известен графо-аналитический (тангенциальный) метод нахождения коэффициентов пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора. Однако данный метод чувствителен к выбору точки, относительно которой проводится касательная к кривой переходного процесса исследуемой координаты. Метод требует определенной квалификации и опыта инженерно-технического персонала на производстве.

Также существует аналитический метод расчета (метод Шубладзе А.М.). Однако, помимо громоздких расчетов, в литературе не приведены формулы для получения промежуточных величин при равенстве показателя степени знаменателя передаточной функции объекта единице (как в случае с САУ ТВ), что затрудняет практические вычисления по данной методике.

Вместе с тем в настоящее время существует признанный специалистами пакет программ Simulink, который позволяет рассчитать коэффициенты ПИР регулятора быстрее и точнее. Моделирование переходных процессов осуществляется путем численного интегрирования методом Дормана-Принса 4-5 порядка с автоматическим изменением шага интегрирования (ODE 45 Dormand-Prince variable-step). Описанные далее шаги по расчету коэффициентов основаны на применении именно этой программы. Для получения числовых значений коэффициентов пропорциональной и интегральной части ПИР, согласно этой методике, необходимо выполнить следующее:

Шаг 1: Сбор исходных данных с объекта управления.

На этом этапе снимаются переходные процессы исследуемой координаты (например, производительности вентилятора при его запуске) [7]. Уточняются технические характеристики электродвигателя (номинальная частота вращения, момент инерции ротора) и самого вентилятора (момент инерции вала вентилятора).

Шаг 2: Составление структурной схемы САУП ТВ с электроприводом от преобразователя частоты тока статора электродвигателя (рис. 1).

Шаг 3: Расчет параметров структурной схемы.

Здесь необходимо рассчитать все коэффициенты передачи, постоянные времени, начальные условия, параметры линеаризации, диапазоны изменения входного и выходного воздействий. Влияние возмущений, вносимых движущимися поездами метро на воздушный поток, создаваемый вентилятором при его регулировании также необходимо оценить [8-10].

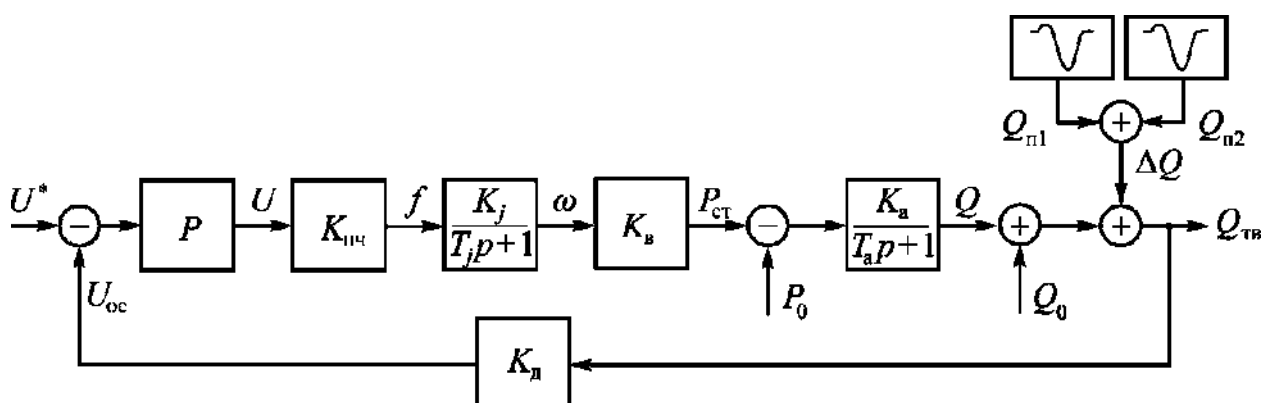


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического управления производительностью тоннельного вентилятора от преобразователя частоты:

$K_{пч}$ — коэффициент преобразователя частоты, Гц/В; K_j — коэффициент усиления двигателя, рад/(с·Гц); T_j — постоянная времени двигателя, с; $K_в$ — коэффициент усиления вентилятора, Па·с/рад; K_a — коэффициент усиления участка вентиляционной сети, м³/Па·с; T_a — постоянная времени участка вентиляционной сети, с; $K_д$ — коэффициент усиления датчика объемного расхода воздуха, В·с/м³; U^* — входное задающее воздействие, В; U — напряжение управления преобразователем частоты, В; U_{oc} — напряжение на выходе датчика производительности вентилятора, В; f — частота тока двигателя вентилятора, Гц; ω — частота вращения ротора вентилятора, рад/с; $P_{ст}$ — статическое давление, развиваемое вентилятором, Па; Q — производительность вентилятора, м³/с; ΔQ — объемный расход воздуха от поршневого действия поездов, м³/с; $Q_{тв}$ — расход воздуха, проходящий через тоннельный вентилятор, м³/с; $Q_{п1}$, $Q_{п2}$ — расход воздуха от поршневого действия поезда 1 и поезда 2, м³/с; P_0 — начальные условия по давлению, Па; Q_0 — начальные условия по производительности, м³/с; P — регулятор производительности вентилятора

Шаг 4: Определение требований к качеству переходного процесса регулирования производительности ТВ с учетом поршневого эффекта и выбранного режима управления вентилятором.

На этом этапе определяется требуемое время переходного процесса и величина перерегулирования [11-21]. При определении желаемого времени переходного процесса важно учесть, что при увеличении интенсивности движения поездов по линии процесс регулирования производительности вентилятора на текущем такте должен заканчиваться как можно раньше момента прохождения следующего поезда. Причем для повышения экономичности управления регулирование частоты вращения ротора должно заканчиваться не позднее 1/3 от интервала времени до следующего поезда метро.

Шаг 5: Составление структурной схемы САУП ТВ в программе Matlab (Simulink).

Здесь происходит ввод числовых значений параметров блоков, настройка входного блока «Step» и блока вывода переходных процессов «Scope». В качестве блока регулятора САУП используем блок «PID Controller» из стандартной библиотеки Simulink (рис. 2).

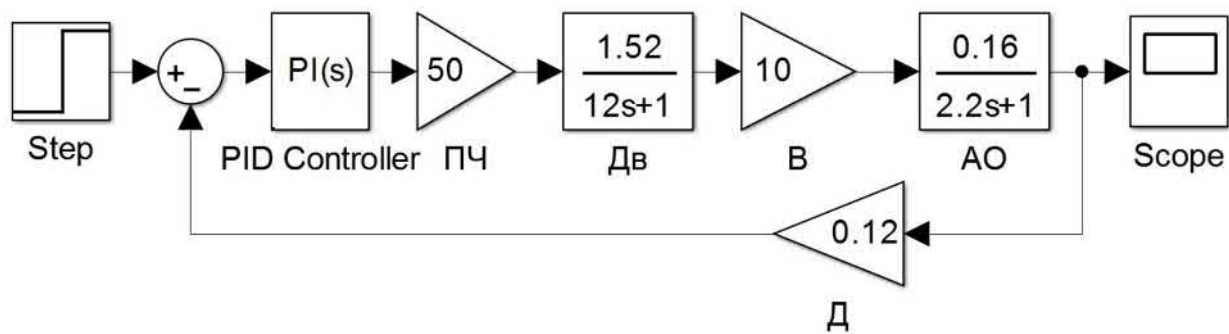


Рис. 2. Структурная схема САУП ТВ в программе Matlab:

Step — блок ввода параметров входного воздействия; PID Controller — блок настройки параметров регулятора; ПЧ — блок преобразователя частоты; Дв — блок моделирования двигателя вентилятора; В — блок параметров вентилятора; АО — блок расчета параметров вентиляционной сети (аэродинамический объект); Scope — блок вывода переходных процессов системы; Д — блок датчика обратной связи по расходу воздуха

Шаг 6: Настраиваем желаемый вид переходного процесса регулирования производительности.

Здесь в блоке «PID Tuner» устанавливаем требуемые параметры переходного процесса выходной координаты системы (перерегулирование и время переходного процесса) (рис. 3).

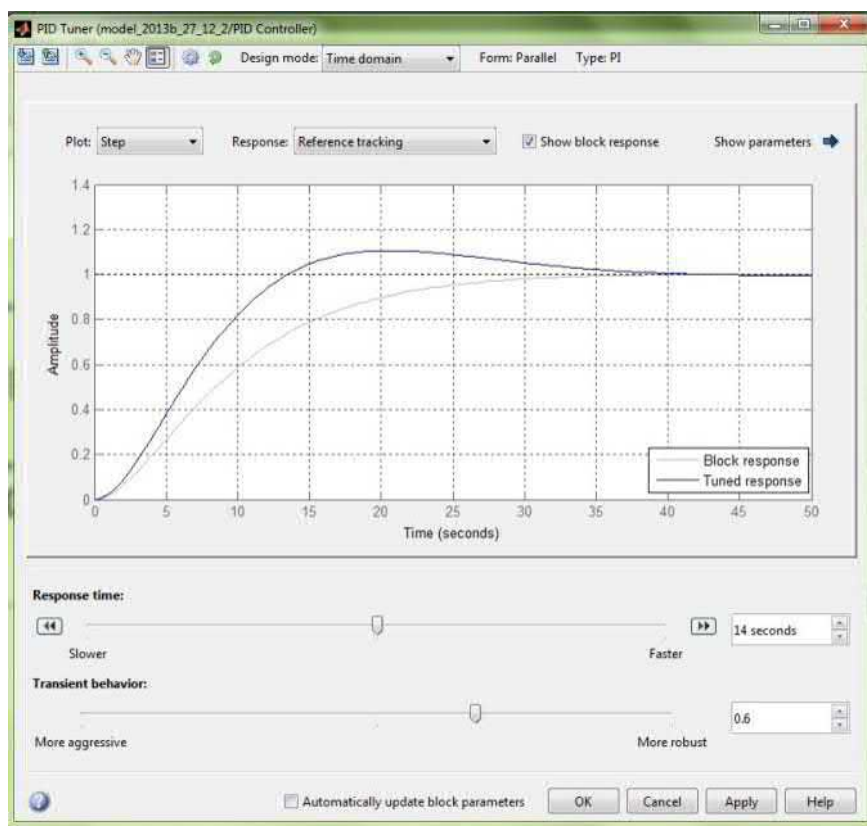


Рис. 3. Диалоговое окно настройки желаемого вида переходного процесса

Шаг 7: Запускаем расчет системы и контролируем вид переходного процесса по блоку «Score».

После проверки выполнения требований к переходному процессу считываем числовые значения коэффициентов пропорциональной и интегральной частей ПИР САУП ТВ.

Вывод

Разработана методика определения коэффициентов настройки преобразователя частоты тока электродвигателя тоннельного вентилятора, которая впервые учитывает время регулирования расхода воздуха для каждой интенсивности движения поездов. При этом время регулирования определяется по условию завершения текущего переходного процесса до начала следующего и не должно превышать 1/3 от фактического (текущего) интервала движения поездов.

Работа выполнена в рамках научной темы FWNZ-2021-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красюк А.М. Вентиляция метрополитенов /А.М. Красюк, И.В. Лугин. – Новосибирск: СО РАН: Наука, 2019. – 316 с.
2. Красюк А.М. Тоннельная вентиляция метрополитенов – Новосибирск: Наука, 2006. – 164 с.
3. СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003: утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012: дата введ. 01.01.2013. – М., 2013. – 260 с.
4. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1975. – 568 с.
5. Громов В.Н. Особенности обеспечения микроклимата метрополитенов. В сборнике: Транспортное планирование и моделирование. Сборник трудов II Международной научно-практической конференции. 2017. С. 96-103.
6. Нетушил А.В., Балтрушевич А.В., Бурляев В.В. Теория автоматического управления: Нелинейные системы управления при случайных воздействиях: Учебник для вузов; М.: Высш. школа, 1983. – 432 с.
7. Зедгенизов Д.В. Результаты экспериментального исследования процесса регулирования частоты вращения ротора тоннельного вентилятора метрополитена // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. –2017, –№ 1, Т.4. – С. 11-14.
8. Красюк А.М., Лугин И.В. Исследование динамики воздушных потоков от возмущающего действия поездов в метрополитене // ФТПРПИ. – 2007. – № 6. – С. 101-108.
9. Красюк А.М., Лугин И.В., Павлов С.А. Об эффекте возникновения циркуляционных колец и их влиянии на воздухораспределение в метрополитене мелкого заложения // ФТПРПИ. – 2010. – № 4. – С. 75-82.
10. Красюк А.М., Косых П.В., Русский Е.Ю. Влияние возмущений воздушного потока от поршневого действия поездов на тоннельные вентиляторы метрополитенов // ФТПРПИ. – 2014. – № 2. – С. 144-153.
11. Андреев А.И. Энергоэффективный автоматизированный электропривод для вентиляции метрополитена // Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области. Сборник научных трудов. Новосибирск, 2014. С. 37-39.
12. Yurkevich V.D. PI/PID Control for nonlinear systems via singular perturbation technique, Advances in PID Control, Publisher In Tech., 2011. – P. 113– 142.

13. Лангеман Э.Г., Калугин М.В. Автоматизация вентиляционной системы метрополитена // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. 2013. № 2. С. 310-314.
14. Шишова М.А., Петрунькина П.В. Управление вентиляционной системой метрополитена с помощью нечеткой логики // Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области. Сборник научных трудов. Новосибирск, 2016. С. 165-167.
15. Зедгенизов Д.В. Обоснование требований к качеству автоматического управления проветриванием метрополитенов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – №2. Т.6. – С. 108 – 112.
16. Ледовских А.В. Разработка алгоритмов управления станционными и перегонными вентиляторами в лабораторном стенде, выполненном в форме станции метрополитена // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. 2014. С. 90-93.
17. Гиривой Д.В., Русский Е.Ю. Синтез алгоритмов автоматического управления проветриванием станции метрополитена // Наука Промышленность Оборона. Труды XVIII Всероссийской научно-технической конференции: в 4-х томах. Под ред. С.Д. Саленко. 2017. С. 141-145.
18. Зедгенизов Д.В., Попов Н.А. О повышении эффективности управления тоннельными вентиляторами метрополитена мелкого заложения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Изд. ИГД СО РАН. - Новосибирск. – 2018. - №4. – С. 123 – 133.
19. Петрунькина П.Д., Шишова М.А., Огнева Т.Д. АСУ ТП вентиляции Новосибирского метрополитена // Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов в 9 частях. Под редакцией Е.Г. Гуровой. 2015. С. 157-159.
20. Косов Н.В., Захаркина С.В. Система автоматического управления вентиляционными агрегатами метрополитена // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2020). Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием, посвященной Юбилейному году в ФГБОУ ВО "РГУ им. А.Н. Косыгина". 2020. С. 90-92.
21. Тетиор Л.Н., Дауров И.М. Системы автоматического управления вентиляционными агрегатами метрополитенов Метро и тоннели. 2017. № 5-6. С. 32-33.

© Д. В. Зедгенизов, 2021

О СТРУКТУРЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ПРИСТАНЦИОННЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СБОЙКАХ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

Лаврентий Александрович Кияница

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), Россия, 630091, Новосибирск, Красный проспект 54, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (903)049-31-85, e-mail: Lavrentij.Kijanitz@yandex.ru

Иван Владимирович Лугин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), Россия, 630091, Новосибирск, Красный проспект 54, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383)205-30-30(доб.179), e-mail: ivlugin@misd.ru

Александр Михайлович Красюк

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), Россия, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (913)742-74-01, e-mail: am.krasuk@gmail.com

Одним из важных микроклиматических критериев комфорта и безопасности пассажиро-перевозок в метрополитенах является концентрация пыли в зоне пребывания пассажиров и персонала. Известно, что концентрация мелкодисперсной пыли в метрополитенах значительно превышена относительно допустимого нормативного уровня. Для снижения концентрации пыли до уровня ПДК необходимо осуществлять фильтрацию тоннельного воздуха не только для систем местной вентиляции помещений персонала, но и для тоннельной вентиляции и общеобменной вентиляции пассажирских помещений станций. Одним из перспективных мест установки фильтров являются пристанционные вентиляционные сбойки, так как через них проходят значительные по расходу воздуха циркуляционные потоки. Для определения типа и параметров фильтров, необходимо знать величину и направление скорости воздушного потока, т.е. структуру его поля скоростей. Из-за сложной топологии и наличия отрывных зон, структура воздушного потока, градиент скоростей воздуха в поперечном сечении вентиляционных сбоек и, соответственно, обоснование мест установки фильтров в вентсбойке требует проведения отдельного исследования. В работе обоснованы: декомпозиционный подход к математическому моделированию аэродинамических процессов путем перехода от линейной разомкнутой модели линии метрополитена к замкнутой кольцевой; геометрические параметры принятой расчетной модели; математическая постановка задачи. Методами вычислительной аэродинамики определены минимальные, средние и максимальные проекции скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению вентсбойки и расходы воздуха через это сечение, что позволяет обосновать требования к размещению и рабочим параметрам фильтрационного оборудования.

Ключевые слова: метрополитен, тоннельная вентиляция, пыль, кольцевые модели, поршневой эффект, воздухораспределение, пристанционная вентиляционная сбойка

ON AIR FLOW STRUCTURE IN STATION VENTILATION CONNECTIONS OF SUBWAYS

Lavrentiy A. Kijanitsa

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, office: +7 (903)049-31-85, e-mail: Lavrentij.Kijanitza@yandex.ru

Ivan V. Lugin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, office: +7 (383)205-30-30 (ext.179), e-mail: ivlugin@misd.ru

Alexander M. Krasuk

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, office: +7 (913)742-74-01, e-mail: am.krasuk@gmail.com

One of the important microclimatic criteria for the comfort and safety of passenger transportation in subways is dust concentration in passenger and staff area. It is known that fine dust concentration in subways is significantly exceeded relative to the permissible regulatory level. To reduce the dust concentration to the maximum allowable level, it is necessary to filter the tunnel air not only for the systems of local ventilation of staff rooms, but also for tunnel ventilation and general ventilation of passenger rooms at the stations. It is better to install filters in station ventilation connections, since significant circulating air flows pass through them. To determine the type and parameters of filters, it is required to know the magnitude and direction of an airflow rate, i.e. the structure of its velocity field. Due to the complex topology and presence of separation zones, the airflow structure, gradient of air velocities in the cross-section of ventilation connections and, accordingly, justification of filter installation locations in a ventilation connection requires a separate study. The paper substantiates a decomposition approach to mathematical modeling of aerodynamic processes by transition from a linear open-loop model of the subway line to a closed circular one; geometric parameters of the adopted design model; mathematical statement of the problem. Computational aerodynamics methods allowed determining the minimum, average and maximum projections of air velocity on the normal to the cross section of a ventilation connection and air flows through this cross section. This makes it possible to justify the requirements for the placement and operating parameters of the filtration equipment.

Keywords: subway, tunnel ventilation, dust, circular models, piston effect, air distribution, station ventilation connection

Введение

К метрополитенам, как к сооружениям с массовым пребыванием людей, предъявляется ряд нормативных требований по обеспечению требуемых параметров микроклимата в зоне пребывания пассажиров и персонала [1, 2]. Немаловажным фактором комфортного пребывания пассажиров и персонала в метрополитене является концентрация мелкодисперсной пыли. Ряд исследований показал, что концентрация пыли в метрополитенах значительно превышает значение ПДК [3-6]. Из этого следует, что тоннельный воздух в метрополитенах необходимо дополнительно очищать от пыли. В отечественной и зарубежной печати

присутствует достаточно много работ по исследованию систем вентиляции станций и тоннелей метрополитена [7-12], однако в них не уделяется внимание пылевому фактору в метрополитене. Работы [13, 14] посвящены исследованию фракционного и химического состава пыли в метрополитенах, но методы и способы борьбы с пылью в должной мере не освещаются. Поэтому задача по обоснованию методов обеспыливания тоннельного воздуха весьма актуальна.

К перспективным методам обеспыливания тоннельного воздуха можно отнести улавливание пыли в мокрых или сухих лабиринтных фильтрах [15]. Одним из перспективных мест установки фильтров являются пристанционные вентиляционные сбойки, так как через них проходят значительные по расходу воздуха циркуляционные потоки, что позволяет не использовать дополнительные источники тяги и повысить энергоэффективность системы вентиляции. Из-за сложной топологии и наличия отрывных зон, структура воздушного потока, градиент скоростей воздуха в поперечном сечении вентиляционных сбоек и, соответственно, обоснование мест установки фильтров в вентсбойке требует дополнительного исследования.

Целью работы является определение поля скоростей воздуха в вентиляционной пристанционной сбойке в зависимости от скорости движения поездов и установление закономерностей пространственной структуры потока в вентсбойке.

Методы и материалы

К исследованию принят участок метрополитена, состоящий из трех станционных комплексов и трех перегонных участков однопутных тоннелей. Для учета аэродинамического сопротивления тоннелей и станций протяженной линии метро, не вошедших в исследуемый участок, использована кольцевая модель [15], как метод топологической декомпозиции линии. Такой подход уменьшает размер расчетного участка с сохранением аэродинамического сопротивления соседних перегонов и станций без потерь точности расчета [15, 16]. Выбор именно трех станционных комплексов и трех участков перегонных тоннелей обоснован тем, что согласно [7], поезда оказывают влияние на расход воздуха через станцию до тех пор, пока не удалятся от рассматриваемой станции на два перегона. Геометрические характеристики расчетной модели и граничные условия приведены на рис. 1.

Решение базируется на численном решении системы уравнений (1) – (3) с применением k - ε RNG модели турбулентности (уравнения (4) – (6)) методом контрольных объемов. Теплообменные процессы в модели не учитываются, так как не представляют интереса для данного исследования.

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial \tau} + \nabla(\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \Lambda, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial \tau} + \nabla(\rho \vec{u} K) = -\vec{u} \cdot \nabla p + \vec{u}(\nabla \cdot \Lambda). \quad (3)$$

В уравнениях (1) – (3) $\Lambda = \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T - (2/3)\delta \nabla \vec{u})$ – тензор сил трения, $K = \frac{1}{2}(\vec{u} \cdot \vec{u})$ – удельная кинетическая энергия, м²/с² °С, T – индекс, указывающий на кососимметричную матрицу, $\vec{u}$ – векторное поле скоростей, μ – динамическая вязкость, Па·с, τ – время, с, ∇ – векторный оператор Гамильтона, δ – дельта функция Кронекера, ρ – плотность, кг/м³, p – давление, Па.

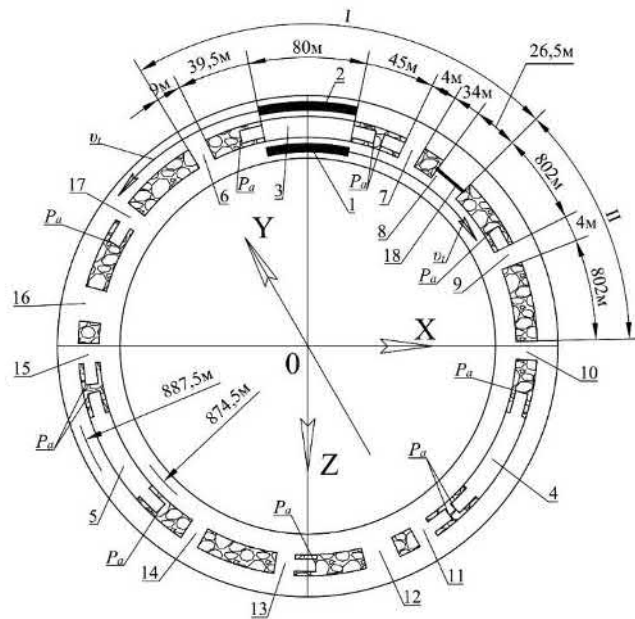


Рис. 1. Геометрические характеристики и граничные условия расчетной модели аэродинамических процессов. На рисунке:

1, 2 – поезда, 3, 4, 5 – пассажирские платформы, 6, 8, 10, 12, 14, 16 – пристанционные вентиляционные сбойки, 9, 13, 17 – сбойки к перегонным вентиляторам, 7, 11, 15 – сбойки к станционным вентиляторам, 18 – поперечное сечение рассматриваемой вентсбойки №8, P_a – атмосферное давление, v_t – скорость поезда, I – границы станционного комплекса, II – перегонный тоннель

Модель турбулентности k - ε RNG описывается следующими уравнениями:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial \tau} + \nabla(\vec{u} \cdot k \cdot \rho) = \nabla \left(\left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right] \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb}, \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \nabla(\vec{u} \cdot \varepsilon \cdot \rho) = \nabla \left(\left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right] \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1 RNG} P_{\varepsilon b}), \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где (4) – (6) k – турбулентная кинетическая энергия, Дж/кг, ε – диссипация турбулентной кинетической энергии воздушного потока, Дж/(кг·с); μ – динамическая

вязкость, Па·с, μ_t – турбулентная динамическая вязкость, Па·с; $\sigma_k=1$, $\sigma_{\varepsilon RNG}=0,7179$, $C_{\varepsilon 2RNG}=1,68$, $C_\mu=0,09$ – постоянные модели турбулентности; P_k , P_{kb} , $C_{\varepsilon 1RNG}$, $P_{\varepsilon b}$ – величины, определяемые из решений дополнительных уравнений [17].

Разбиение модели на конечно-элементную сетку произведено в препроцессоре ANSYS Meshing. Размерность сетки – 1950000 элементов при 1047000 узлах [18]. Качество построенной расчетной конечно-элементной сетки определялось по двум параметрам: ортогональное качество и степень асимметрии, значения которых находятся в рекомендуемых пределах. В рамках принятой k - ε RNG модели турбулентности величина безразмерного расстояния до стенки модели y^+ должна лежать в пределах от 30 до 300 [19, 20]. Исходя из этого требования, определена величина пристеночных ячеек, которая составляет 0,05 м. Решение задачи производилось в нестационарной постановке с использованием расчетного комплекса ANSYS CFX.

График движения поездов включает в себя 4 характерных фазы: стоянка на станции на протяжении 20 с, разгон при отходе от станции на протяжении 10 с, движение с постоянной скоростью по перегонному тоннелю, торможение перед станцией на протяжении 20 с. В моделировании принято 9 циклов прихода и ухода поезда на станцию и со станции (3 полных круга). За это время достигается устойчивый циклический характер воздухообмена (рис. 2).

Вычислительный эксперимент проведен для трех характерных скоростей поездов – 12 м/с, 20 м/с и 25 м/с, что для кольцевой модели соответствует частоте движения поездов соответственно 13,5 пар/ч, 17,5 пар/ч и 21,5 пар/ч.

Результаты

В процессе исследования получены минимальные, средние и максимальные значения проекции скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению 18 вентиляционной сбойки и поле скоростей в её поперечном сечении в зависимости от скорости движения поездов. На рис. 2, 5, 6 приведены полученные значения для вентсбойки № 8. а рисунке 5 показано изменение среднего значения нормальной составляющей скорости воздуха в вентсбойке № 8 за один цикл при скорости движения поездов $v_t=12, 20, 25$ м/с. За начало цикла принято начало торможения поезда перед станцией, окончание цикла – начало следующего торможения этого же поезда на этой же станции. На рис. 3 приведены изополя и векторы проекции скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению вентиляционной сбойки для характерных моментов движения поездов, на рис. 4 – линии тока через вентсбойку. Рис. 3 и 4 характеризующие пространственную структуру потока в вентсбойке. На рис. 7 приведено количество воздуха, перемещаемое за один проход поезда (от начала торможения перед станцией 3 до начала следующего торможения перед станцией 3) через вентсбойку №8.

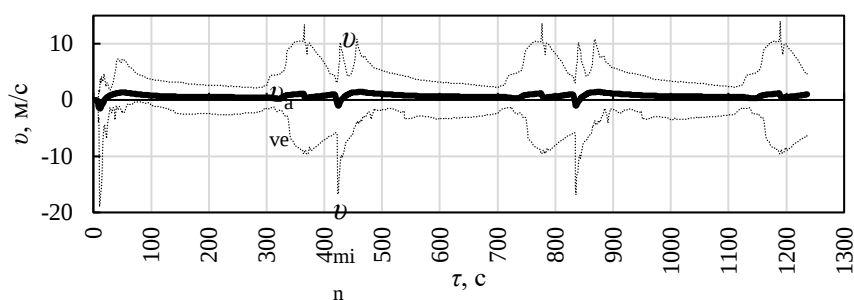


Рис. 2. Минимальное $v_{\min}$, среднее v_{ave} и максимальное v_{max} значения нормальной скорости воздуха в вентсбойке №6 для скорости движения поезда $v_t=20$ м/с

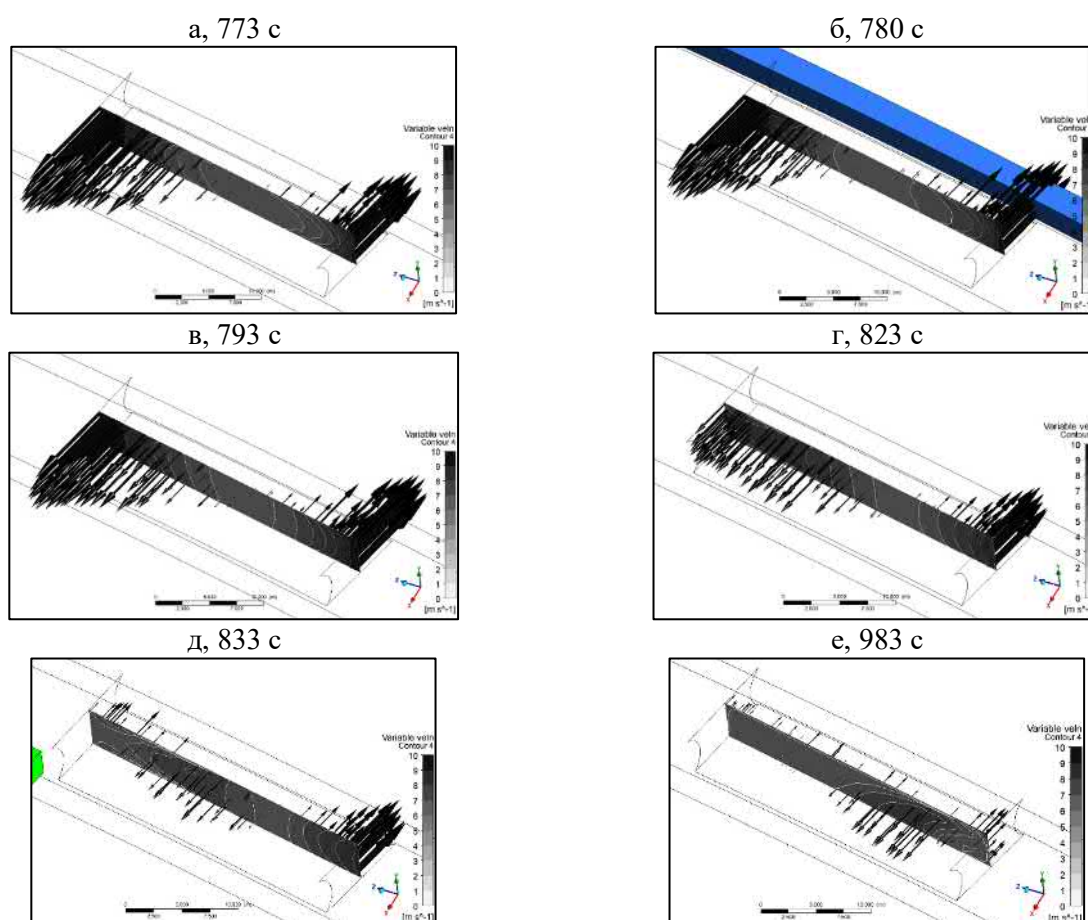


Рис. 3. Изополя и векторы нормальной составляющей скорости воздуха в поперечном сечении 18 вентсбойки №8, случай одновременного прихода поездов на станцию и ухода сос станции, скорость поездов $v_t=20$ м/с: *а* – начало торможения поезда перед станцией, *б* – поезд проезжает мимо вентсбойки №8, *в* – остановка поезда на станции и начало стоянки, *г* – конец стоянки поезда, начало разгона, *д* – конец разгона, начало движения с равномерной скоростью, *е* – движение поезда по перегонному тоннелю, на станции поезда отсутствуют; на рисунках цветом показаны поезда

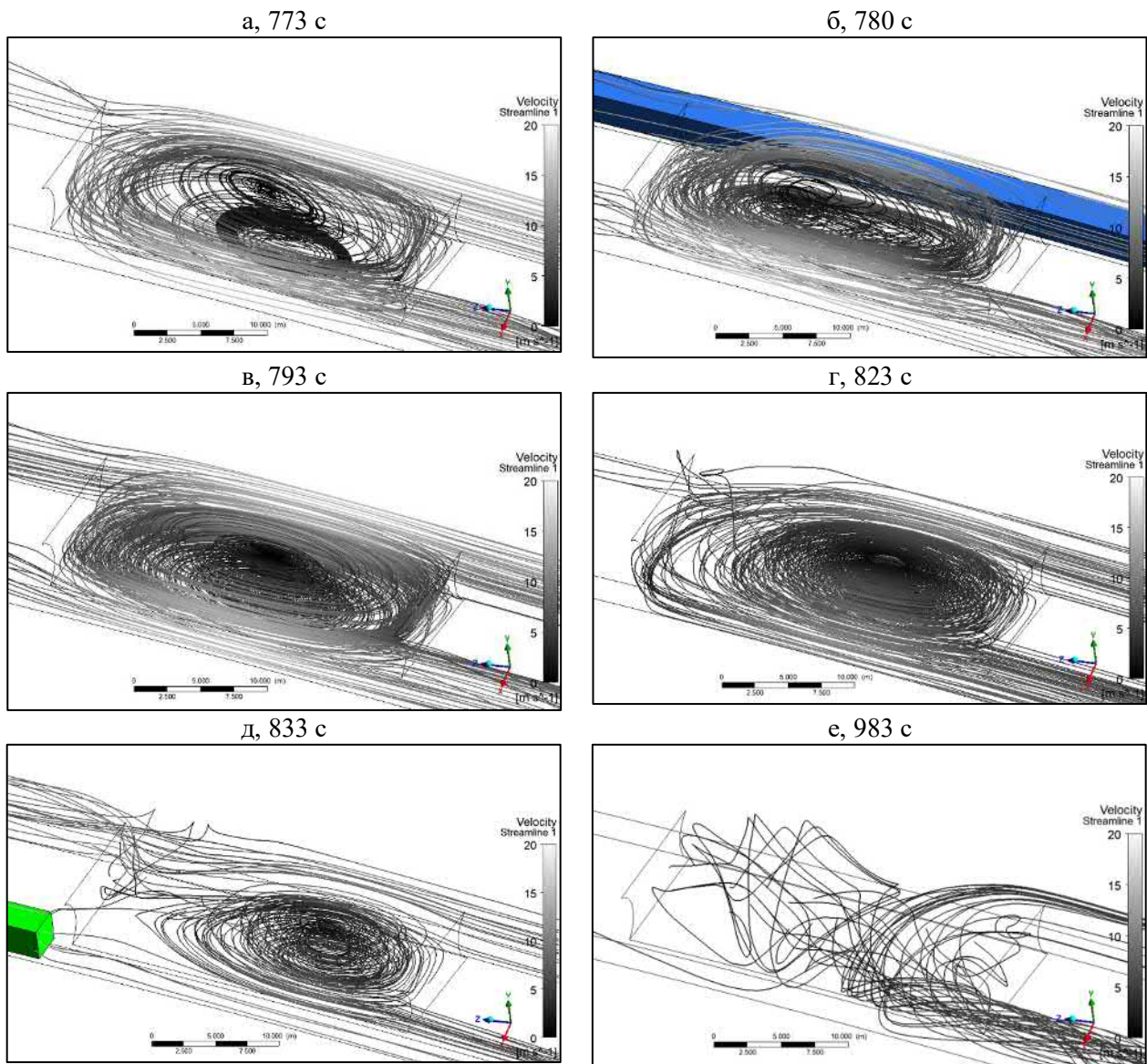


Рисунок 4 – линии тока в вентсбойке №8, случай одновременного прихода поездов на станцию и ухода со станции, скорость поездов $v_t=20$ м/с: *а* – начало торможения поезда перед станцией, *б* – поезд проезжает мимо вентсбойки №8, *в* – остановка поезда на станции и начало стоянки, *г* – конец стоянки поезда, начало разгона, *д* – конец разгона, начало движения с равномерной скоростью, *е* – движение поезда по перегонному тоннелю, на станции поезда отсутствуют; на рисунках цветом показаны поезда

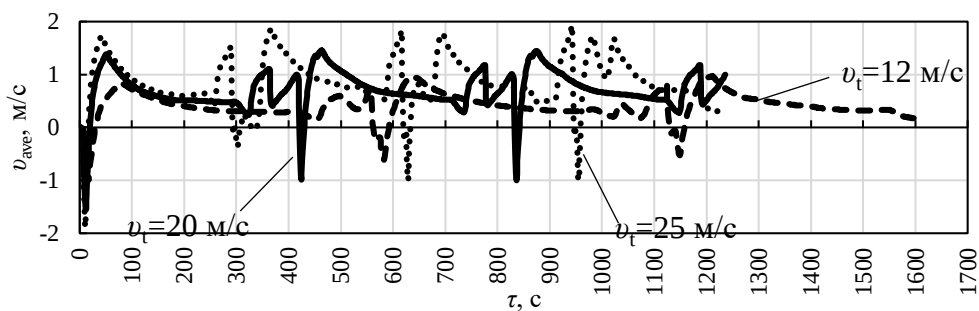


Рисунок 5 – среднее значение нормальной скорости воздуха при скорости движения поездов $v_t=12, 20, 25$ м/с в вентсбойке № 8

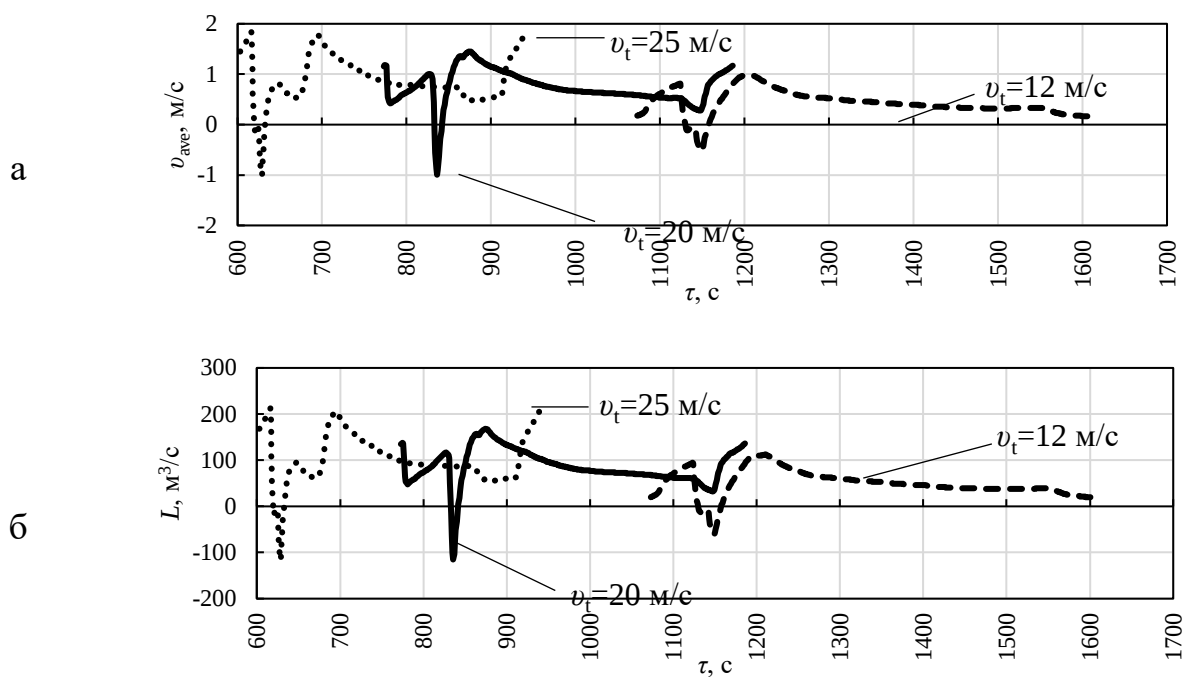


Рис. 6. Среднее значение нормальной скорости воздуха (а) и расхода воздуха (б) при скорости движения поездов $v_t=12, 20, 25$ м/с в вентсбойке № 8 за один проход по кольцу

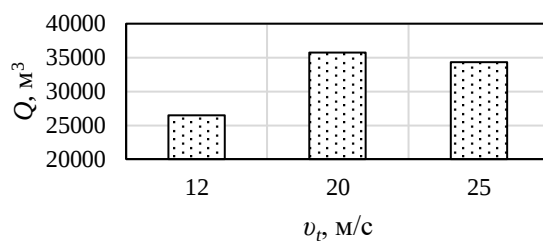


Рис. 7. Количество воздуха, прошедшее через вентсбойку № 8 за один проход поезда, при скорости движения поездов $v_t=12, 20, 25$ м/с

Обсуждение

Проведенный вычислительный эксперимент показал, что поле скоростей воздушных потоков в пристанционной вентсбойке имеет сложную пространственно-неоднородную структуру (рисунки 3, 4), а именно: наличие зон с разнонаправленным движением воздуха, значительный градиент изменения скорости по ширине вентсбойки с переходом значения нормальной составляющей скорости через «0» один или два раза, в зависимости от положения поезда относительно вентсбойки. Как видно из рисунка 4 *е*, упорядоченный проток воздуха через вентсбойку наблюдается, когда поезда на станции отсутствуют и двигаются по участку с перегонными тоннелями, формируя, таким образом, главное циркуляционное кольцо [7]. Поэтому, наиболее эффективное пылеулавливание в вентсбойке будет происходить при движении поездов по тоннелям, т.е. при их отсутствии на станции, что занимает значительную часть цикла движения поездов. Также, следует отметить преимущественно незначительное изменение скорости по высоте вентсбойки (рис 3), что позволяет при выборе места размещения фильтрационного оборудования учитывать только профиль скорости воздуха по ширине вентсбойки, а сами фильтры размещать по всей её высоте. На рисунке 2 показаны минимальные, средние и максимальные значения нормальной составляющей скорости воздуха в вентсбойке № 8 при скорости движения поезда 20 м/с. Исходя из этих значений можно сделать вывод о значительной неоднородности поля скоростей воздушного потока как по направлению, так и по абсолютной величине, при этом максимальные значения проекции скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению вентсбойки достигают величин (в зависимости от направления) от -19,0 м/с до 13,4 м/с при среднем значении от -1,0 до 1,5 м/с. Наиболее значительные флуктуации потока по величине проекции вектора скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению сбойки наблюдаются при движения поезда мимо рассматриваемой вентсбойки, что видно из рисунка 5. Необходимо отметить, что при скорости поезда 20 м/с через вентсбойку за один его проход перемещается больший расход воздуха, чем при скорости движения поезда 12 м/с и 25 м/с. Это объясняется тем, что: *а*) скорость воздуха в вентсбойке при 20 м/с значительно выше чем при скорости движения поезда 12 м/с; *б*) скорость воздуха в вентсбойке при движении поезда с скоростью 25 м/с незначительно выше чем при движении с скоростью 20 м/с, но при этом время одного прохода поезда по расчетному участку меньше.

Заключение

На основании изложенного можно сделать вывод что:

– поле скоростей воздушных потоков в пристанционной вентсбойке имеет сложную пространственно-неоднородную структуру, заключающуюся в наличии зон с разнонаправленным движением воздуха по ширине и зон с локальным ускорением потока, но при этом с незначительным изменением скорости по высоте вентсбойки;

– значительная неоднородность поля скоростей воздушного потока в вентсбойке также характеризуется значительным превышением экстремальных значений скорости воздуха над средним значением, а именно, максимальные значения проекции векторов скорости на нормаль к оси вентсбойки достигают (в зависимости от направления) от -19,0 м/с до 13,4 м/с при их среднем значении от -1,0 до 1,5 м/с.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научной темы FWNZ-2021-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свод правил 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 [Текст] : утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012 : дата введ. 01.01.2013. — М.: [б.и.], 2013. — 260 с.
2. СП 2.5.2623-10 Санитарные правила эксплуатации метрополитенов. Изменения и дополнения N 1 к СП 2.5.1337-03 [Текст] : утв. Пост. Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2010 : дата введ. 08.06.2010. — М.: [б.и.], 2010. — 15 с.
3. Хунашвили Н.Г. [и др.] Клинико-гигиенические параллели при исследовании условий труда и состояния здоровья работников тбилисского метрополитена / Н.Г. Хунашвили, Р.Г. Кверенчиладзе, М.П. Цимакуридзе, Л.Ш. Бакрадзе, Майя П. Цимакуридзе // Аллергология и иммунология. — 2010. — том 11. — № 2. — с. 135-136
4. Сазонова А. М. Исследование пылевого фактора производственной среды метрополитена / А.М. Сазонова // Гигиена и охрана труда транспортной отрасли. — 2016. — с. 79-85
5. Сачкова О.С. [и др.] Разработка мероприятий по оздоровлению условий труда тоннельных рабочих / О.С. Сачкова, Т.В. Матвеева, Н.И. Зубрев, М.В. Устинова, В.Л. Кашинцева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. — 2018. — Т. 7. — №3 (43). — с. 145-149
6. Копытенкова О.И., Шилова Е. А., Сазонова А.М. Комплексный подход к оценке биодеструктивных факторов при освоении подземного пространства / О. И. Копытенкова, Е. А. Шилова, А. М. Сазонова // Интернет-журнал «Науковедение». — Том 7. — №1 (январь - февраль 2015). — с. 1-16
7. Красюк А.М. Об эффекте возникновения циркуляционных колец и их влиянии на воздухораспределение в метрополитене мелкого заложения / А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов // ФТПРПИ. — 2010. — №4. — с. 75-82
8. Krasyyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A. Experimental research into air distribution in a terminal subway station// Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 85, March 2019, Pages 21-28.
9. Красюк А.М. Обоснование технологической схемы вентиляции двухпутных тоннелей метрополитенов без перегонных вентиляционных камер / А.М. Красюк, И.В. Лугин, Е.Л. Алферова, Л.А. Кияница //ФТПРПИ. — 2016. — №4. — с. 117-130.
10. Красюк А.М. Исследование динамики воздушных потоков в метрополитене от возмущающего действия поездов / А.М. Красюк, И.В. Лугин // ФТПРПИ. — 2007. — №6. — с. 101-108.
11. Ying Wang. Unorganized ventilation in subway stations with Platform Screen Doors / Ying Wang, Xiaofeng Li // Building and Environment. — 2017. — №5088. — pp. 21.
12. Zhao Yang. An innovative environmental control system of subway / Zhao Yang, Xiangchao Su, Feng Ma, Longqing Yu, Hongna Wang // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2015. — №147. — pp. 120-131.

13. M.C. Minguillóna, C. Reche, V. Martinsa, F. Amato, E. de Miguel, M. Capdevila, S. Centelles, X. Querol, T. Moreno. Aerosol sources in subway environments // *Environmental Research*. Volume 167, 2018, Pages 314–328.
14. Vania Martins, Teresa Moreno, María Cruz Minguillon, Barend L. van Drooge, Cristina Reche, Fulvio Amato, Eladio de Miguel, Marta Capdevila, Sonia Centelles, Xavier Querol. Origin of inorganic and organic components of PM2.5 in subway stations of Barcelona, Spain // *Environmental Pollution*. Volume 208, 2016, Pages 125-136.
15. Ощепков Т.С., Кияница Л.А., Лугин И.В. К вопросу определения поля скоростей воздуха в тоннельных сооружениях линии метрополитена с использованием кольцевых моделей как способа топологической декомпозиции / Т.С. Ощепков, Л.А. Кияница, И.В. Лугин // *Интерэкспо Геосибирь*. – Новосибирск, 2020. – т.2. – с. 129-136.
16. Кияница Л.А. Исследование динамики давлений на поверхности вагонов поезда в двухпутном тоннеле метрополитена / Л.А. Кияница // *ГИАБ*. — 2016. — №11. — С. 400 – 407.
17. Ansys user's help viewer. Version 2019 R3
18. ANSYS. Customer Training Material. Introduction to ANSYS Meshing
19. Батурин О.В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent. Учеб. Пособие / О.В. Батурин, Н.В. Батурин, В.Н. Матвеев — Самара: Изд-во Самар.гос.аэрокосм.ун-та, 2009. — 151 с.: ил.
20. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. — М.: ДМК Пресс, 2017. — 210 с.: ил.

© Л. А. Кияница, И. В. Лугин, А. М. Красюк, 2021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КРУПНОСТИ ФЛОТИРУЕМЫХ ЧАСТИЦ ОТ ИХ СВОЙСТВ И ГИДРОДИНАМИКИ ФЛОТАЦИОННОЙ КАМЕРЫ

Сергей Александрович Кондратьев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. лабораторией полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)205-30-30, доп. 120, e-mail: kondr@misd.ru

Ксения Андреевна Коваленко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, ученый секретарь, тел. (383)205-30-30, доп. 200, e-mail: kovalenko_ka@misd.ru

Отмечено, что наибольшую скорость флотации имеют частицы среднего размера. Зерна граничных классов размерного диапазона обладают пониженной флотирруемостью, и на них приходится более 50% всех потерь извлекаемых минералов при флотации. Рассматриваются условия стабильности флотационного агрегата «частица – пузырек» в камере машины пенной флотации. Изучено влияние возмущений поверхности пузырька на крупность флотирруемых частицы. Амплитуда начальной деформации поверхности и амплитуда начальной скорости деформации поверхности пузырьков определялись в зависимости от энергии турбулентных пульсаций окружающей жидкости. Установлено, что скорость диссипации энергии в камере флотационной машины оказывает умеренное воздействие на крупность извлекаемых зерен. Изучено влияние поверхностных свойств минеральных частиц и их массы на верхнюю величину размерного диапазона частиц. Показано, что гидрофобность поверхности оказывает значительное влияние на крупность минеральных частиц, сохраняющих контакт с газовой фазой. Основным параметром, характеризующим влияние гидрофобности поверхности флотирруемых частиц на значение силы отрыва, может служить величина наступающего контактного угла.

Ключевые слова: флотация, флотационный агрегат «частица-пузырек», крупность частиц, гидрофобность, энергия диссипации, турбулентность, наступающий угол контакта

DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF THE SIZE OF THE FLOATED PARTICLES ON THEIR PROPERTIES AND THE HYDRODYNAMICS OF THE FLOTATION CHAMBER

Sergey A. Kondratyev

N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Head of Complex Mineral Mining and Processing Department, phone: (383)205-30-30, extension 120, e-mail: kondr@misd.ru

Ksenia A. Kovalenko

N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Scientific Secretary, phone: (383)205-30-30, extension 200, e-mail: kovalenko_ka@misd.ru

It is noted that medium-sized particles have the highest flotation rate. Grains of the boundary classes of the size range have a reduced floatability, and they account for more than 50% of all losses of extracted minerals during flotation. The stability conditions of the particle – bubble flotation unit in the chamber of the foam flotation machine are considered. The effect of perturbations of the bubble surface on the size of the floated particles is studied. The amplitude of the initial deformation of the surface and the amplitude of the initial deformation rate of the bubble surface were determined depending on the energy of the turbulent pulsations of the environmental liquid. It is established that the rate of energy dissipation in the chamber of the flotation machine has a moderate effect on the size of the extracted grains. The influence of the surface properties of mineral particles and their mass on the upper value of the particle size range is studied. It is shown that the hydrophobicity of the surface has a significant effect on the size of the mineral particles that remain in contact with the gas phase. The main parameter that characterizes the effect of the hydrophobicity of the surface of the floated particles on the value of the separation force can be the value of the advancing contact angle.

Keywords: flotation, flotation unit «particle-bubble», particle size, hydrophobicity, dissipation energy, turbulence, incoming contact angle

Введение

Во флотационной пульпе находятся частицы самых разных размеров. Практика флотации свидетельствуют о том, что флотируемость минералов сильно зависит от размера частиц [1, 2].

Наибольшую скорость флотации имеют частицы среднего размера. Зерна граничной или предельной крупности обладают пониженной флотируемостью и на них приходится более 50% всех потерь извлекаемых минералов. Верхний предел крупности для сульфидных минералов в стандартных условиях пенной флотации составляет ~150 мкм, для не сульфидных – от 200 до 500 мкм (в зависимости от их плотности), нижний предел – 10 мкм [3]. Уже с первых дней промышленного применения флотации внимание исследователей сосредоточено на установлении зависимости флотируемости минеральных частиц от их размеров. Этот вопрос представляет большой теоретический интерес. Его решение поможет расширить диапазон крупности извлекаемых зерен и улучшить ряд смежных обогатительных процессов [4].

Осуществление флотации более крупных частиц с достаточной полнотой перевода их в пену, позволит значительно интенсифицировать процессы измельчения, фильтрации, сушки, сгущения и другие стадии обогащения руды, снизив тем самым стоимость обогащения. Повышение крупности в основной флотации в 3-4 раза приведет к сокращению потерь ценных минералов в виде переизмельченных зерен и снижению энергетических затрат на рудоподготовку примерно в 2 раза [2]. В ряде случаев флотация более крупных частиц минерала повышает селективность процесса и значительно улучшает процессы дальнейшего технологического передела концентратов. Так увеличение крупности флотируемых зерен углей повышает значение этого метода обогащения при переработке углей. Автоклавная плавка концентратов руд самородной серы протекает более эффективно на крупных продуктах. Крупные зерна графита в ряде случаев имеют большую ценность, чем мелкие.

Увеличение селективности флотации тонких минеральных фракций, устранение их отрицательного влияния на флотацию является одной из важнейших проблем современной теории и практики флотации [5-9]. До сих пор не освоено флотационное обогащение охристых, легко шламуемых окисленных минералов, содержащих железо, молибден, свинец, вольфрам и т.п. Необходимость тщательного обесшламливания делает нерентабельным обогащение ряда руд с большим содержанием глин и первичных шламов. Показатели обогащения многих руд сравнительно низкие вследствие слишком больших потерь полезных минералов в тонких шламовых фракциях [1, 2].

Предметом работы многих исследователей является изучение влияния гидрофобности на крупность извлекаемых частиц [1, 2, 10-18]. В [10] для оценки связи максимального размера d_{max} флотируемых частиц и наступающего контактного угла, были использованы две флотационные модели – частица на границе раздела «жидкость–газ» и агрегат «частица-пузырек», основанные на балансе сил. Установлено, что d_{max} извлекаемых частиц зависит от их размера, плотности, гидрофобности, динамики процесса и других параметров.

Для изучения влияния свойств частиц на кинетику смачиваемости методом капиллярного подъема было исследовано большое количество частиц разных типов и размеров (60-520 мкм) [11]. Путем измерения скорости проникновения различных жидкостей в упакованные слои стеклянных шариков было установлено, что ни размер частиц, ни распределение пор по размерам не влияют на значения контактных углов, но обнаружено влияние последних на скорость проникновения.

Флотационное поведение кварцевых частиц, поверхность которых в различной степени гидрофобизирована органосилановым соединением, изучено в диапазоне размеров частиц от 15 до 125 мкм [12]. Сообщается, что для каждого размера частиц существует определенное значение контактного угла, меньше которого частица не будет флотироваться. Это приводит к понятию флотационной области, которая определяется размером частиц и углом контакта, в пределах которой возможна флотация. Установлено, что зависимость константы скорости флотации от размера частиц существенно линейна, что противоречит данным в [11]. Сообщается, что значения угла контакта необработанных частиц галенита зависят от способа подготовки, а не от размера частиц [13].

Другие экспериментальные работы, опубликованные на сегодняшний день, также подтверждают существование критического угла контакта, ниже которого флотация не происходит [14 - 17]. Установлено, что флотация мелкодисперсных метилированных кварцевых частиц размером 3 мкм в камере с механическим перемешиванием мешалкой Раштон и в трубке Халлимонда происходит только при достижении контактного угла 60° [15]. Работы [16, 17] посвящены изучению флотации тонких частиц. В механической флотационной камере исследовано флотационное поведение метилированных кварцевых частиц в диапазоне размеров от 0,2 до 50 мкм в зависимости от меняющегося угла контакта. Экспериментальные результаты показывают, что флотационное извлечение мелких частиц является функцией как угла контакта частиц (гидрофобности), так и размера.

Точнее, извлечение увеличивается с увеличением угла контакта и уменьшается с уменьшением размера частиц, что согласуется с предыдущими исследованиями [12]. Увеличение поверхностной гидрофобности приводит к более быстрому разрыву прослойки между пузырьком и частицей [18], то есть к сокращению времени индукции. С термодинамической точки зрения, по мере увеличения гидрофобности частиц потенциальная энергия взаимодействия между частицей и пузырьком возрастает. Результаты флотации, полученные в этой работе, свидетельствуют о том, что если мелкие частицы обладают достаточной гидрофобностью, они могут прикрепляться к пузырькам. Другими словами, флотация мелких частиц возможна при достижении критического значения угла контакта. Теоретические расчеты пределов флотации для тонкодисперсных частиц, выполненные Scheludko A. и др., не дают хорошего согласования с экспериментальными данными [19]. Напротив, существует очень хорошее согласие между экспериментальными данными и моделью, которая была разработана Drelich J. и Miller J.D. [20]. В этой модели учитывается корреляция между гидрофобностью поверхности (углом контакта) и шероховатостью поверхности частиц с помощью псевдолинейного натяжения, которое лучше отражает условия флотации частиц, используемых в их исследовании.

Авторы обзора [21] пришли к выводу, что угол контакта и смачивание твердых частиц зависят от многих физических и химических факторов, таких как шероховатость поверхности, ее неоднородность, а также форма и размер частиц. Отмечено, что степень смачивания поверхности зависит также и от гидродинамических условий. Неспособность различить эффекты каждого фактора может быть вызвана взаимодействием и/или перекрытием двух или более факторов в каждой системе. Отсутствует жесткая количественная корреляция между факторами, влияющими на смачивание, поведение смачивания и угол контакта минералов, следовательно, и их влияние на процесс флотации.

Анализ результатов приведенных работ показывает их противоречивость. Целью данной работы является определение условия стабильности флотационного агрегата «частица – пузырек» в камере машины пенной флотации.

Методы и материалы

Пенная флотация осуществляется в условиях турбулентного (вихревого) движения пульпы необходимого для ее суспендирования. Вероятность флотации полезного минерала зависит от вероятности выполнения отдельных этапов этого процесса. К ним относятся: взаимодействие частиц с реагентами, столкновение их с пузырьками, закрепление на пузырьках, деминерализация газовой фазы, образование и разрушение сложных аэрофлокулов, процессы, происходящие в пенном слое и т.д. [2]. Турбулентность, характеризуется диссипацией энергии внутри флотационного объема и присуща всем конструкциям камер флотационных машин. Она определяется величиной подводимой импеллером энергии, геометрией конструктивных элементов, ограничивающих внутренний объем камеры, и свойствами среды. Турбулентность и порождаемая ею сила инерции

массы частицы оказывают определяющее влияние на один из важнейших показателей процесса флотации, крупность извлекаемых флотацией частиц.

В работе [22] представлен расчет колебаний минеральной частицы на поверхности пузырька. Динамические уравнения, описывающие движение механической системы «частица – пузырек» и движение возникающие в невязкой несжимаемой жидкости, получены с помощью лагранжевой механики. Определены потенциальная и кинетическая энергия системы. Найден лагранжиан агрегата «частица – пузырек» в терминах кинетической и потенциальной энергий $L = L_f + L_p = (T - U)_f + (T - U)_p$, который был использован для записи уравнений Эйлера – Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{b}_j} - \frac{\partial L}{\partial b_j} = \lambda \frac{\partial g}{\partial b_j}, \quad j = 1, \dots, N + 1; \quad g(b_1, \dots, b_N, b_{N+1}, t) = 0 \quad (1)$$

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) требует задания начальных данных для функций и их первых производных. В начальный момент можно задать возмущения поверхности пузырька – обобщенные координаты b_j и их производные по времени $\dot{b}_j$ – скорость перемещения стенок пузырька. Для задания начальной скорости производных по времени обобщенных координат рассмотрен турбулентный поток, в котором находится флотационный агрегат. Средняя скорость турбулентных пульсаций в инерционном интервале спектра турбулентности дается выражением:

$$\bar{u}' = C(\varepsilon l)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где C – постоянная, равная 1,37; ε – скорость диссипации энергии, $\text{м}^2/\text{с}^3$; l – масштаб турбулентных образований, м.

Таким образом, зная ε можно дать оценку начальной скорости возмущений поверхности пузырька, то есть производные по времени обобщенных координат $\dot{b}_j$. Распределение скорости диссипации энергии по камере флотомшины определено методами вычислительной гидродинамики в программной среде ANSYS Fluent. Расчетная геометрическая модель лабораторной флотационной машины создана в геометрическом препроцессоре Design Modeler. Геометрия модели представлена прямоугольной камерой, статором и импеллером. Пространственная дискретизация расчетной области проведена с помощью модуля Meshing. Для моделирования турбулентного потока применена модификация k - ε -модели турбулентности – Realizable и неравновесная пристеночная функция: Enhanced Wall Function [23]. Численный эксперимент проводили при следующих условиях: скорость вращения импеллера 2200 об/мин; рабочая жидкость вода, имеющая вязкость 0,001 кг/(м·с) и плотность 998,2 кг/м³, при температуре 20°C. Вращение импеллера моделировали в стационарной постановке, используя Multiple Reference Frame.

Результаты

Принято, что в камере флотационной машины концентрации частиц и пузырьков крайне малы. Распределение скоростей диссипации энергии турбулентного движения по камере флотационной машины практически не зависит от содержания пузырьков и минеральных частиц и может быть определено в рамках однофазной среды. В результате вычислительного эксперимента получено поле скорости диссипации энергии в горизонтальной плоскости на уровне середины лопаток импеллера (рис. 1).

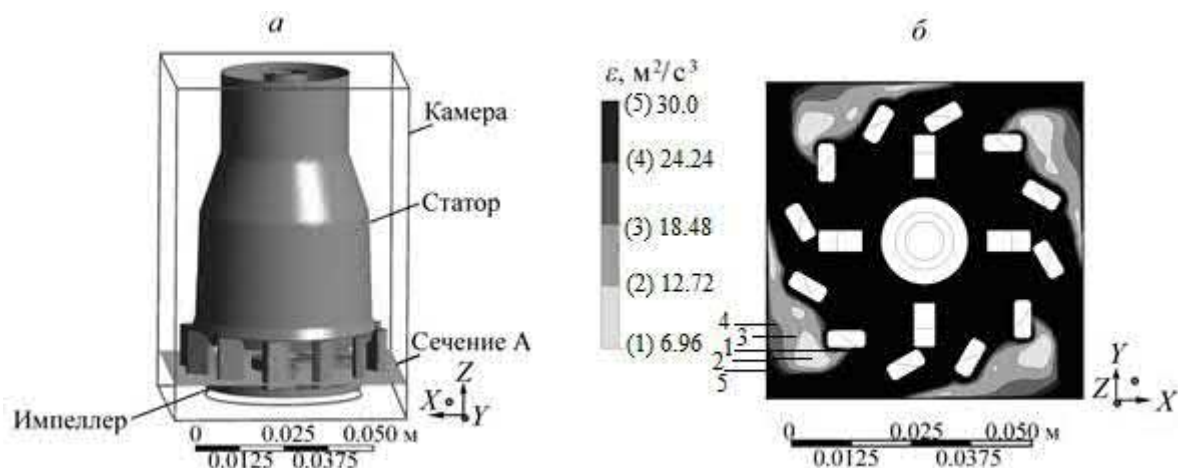


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель конструкции камеры лабораторной флотационной машины и сечение А, вдоль которого получено распределение энергии (а); поле скорости диссипации энергии в камере лабораторной флотационной машины в плане на уровне середины лопаток импеллера (б)

Для решения системы уравнений (1) находились начальные условия в предположении, что образование и разрушение агрегатов «частица – пузырек» происходило на выходе из области статора в приимпеллерной зоне. В наших расчетах значение ϵ выбрано 15 и 30 m^2/s^3 . При заданных значениях ϵ и размере турбулентного образования 0,002 м средняя пульсационная скорость пространственно-изотропных пульсаций согласно зависимости (2) составит 0,43 и 0,54 м/с, соответственно. На агрегат «частица – пузырек» могут оказать влияние пульсации большего масштаба. Следует учитывать, что функция плотности распределения скоростей пульсаций жидкости, подчиняется закону нормального распределения вероятностей. Стандартное отклонение от среднего значительно и поэтому скорость пульсаций может превышать среднее значение, вычисленное по уравнению (2). Будем считать, что начальная скорость стенки пузырька равна скорости турбулентного образования, действующего на эту стенку.

Результаты расчетов, представленные на рис. 2, 3. подтверждают ранее установленную зависимость крупности флотируемых частиц от наступающего контактного угла [14-17]. Установлено, что если гидрофобность минеральной

частицы можно охарактеризовать максимальным наступающим статическим углом $\theta_{max}=25^\circ$, то при $\varepsilon=15 \text{ м}^2/\text{с}^3$, она сохранит контакт с пульсирующим пузырьком (рис. 2а). Увеличение скорости диссипации энергии в камере машины до $30 \text{ м}^2/\text{с}^3$ потребует увеличения наступающего контактного угла до 40° для сохранения флотационного контакта (рис. 2б). Все частицы с гидрофобностью меньше 40° будут сброшены с поверхности пузырька. Отрыв минеральной частицы от пузырька происходит в результате смыкания периметра контакта трех агрегатных состояний при достижении значений θ_{max} . Данные рис. 2. позволяют сделать вывод, что увеличение энергии диссипации оказывает незначительное увеличение на амплитуду колебаний частицы. Плотность частицы оказывает большее влияние на амплитуду ее колебаний (рис. 2а, в).

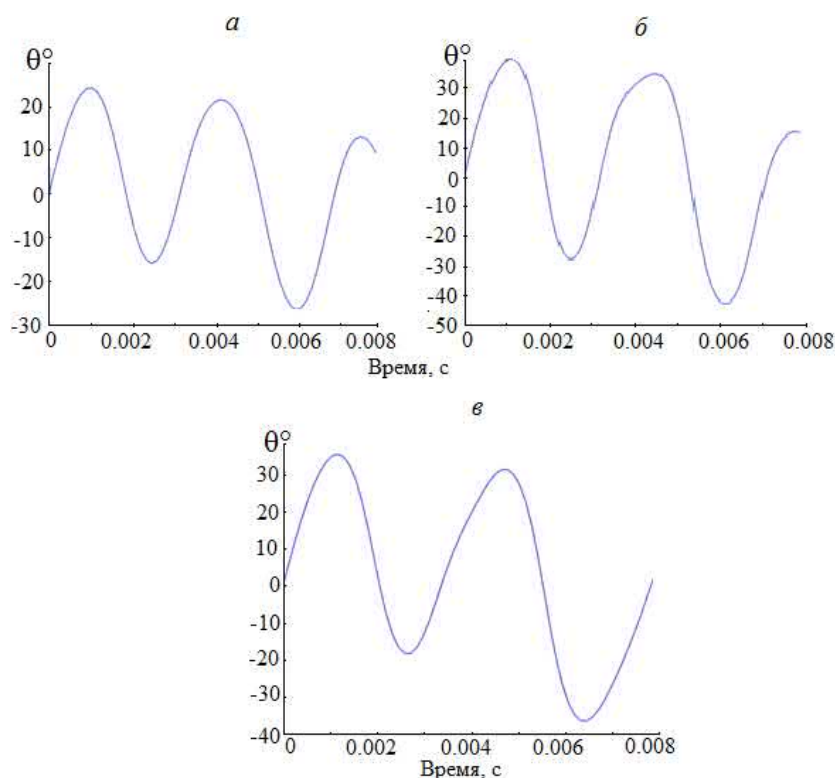


Рис. 2. Отклонение контактного угла θ от горизонтали в зависимости от времени в камере флотационной машины для минеральной частицы цилиндрической формы высотой 250 и диаметром 125 мкм: а – $\varepsilon = 15 \text{ м}^2/\text{с}^3$, плотность частицы $6000 \text{ кг}/\text{м}^3$; б – $\varepsilon = 30 \text{ м}^2/\text{с}^3$, плотность частицы $6000 \text{ кг}/\text{м}^3$; в – $\varepsilon = 15 \text{ м}^2/\text{с}^3$, плотность частицы $7500 \text{ кг}/\text{м}^3$

На рис. 3 показан контактный угол на поверхности основания цилиндрической частицы в зависимости от размеров частицы. Расчеты проведены для пузырька радиусом 800 мкм; минеральной частицы цилиндрической формы радиусом $r_0=100\text{--}300$ мкм и высотой $h=2r_0$. Плотности частицы и жидкости составляли 4500 и $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, соответственно; коэффициент поверхностного натяжения жидкости – $0.072 \text{ Н}/\text{м}$; начальная скорость частицы $0.5 \text{ м}/\text{с}$.

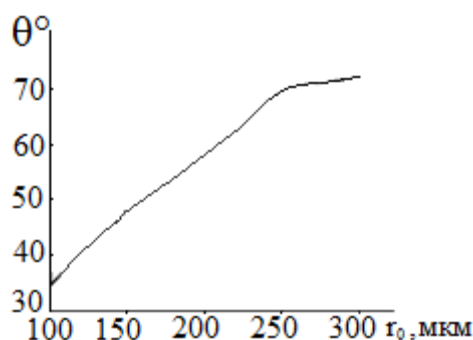


Рис. 3. Максимум контактного угла θ в зависимости от размеров минеральной частицы

Видно, что для частиц размерами ~150, 200, 250 и 300 мкм при достижении наступающего контактного угла в значениях ~48, 55, 68 и 72°, соответственно, произойдет разрушение агрегата «частица-пузырек».

Выводы

Показано, что основная сила отрыва частиц — инерционная, обусловлена поверхностными колебаниями пузырьков. Амплитуда поверхностных колебаний пузырька является функцией скорости диссипации энергии в камере флотационной машины, частота определяется собственной частотой поверхностных колебаний. Инерционная сила отрыва частиц — функция их вынужденных колебаний. Установлено, что во время колебаний частицы на поверхности пузырька, совершающего поверхностные колебания, контактный угол изменяется в широких пределах, что предполагает устойчивое закрепление периметра трехфазного контакта на ребрах частицы. При достижении контактным углом величины динамического наступающего контактного угла возможно смыкание линии смачивания на минеральной поверхности и отрыв частицы от пузырька. Подтверждена ранее установленная зависимость крупности флотируемых частиц от наступающего контактного угла. Выявлено, что турбулентность в камере флотационной флотомашины оказывает умеренное воздействие на крупность извлечения минеральных частиц, а плотность частицы значительно влияет на амплитуду ее колебаний.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (Код научной темы FWNZ -2021-0002)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глембоцкий В. А., Классен В. И. Флотационные методы обогащения. Учебник для вузов. — М.: Недра. — 1981. — 304 с.
2. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения: Учебник для вузов. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, издательство «Горная книга», «Мир горной книги». — 2008. — 710 с.

3. Богданов О.С., Максимов И.С., Поднек А.К. и др. Теория и технология флотации руд. – М.: Недра. – 1990. – 363 с.
4. Классен В.И., Мокроусов В.А. Введение в теорию флотацию. – М.: Госгортехиздат. – 1959. – 636 с.
5. Deriagin B.V., Dukhin S.S. Theory of flotation of small and medium size particles // Trans. Inst. Min. Metall. – 1961. – V. 70. – P. 221 – 246.
6. Deriagin B.V., Dukhin S.S. Kinetic theory of the flotation of fine particles // Proceedings 13th Int. Miner. Process. Congr., Warszawa. – 1979. – 2. – P. 21 – 62.
7. Subrahmanyam T.V., Fossberg E.F.S. Fine particle processing: Shear flocculation and carrier flotation – A review // International Journal of mineral processing. – 1990. – Vol. 30. – P. 265 – 286.
8. Sivamohan R. The problem of recovering very fine particles in mineral processing – A Review // International journal of mineral processing. – 1990. – Vol. 28. – P. 247 – 288.
9. Rubio J., Souza M.L., Smith R.W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique // Minerals Engineering. – 2002. – № 15. – P. 139. – 155.
10. Kowalczyk P.B., Sahbaz O., Drzymala J. Maximum size of floating particles in different flotation cells // Minerals Engineering. – 2011. – V. 24. – P. 766 – 771.
11. Dang-Vu T., Hupka J. Characterization of porous materials by capillary rise method // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. – 2005. – P. 47 – 65.
12. Crawford R., Ralston J. The influence of particle size and contact angle in mineral flotation // International Journal of Mineral Processing. – 1988. – V. 23. – P. 1 – 24.
13. Prestidge C.A., Ralston J. Contact angle studies of particulate sulfide minerals // Minerals Engineering. – 1996. – V. 9. – P. 85 – 102.
14. Gontijo Cd. F., Fornasiero D., Ralston J. The limits of fine and coarse particle flotation // Can. J. Chem. Eng. – 2007. – V. 85. – P. 739 – 747.
15. Miettinen T. Fine Particles Flotation // PhD Thesis. University of South Australia, Mawson Lakes, 2007.
16. Chipfunhu D., Zanin M., Grano S. The dependency of the critical contact angle for flotation on particle size – Modelling the limits of fine particle flotation // Minerals Engineering. – 2011. – V. 24. – P. 50 – 57.
17. Chipfunhu D., Zanin M., Grano S. Flotation behaviour of fine particles with respect to contact angle // Chemical engineering research and design. – 2012. – V. 90. – P. 26 – 32.
18. Hewitt D., Fornasiero D., Ralston J. Aqueous film drainage at quartz/water/air interface // J. Chem. Soc. Faraday Trans. – 1993. – V. 89. – P. 817 – 822.
19. Scheludko A., Toshev B.V., Bojadjev D.T. Attachment of particles to a liquid surface (capillary theory of flotation) // Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases. – 1976. – V. 72. – P. 2815 – 2828.
20. Drelich J., Miller J.D. The effect of surface heterogeneity on pseudo-line tension and the flotation limit of fine particles // Colloids Surf. – 1992. – V. 69. – P. 35 – 43.
21. Chau T.T., Bruckard W.J., Koh P.T.L., Nguyen A.V. A review of factors that affect contact angle and implications for flotation practice // Advances in colloid and interface science. – V. 150. – 2009. – P. 106 – 115.
22. Кондратьев С.А., Мошкин Н.П. Взаимодействие минеральной частицы со свободным пузырьком воздуха в жидкости // ФТПРПИ. – 2020. – №6. – С. 125 – 135.
23. Миньков Л.Л., Моисеева К.М. Численное решение задач гидродинамики с помощью вычислительного пакета Ansys Fluent: учеб. пособие. – Томск: STT, 2017. – С. 122.

© С. А. Кондратьев, К. А. Коваленко, 2021

ФЛОТАЦИЯ СВИНЦОВО-ЦИНКОВОЙ РУДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМЕСИ ДИТИОКАРБАМАТА И КСАНТОГЕНАТА

Иван Андреевич Коновалов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 54, инженер, тел. (383)205-30-30 доб. 167, e-mail: IGD_K@mail.ru

Исследовалась собирательная способность ксантогената, дитиокарбамата и их сочетания. Рассмотрено влияние активности по отношению к границе раздела «газ-жидкость» производных форм реагентов, представленных физически сорбированными формами собирателя. Флотационные эксперименты свинцово – цинковой руды Горевского месторождения, показали повышение флотационных показателей при использовании сочетаний реагентов. Применение собирателя с выраженными хемосорбируемыми свойствами в сочетании с реагентом обладающим поверхностно-активными свойствами к границе раздела «газ – жидкость», привело к увеличению извлечения полезного компонента. Установлено, что активность физической формы сорбции влияет на селективность извлечения свинца и цинка - при уменьшении активности физически сорбированной формы реагента возрастает селективность извлечения.

Ключевые слова: Флотация, ксантогенат, дитиокарбамат, физическая форма сорбции, свинцово-цинковая руда

FLOTATION OF LEAD-ZINC ORE USING A MIXTURE OF DITHIOCARBAMATE AND XANTHATE

Ivan A. Konovalov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Engineer, office: +7 (383)205-30-30 ext. 167, e-mail: IGD_K@mail.ru

The collecting capacity of xanthate, dithiocarbamate and their combination was studied. The effect of activity with respect to the gas-liquid interface of derivative forms of reagents represented by physically sorbed forms of collector was considered. Flotation experiments of lead-zinc ore from the Gorevsky deposit showed an increase in flotation performance when using reagent combinations. The use of a collector with pronounced chemisorbable properties in combination with a reagent having surface-active properties towards the gas-liquid interface caused an increase in the recovery of useful component. It was determined that activity of the physical form of sorption affects the selectivity of lead and zinc recovery - as activity of the physically sorbed form of reagent decreases, the selectivity of recovery grows.

Keywords: Flotation, xanthate, dithiocarbamate, physical form of sorption, lead-zinc ore

Введение

Эффективность применения смешанных флотационных реагентов была признана в 1950-х годах. В настоящее время накопилось множество экспериментальных свидетельств, доказывающих улучшение показателей флотации при

использовании смесей собирателей. Существует много гипотез объясняющих улучшение показателей флотации в случае использования композиций собирателей, но нет понимания механизма, в соответствии с которым происходит улучшение показателей флотации. Согласно одной из них синергетический эффект обусловлен улучшенными адсорбционными характеристиками [1].

Основной причиной повышения показателей флотации при использовании ионогенного и неионогенного собирателей исследователи считают увеличение сорбции основного собирателя [2]. Предполагается, что присутствие неионогенного собирателя увеличивает сорбцию анионного собирателя в результате латерального взаимодействия углеводородных цепей и экранирования электростатического отталкивания гидрофильных групп.

В тоже время авторами [3] показано, что адсорбция олеата натрия ($C_{18}H_{33}O_2Na$) на апатите была ниже в присутствии оксиэтилированного нонилфенола с 4 ЕО группами ($C_9H_{19}C_6H_4O(C_2H_4O)_4H$). Авторы объяснили этот факт конкурирующей адсорбцией между двумя реагентами. Олеат формирует многослойное покрытие. Часть его сорбируется в форме олеата кальция. Нонилфенол предотвращает сорбцию олеата кальция, снижая общую сорбцию ионогенного собирателя. Изменение контактного угла при добавлении оксиэтилированного нонилфенола было незначительным и ожидаемым. В области малых концентраций олеата ($0,1 \div 5$ мг/л) контактный угол увеличился на $6 \div 7^\circ$ и уменьшился на $6 \div 10^\circ$ при больших концентрациях.

В [4], [5] также не подтверждено увеличение сорбции основного собирателя. Авторы исследовали адсорбцию анионных гексадецилсульфата ($C_{16}H_{33}OSO_3Na$) и алкил сульфосукцината (формула) без добавления неионогенного собирателя и с добавлением нонилфенола с 5 оксиэтильными группами (NP5) на шеелите и кальците. Результаты экспериментов показали, что добавление NP5 уменьшает адсорбцию гексадецилсульфата и алкил сульфосукцината на обоих минералах. Аналогично в [6] сообщается о уменьшении сорбции олеата на франколите в присутствии РЕО, содержащем неионогенное поверхностно-активное вещество, хотя его присутствие увеличило контактный угол на минерале. Таким образом, увеличение сорбции собирателя на не сульфидных минералах в присутствии дополнительного реагента экспериментально не подтверждается.

Проявление синергетического эффекта от применения сочетания тиольных собирателей исследователи также объясняют улучшенными адсорбционными характеристиками. Более равномерное распределение собирателей с различной адсорбционной активностью на минеральной поверхности было предложено Плаксиным и Зайцевой [7]. По их предположению поверхностные центры на минерале обладают различной химической активностью по отношению к разным типам собирателей. Применение коллектива собирателей ускорит кинетику адсорбции и скорость флотации в целом. Работу [8] можно считать развитием работы [7]. В ней авторы предполагают, что более селективный собиратель (диизобутиловый дитиофосфинат $C_8H_{18}PS_2Na$) закрепляется на сильных, не окисленных центрах, а не селективный собиратель (изопропиловый ксантогенат)

закрепляется на более слабых, окисленных центрах минеральной поверхности. Суммарная адсорбция на халькопирите существенно увеличилась, когда соотношение концентраций собирателей составило 50: 50.

В [9] показана возможность получать на извлекаемых минералах требуемые производные формы за счет выбора сочетания собирателей и регулирования Eh и pH флотационной пульпы. Оптимальные значения Eh и pH, при которых на минеральной поверхности достигается получение соответствующих форм собирателя: ксантогенат металла или диксантоген, известны из обширной практики флотации. Предлагаемый подход особенно ценен для повышения показателей коллективной флотации сульфидов. Применение одного собирателя и генерация его производных форм в результате гидролиза, электронно-каталитического окисления в пульпе часто не могут дать требуемого результата в условиях коллективной флотации. Сочетание собирателей позволяет при заданных значениях Eh и pH получить требуемые производные формы собирателей для всех извлекаемых минералов. Предложенное объяснение синергетического эффекта представляется наиболее вероятным, так как показывает, что каждый из собирателей выполняет свою функцию в подготовке минералов ко флотации.

Авторы [10] полагают, что присутствие дитиокарбамата содействует окислению ксантогената и образованию диксантогена или, возможно, усиливается связь собирателей с минералом [11]. В работе [10] также утверждается, что в растворе, не содержащем минералов, между тиольными собирателями отсутствуют химические реакции. Из этого следует, что окисление ксантогената возможно за счет полупроводниковых свойств извлекаемого минерала.

Объяснение причин повышения показателей флотации применением сочетания собирателей основаны на термодинамическом анализе элементарного акта флотации. Кинетика взаимодействия минеральной частицы с пузырьком газа остались вне рамок исследований рассмотренных работ. Предложенные гипотезы повышения показателей флотации достаточно противоречивы. В [12] указывается, что процесс выбора реагентов неформальный, часто зависит от опыта персонала, знания им применяемой технологии и может меняться для разных обогатительных фабрик. Целью настоящей работы является сравнительное исследование собирательной активности и избирательности извлечения целевого компонента дитиокарбаматами и ксантогенатами на примере свинцово-цинковой руды и объяснение причин проявления синергетического эффекта на основе механизма работы физически сорбированного собирателя.

Материалы и оборудование

Флотационные исследования проводились на свинцово-цинковой руде Горевского месторождения. В табл. 1 приведены данные химического состава исследуемой руды.

Таблица 1

Химический состав руды Горевского месторождения

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
Na ₂ O	0,036	FeO	15,4	P ₂ O ₅	0,067
MgO	3,58	SiO ₂	34,5	TiO ₂	0,16
Al ₂ O ₃	3,81	Pb	5,31	S	3,7
K ₂ O	0,69	Cu	<0,01	Cd	<0,001
CaO	10,0	As	<0,001	CO ₂	15,63
MnO	1,24	Zn	4,97		

В качестве реагента-собирателя для флотации свинцово-цинковой руды применялись диэтилдитиокарбамат ГОСТ 8864-71, ксантогенат бутиловый ГОСТ 7927-75, пенообразователя использовался Т-80 с расходом 50 г/т.

Определение скорости растекания осуществлялось с применением ряда реагентов: сернокислого цинка ГОСТ 4174-77, ксантогенатов бутилового и этилового ГОСТ 7927-75, диэтилдитиокарбамата натрия (ДЭДК) ГОСТ 8864-71.

Экспериментальная часть

Выполнялось определение скорости растекания раствора диэтилдитиокарбамата, продуктов окисления этилового ксантогената, продуктов взаимодействия диэтилдитиокарбамата и ксантогената с солями тяжелых металлов. Определение скорости выполнялось методом скоростной съемки на установке, представленной в [13]. Для экспериментального нахождения скорости растекания диэтилдитиокарбамата по поверхности дистиллированной воды, готовился раствор с концентрацией 0,1 моль/л. Съемка выполнялась скоростной камерой evercam 4000-16-с. Видео записывалось с разрешением 1280 × 304 со скоростью 10 000 кадр/с.

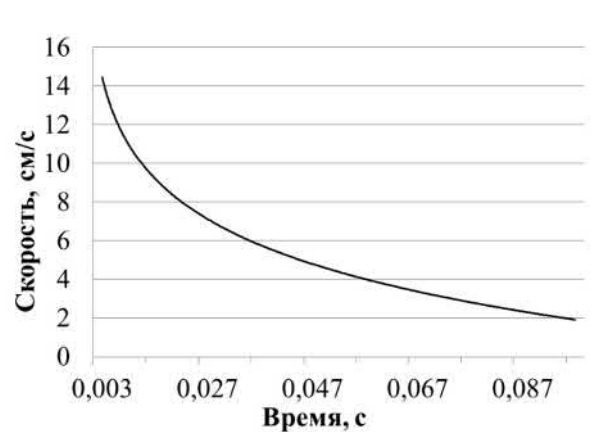


Рис. 1. Скорость растекания раствора диэтилдитиокарбамата на поверхности воды в зависимости от времени. Концентрация диэтилдитиокарбамата $1 \cdot 10^{-1}$ моль/л. Съемка 10 000 кадр/с

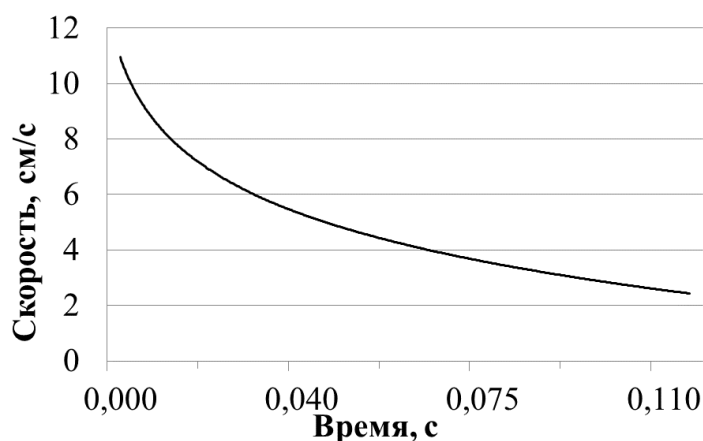


Рис. 2. Скорость растекания продуктов взаимодействия сернокислого цинка с диэтилдитиокарбаматом натрия на поверхности воды в зависимости от времени. Концентрация диэтилдитиокарбамата $1 \cdot 10^{-1}$ моль/л. Мольное соотношение 1:10. Съемка 10000 к/с.

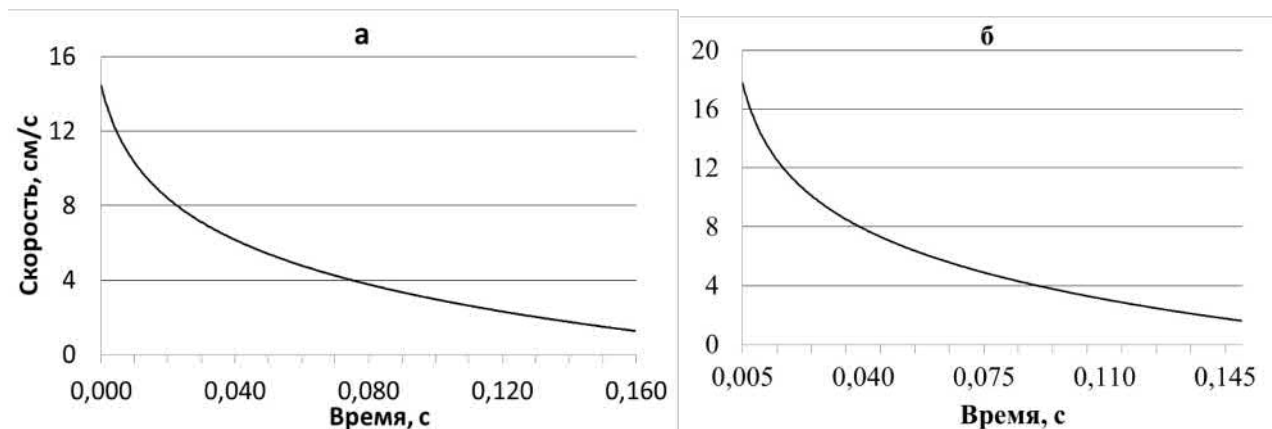


Рис. 3 Скорость растекания продуктов взаимодействия нитрата свинца с этиловым(а) и бутиловым(б) ксантогенатом на поверхности воды в зависимости от времени. Концентрация ксантогената $1 \cdot 10^{-1}$. Мольное соотношение 1:10. Время отстаивания эмульсии указана на графиках. Съемка 10000 к/с.

Исследование влияния диэтилдитиокарбамата на показатели флотации выполнялось по флотационной схеме, представленной на рис. 4. Флотация проводилась в лабораторной флотационной машине ФМП-Л1 с объемом камеры 0.5 л. После измельчения навеску руды (200 г) с водой загружали в флотационную камеру и подавали реагент-собиратель.

Расход реагента и время агитации приведены в табл. 2. Время основной флотации 5 мин. После флотации пенный и камерный продукт сушили и взвешивали. Контроль осуществлялся по содержанию свинца и цинка. Результаты представлены в табл. 3.

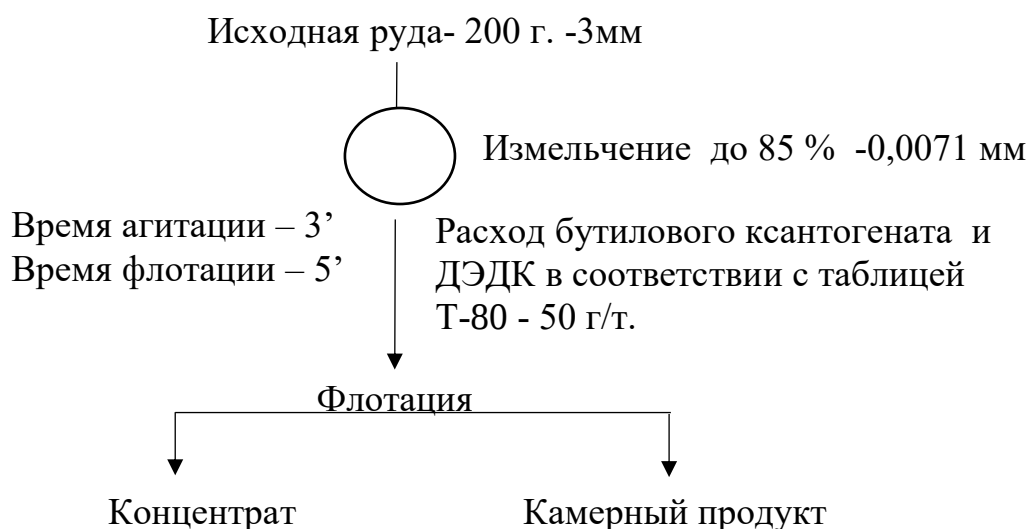


Рис. 4 Общая схема флотационного эксперимента с свинцово-цинковой рудой Горевского месторождения.

Таблица 2

Виды реагентов, их расходы, время агитации и флотации

Реагент	Расход, г/т	Время, мин	
		агитации	флотации
Бутиловый ксантогенат	100	3	5
Диэтилдитиокарбамат (ДЭДК)	100	3	
Бутиловый ксантогенат/ ДЭДК	5/100	3/3	
Бутиловый ксантогенат/ ДЭДК	20/100	3/3	
Бутиловый ксантогенат/ ДЭДК	100 / 5	3/3	
Бутиловый ксантогенат/ ДЭДК	100 / 20	3/3	

Обсуждение результатов

Скорость растекания производных продуктов взаимодействия с нитратом свинца в воде этилового ксантогената составляет ~15 см/с, а диэтилдитиокарбамата ~11 см/с. Необходимо сказать, что в пульпе окисление дитиокарбамата маловероятно вследствие высокой его реакционной способности. В [11] установлено образование тиолатов металла тионокарбаматами, в тоже время дитиолаты отсутствовали. Ксантогенаты на сульфидах -полупроводниках дополнительно образуют диксантоген. Ассоциаты «ксантогенат ион – диксантоген» обладают высокой скоростью растекания по поверхности воды (до 30 см/с) и обладают большей собирательной способностью в сравнении с дитиокарбаматами. Продукты взаимодействия дитиокарбаматов с переходными металлами обладают сравнительно небольшой скоростью растекания и их собирательная способность невелика.

Полученные значения извлечения свинца (62,9%) и цинка (46,7 %) ксантогенатом, а дитиокарбаматом (35,5 %) и (13,9 %) соответственно указывают на

более слабую собирательную активность последнего реагента (Табл. 3). Содержание свинца и цинка в пенном продукте при использовании ксантогената составило 20,65 и 19,0% соответственно. При флотации дитиокарбаматом содержание свинца увеличилось до 34,6, а содержание цинка незначительно снизилось до 17,7%. Полученные результаты указывают на более высокие собирательные свойства ксантогената в сравнении с дитиокарбаматом, но избирательность извлечения свинца дитиокарбаматом значительно превышает избирательность извлечения ксантогенатом (табл. 3). Использование различных сочетаний реагентов привело к возрастанию извлечения до 78,5 по свинцу и до 71,3 по цинку при расходах реагентов 100 г/т ксантогената и 20 г/т дитиокарбамата (табл. 3).

Таблица 3

Показатели флотации свинцово-цинковой руды тиолными собирателями
и их сочетанием

Продукт	Выход, γ, %	Содержание, β, %		Извлечение, ε, %		Собиратель/Расход в г/т
		Pb	Zn	Pb	Zn	
Пенный	11,54	20,65	19,0	62,9	46,7	Бутиловый ксантогенат, 100
Камерный	83,62	1,57	2,83	34,7	50,3	
+1	4,85	1,85	2,9	2,4	3,0	
Всего	100,0	3,79	4,70	100	100	
Пенный	6,23	34,6	17,7	35,5	13,9	Диэтилдитиокарбамат, 100,
Камерный	90,32	4,26	7,35	63,3	83,7	
+1	3,44	2,13	5,49	1,2	2,4	
Всего	100,0	6,08	7,93	100,0	100,0	
Пенный	14,90	20,55	18,15	74,3	52,7	Бутиловый ксантогенат, 5 Диэтилдитиокарбамат, 100
Камерный	79,15	1,22	2,85	23,4	43,9	
+1	5,95	1,57	2,96	2,3	3,4	
Всего	100,0	4,12	5,14	100,0	100,0	
Пенный	14,17	20,62	18,71	74,3	53,2	Бутиловый ксантогенат, 20 Диэтилдитиокарбамат, 100,
Камерный	79,87	1,15	2,66	23,4	42,6	
+1	5,96	1,52	3,52	2,3	4,2	
Всего	100,0	3,93	4,98	100,0	100,0	
Пенный	15,56	20,32	20,45	76,9	63,1	Бутиловый ксантогенат, 100 Диэтилдитиокарбамат, 5
Камерный	78,89	1,1	2,15	21,1	33,6	
+1	5,55	1,51	3,03	2	3,3	
Всего	100,0	4,11	5,05	100,0	100,0	
Пенный	18,33	17,17	19,24	78,5	71,3	Бутиловый ксантогенат, 100 Диэтилдитиокарбамат, 20
Камерный	75,59	1	1,63	18,9	24,9	
+1	6,08	1,73	3,05	2,6	3,7	
Всего	100,0	4,01	4,94	100,0	100,0	

Ранее было показано, что собирательная сила физически сорбируемого реагента в основном обусловлена его активностью на границе раздела «газ-жидкость» [13,14]. Под активностью физической формы сорбции понимается мощность поверхностного потока десорбированных с минерала и растекающихся по пузырьку производных форм собирателя. Вследствие низкой поверхностной активности продуктов взаимодействия дитиокарбаматов с металлами по отношению к границе раздела «газ-жидкость» их собирательная активность сравнительно низкая (рис. 2). Выполненные эксперименты по флотации свинцово – цинковой руды подтверждают полученный вывод (табл. 3). В работе [15] показано, что уменьшение расхода ионогенного, хемосорбируемого собирателя и добавление неионогенного малополярного привело к увеличению извлечения и содержания полезного компонента.

Снижение поверхностной активности продуктов взаимодействия дитиокарбаматов с металлами, согласно механизму работы физической формы сорбции собирателя, указывает на их высокие избирательные свойства. О высокой селективности дитиокарбаматов сообщается в работах [16], [17]. Дитиокарбамат малоактивен по отношению к границе раздела «газ-жидкость» и используется, как хемосорбируемый собиратель. Расход дитиокарбамата должен быть минимально необходимым для гидрофобизации требуемого минерала и закреплении на нем физически сорбируемого собирателя (ксантогенат), и недостаточным для гидрофобизации минералов породы. Это обеспечивает высокую селективность и извлечение полезного компонента.

Выводы

Сопоставление скоростей растекания производных форм ксантогенатов и дитиокарбаматов с результатами флотационных экспериментов с использованием этих реагентов показывает, что собирательные свойства ксантогенатов и дитиокарбаматов определяются их активностью по отношению к границе раздела «газ-жидкость». Увеличение активности собирателя по отношению к указанной границе раздела и его расхода приводит к росту извлечения. В тоже время анализ литературных источников, флотационные эксперименты не подтверждают зависимость извлечения от энергии химической связи собирателя с катионом кристаллической решетки минерал.

Селективность извлечения полезного компонента в случае применения композиции собирателей может изменяться двумя методами. По первому она определится соотношением суммарных активностей химической и физической форм сорбции собирателя. По второму методу свойства каждого из собирателей ориентированы на выполнение определённой функции: селективной хемосорбции или физической сорбции поверхностно активного реагента. Хемосорбция осуществляется в соответствии с правилом: гидрофобизация должна быть минимально необходимой для закреплении физически сорбируемого собирателя на извлекаемом минерале и недостаточной для закреплении последнего на минералах породы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Critchley J.K., Riaz M. Study of synergism between xanthate and dithiocarbamate collectors in flotation of heazlewoodite / *Transaction of the Institution of Mining and Metallurgy*. – 1991. – Vol. 100. – P. 55-57.
2. Rao K. H., Forssberg KSE. Mixed collector systems in flotation / *International Journal of Minerals Processing*. – 1997. – Vol. 51. – P. 67–79.
3. Sis H, Chander S. Adsorption and contact angle of single and binary mixtures of surfactants on apatite. *Minerals Engineering*. – 2003. – Vol. 16. - P. 839–848.
4. Von Rybinski W., Schwuger M. J. Adsorption of Surfactant Mixtures in Froth Flotation / *Langmuir*, 1986. - Vol. 2. – P.639-643.
5. Von Rybinski W., Schwuger M. J., Dobias B. Surfactant mixtures as collectors in flotation / *Colloids and Surfaces*. – 1987. – Vol. 26. – P. 291-304.
6. Lu Y., Liu N., Wang X., Miller J.D. Improved phosphate flotation with nonionic polymers. In: Zhang P., El-Shall H., Wiegel R. (Eds), *Beneficiation of Phosphates: Advances in Research and Practice*. – P. 3-19.
7. Плаксин И. Н., Зайцева С.П. / Научные сообщения Института горного дела имени А. А. Скочинского, Академия наук СССР, Москва. – 1960. - № 6. – С. 15-20.
8. Bagci E., Ekmekci Z., Bradshaw D., Adsorption behaviour of xanthate and dithiophosphinate from their mixtures on chalcopyrite. *Minerals Engineering*. - 2007. – Vol. 20. – P. 1047–1053.
9. Lotter N.O., Bradshaw D. J., Barnes A. R. Classification of the Major Copper Sulphides into semiconductor types, and associated flotation characteristics / *Minerals Engineering*. – 2016. – Vol.96-97. – P. 177-184.
10. Bradshaw D.J., O'Connor C.T. The flotation of pyrite using mixtures of dithiocarbamates and other thiol collectors / *Minerals Engineering*. - 1994. –Vol. 78 (5–6). – P. 681–690.
11. Bradshaw D.J., Cruywagen J.J., O'Connor C.T. Thermochemical measurements of the surface reactions of sodium cyclohexyl-dithiocarbamate, potassium n-butyl xanthate and a thiol mixture with pyrite / *Minerals Engineering*. - 1995. – Vol. 8 (10). – P. 1175–1184.
12. Nagaraj D.R. Reagent selection and optimization – the case for a holistic approach / *Minerals Engineering*. – 2005. – Vol. – 18. – P. 151–158.
13. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П., Коновалов И. А. Оценка собирательной способности легко десорбируемых форм ксантогенатов // *ФТПРПИ*. — 2015. — № 4. — С. 164 – 173.
14. Кондратьев С. А. Доказательства механизма работы физически сорбированного собирателя в элементарном акте флотации / *ФТПРПИ*. — 2021. — № 1. — С.
15. Коновалов И. А., Кондратьев С. А. Метод выбора структуры и состава углеводородного фрагмента молекулы собирателя и регулятора флотации / *ФТПРПИ*, 2020 - №1. – С. 114-123.
16. Матвеева Т. Н., Громова Н. К., Ланцова Л.Б. Анализ комплексообразующих и адсорбционных свойств дитиокарбаматов на основе циклических и алифатических аминов для флотации золотосодержащих руд / *ФТПРПИ*. – 2020. - № 2. – С. 121 – 127.
17. Raju G. B., Forsling W. Adsorption mechanism of diethyldithiocarbamate on covellite, cuprite and tenorite / *Colloids and Surfaces*. – 1991. – Vol. 60. - P. 53-69.

© И. А. Коновалов, 2021

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УДАРНОГО УЗЛА СКВАЖИННОГО ВИБРОИСТОЧНИКА

Алексей Олегович Кордубайло

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (953)762-70-59, e-mail: Kordubaylo_ao@mail.ru

Борис Ферапонтович Симонов

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (913)891-34-00, e-mail: Simonov_BF@mail.ru

Создание скважинных источников упругих колебаний для реализации методов виброволнового увеличения нефтеотдачи является актуальной задачей горного машиноведения. В работе обоснована целесообразность использования электромагнитного линейного привода скважинного виброисточника для генерирования осевых ударных импульсов. Предложена математическая модель, описывающая динамику движения бойка электромагнитного ударного узла под действием тяговых сил катушек, сил трения и аэродинамического сопротивления с учётом упругих связей в конце нижнего и верхнего рабочего хода бойка. Представлены теоретические зависимости перемещения и скорости бойка от времени, полученные с помощью разработанной модели, и показана их высокая сходимость с экспериментальными данными. Математическая модель электромагнитного ударного узла может быть использована для оптимизации его конструктивных параметров, а также для проектирования новых типоразмеров виброисточников, отвечающих требованиям нефтегазовой промышленности.

Ключевые слова: волновой метод увеличения нефтеотдачи, скважинный виброисточник, электромагнитный ударный узел, математическая модель, динамика бойка, скорость, перемещение, электромагнитная сила тяги

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC IMPACT UNIT OF DOWNHOLE VIBRATION SOURCE

Alexey O. Kordubailo

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher, office: +7 (953)762-70-59, e-mail: Kordubaylo_ao@mail.ru

Boris F. Simonov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, office: +7 (913)891-34-00, e-mail: Simonov_BF@mail.ru

Creation of downhole sources of elastic vibrations for the implementation of vibrowave enhanced oil recovery methods is an urgent task of mining engineering. The paper substantiates the expediency of using an electromagnetic linear drive of a downhole vibration source to generate axial shock pulses. A mathematical model is proposed that describes the dynamics of movement of the

striker of electromagnetic impact unit under the action of traction forces of coils, friction forces and aerodynamic resistance, taking into account the elastic constraints at the end of the lower and upper working strokes of the striker. Theoretical dependences of striker displacement and speed on time, obtained using the developed model, are presented, and their high convergence with the experimental data is shown. The mathematical model of electromagnetic impact unit can be used to optimize its parameters, as well as to design new standard sizes of vibration sources that meet the requirements of the oil and gas industry.

Keywords: wave method for enhancing oil recovery, downhole vibration source, electromagnetic impact unit, mathematical model, striker dynamics, speed, displacement, electromagnetic traction force

Введение

Для многих крупных месторождений нефти и газа России и зарубежья одной из важнейших проблем является низкий коэффициент извлечения нефти из продуктивных пластов. Его значения редко превышают 0,3 – 0,4 [1,2]. Для увеличения степени извлечения углеводородов из недр Земли применяются различные методы увеличения нефтеотдачи (МУН). Наиболее широкое промышленное распространение получили физические, химические, тепловые, гидродинамические и биологические МУН [3-7]. Среди них особенно перспективным является метод виброволнового воздействия на продуктивные залежи, вследствие сравнительно малых экономических затрат на его осуществление и возможности совместного применения с другими МУН [8-10].

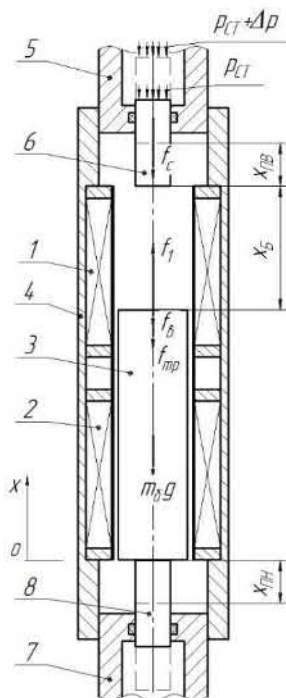
При осуществлении виброволнового МУН целесообразно источник колебаний располагать в скважине. Это позволяет максимально приблизить его к объекту вибровоздействия – нефтяному пласту. В настоящее время известно множество технических решений и конструктивных схем различных устройств, позволяющих производить внутрискважинное волновое воздействие на нефтяные пласты. Их многообразие обусловлено отсутствием достаточно точных и универсальных математических моделей, позволяющих рассчитать и обоснованный выбор рациональных параметров и режимов вибровоздействия из условия обеспечения максимальной нефтеотдачи пластов [11-12]. В связи с этим при создании скважинных вибрационных и импульсных источников необходимо руководствоваться оптимизацией рабочих процессов в самих устройствах, повышением их энергоэффективности и удельных энергетических параметров. При этом, в следствие больших глубин залегания нефтяных пластов (1,5 – 2 км и более), крайне важное значение имеет выбор типа энергоносителя по критерию минимальных потерь энергии при её передаче от генератора на дневной поверхности к виброисточнику в скважине [8, 10]. Среди технически реализуемых способов передачи энергии в скважину: механический, гидравлический, пневматический, электрический – при равных условиях наименьшими линейными потерями обладает электропривод. Это обуславливает целесообразность создания скважинного виброисточника на базе линейного электромагнитного привода ударного действия [13].

В Институте горного дела СО РАН разработан скважинный электромагнитный импульсный виброисточник, который содержит электромагнитный ударный узел для генерирования осевых импульсов и гидромеханические силовые элементы для преобразования и передачи импульсов на обсадную трубу скважины [14]. Экспериментальные исследования влияния конструктивных параметров на энергетические характеристики виброисточника показали, что целесообразно изготавливать виброисточник по конструктивной схеме, включающей электромагнитный ударный узел, снизу и сверху которого расположены силовые элементы [15]. В таком виброисточнике нижнее и верхнее движение бойка кончается ударом по плунжерам силовых элементов. При этом происходит излучение сейсмического сигнала в горную породу. Для создания скважинных электромагнитных импульсных виброисточников с различными энергетическими характеристиками и геометрическими параметрами необходимо определить влияние всех конструктивных факторов на динамику движения бойка электромагнитного ударного узла.

Цель настоящей работы – разработать адекватную математическую модель движения бойка электромагнитного ударного узла скважинного виброисточника под действием сил тяги катушек и сил сопротивления движению.

Методы и материалы

Для разработки математической модели предложена расчётная схема электромагнитного ударного узла, представленная на рис. 1.



1 – верхняя катушка; 2 – нижняя катушка; 3 – боёк; 4 – корпус; 5,7 – верхний и нижний СЭ; 6,8 – плунжер

Рис. 1. Расчётная схема электромагнитного ударного узла

Схема имеет ряд допущений, а именно:

- верхний и нижний силовые элементы аналогичны по параметрам и конструкции;
- виброисточник расположен в скважине вертикально;
- потери энергии на деформацию обсадной трубы, жидкости и упругой камеры в силовом элементе не учитываются;
- взаимодействие бойка с плунжером абсолютно неупругое.

На рис. 1 боёк ударного узла находится в начальном положении в точке касания с плунжером нижнего силового элемента. После запуска виброисточника боёк осуществляет следующие движения:

- движение вверх под действием электромагнитной силы верхней катушки до контакта с плунжером верхнего силового элемента;
- движение бойка совместно с плунжером вверх на величину $x_{пв}$ и остановка в верхней мёртвой точке;
- движение бойка совместно с плунжером вниз на величину $x_{пв}$;
- движение бойка под действием электромагнитной силы нижней катушки до контакта с плунжером нижнего силового элемента;
- движение бойка совместно с плунжером вниз на величину $x_{пн}$ и остановка в нижней мёртвой точке;
- движение бойка совместно с плунжером вверх на величину $x_{пн}$.

После перечисленных стадий движения бойка рабочий цикл электромагнитного ударного узла повторяется. Каждая стадия движения бойка описывается дифференциальным уравнением (1-6), система которых образует математическую модель ударного узла.

$$\frac{m_6 d^2 x}{dt^2} = f_1(i_1, x) - m_B g - f_{тр}(k_r, f_1, k_T) - f_B\left(\frac{dx}{dt}\right), \text{ при } 0 < x < x_6, \quad (1)$$

$$\frac{(m_6 + m_{п}) d^2 x}{dt^2} = -f_p(p, x) - f_c(f_{зат}, k_T), \text{ при } x_6 \leq x \leq x_6 + x_{пв}, \quad (2)$$

$$\frac{(m_6 + m_{п}) d^2 x}{dt^2} = -f_p(p, x) + f_c(f_{зат}, k_T), \text{ при } x_6 + x_{пв} > x \geq x_6, \quad (3)$$

$$\frac{m_6 d^2 x}{dt^2} = -f_2(i_2, x) - m_B g + f_{тр}(k_r, f_2, k_T) + f_B\left(\frac{dx}{dt}\right), \text{ при } x_6 > x > 0, \quad (4)$$

$$\frac{(m_6 + m_{п}) d^2 x}{dt^2} = f_p(p, x) + f_c(f_{зат}, k_T), \text{ при } 0 \geq x \geq -x_{пн}, \quad (5)$$

$$\frac{(m_6 + m_{п}) d^2 x}{dt^2} = f_p(p, x) - f_c(f_{зат}, k_T), \text{ при } -x_{пн} < x \leq 0, \quad (6)$$

где x_6 - величина хода бойка под действием тяговых сил электромагнитов; $x_{пв}$, $x_{пн}$ - ход плунжеров верхнего и нижнего силовых элементов под действием энергии

удара; m_b , $m_{пл}$ – массы бойка и плунжера; $f_1(i_1, x)$, $f_2(i_2, x)$ – тяговые усилия верхней и нижней электромагнитных катушек; i_1 , i_2 – рабочие токи в катушках; g – ускорение свободного падения; $f_{тр}(k_r, f_1, k_t)$ – сопротивление трения бойка в направляющей; k_r – коэффициент радиального прижатия бойка к направляющей; k_t – коэффициент трения в (1), (4) – бойка в направляющей, в (2), (3), (5), (6) – плунжера в уплотнении; $f_b(dx/dt)$ – сила аэродинамического сопротивления перемещения бойка; $f_p(p, x)$ – сила, создаваемая давлением жидкости в силовом элементе на нижний торец плунжера; f_c – сила трения плунжера; $f_{зат}$ – сила поджатия уплотнения плунжера.

Теоретические и экспериментальные результаты исследования тяговых характеристик катушек электромагнитного ударного узла изложены в работе [16]. Из них следует, что величина силы тяги прямо пропорциональна действующему в обмотке току и для электромагнитов с отношением длины катушки к радиусу бойка в пределах 12 – 25 постоянна на большей части рабочего хода бойка. Это позволяет в расчётной модели принять $f_1(i_1, x)$, $f_2(i_2, x)$ постоянными величинами.

При вертикальном положении электромагнитного ударного узла сила трения бойка в направляющей вызвана наличием электромагнитного радиального притяжения бойка к направляющей. Это происходит вследствие неравномерности намотки провода, различной толщиной и дефектами изготовления направляющей и др. факторов. Вопрос радиального притяжения бойка достаточно подробно исследован в работе [17], в которой сказано, что сила радиального притяжения пропорциональна электромагнитной силе тяги. Коэффициент пропорциональности для длинноходовых систем находится в пределах 0,2 – 0,4. Это позволяет определить силу трения бойка при движении в направляющей.

Вопрос аэродинамического сопротивления исследован в работе [18], из результатов которой следует, что выполнение по оси бойка отверстия диаметром, равным 0,27 – 0,31 от наружного диаметра бойка, при скорости движения в пределах 4 – 6 м/с ведёт к образованию установившегося потока воздуха через отверстие. При этом перепад давления между полостями над бойком и под ним составляет не более 0,022 – 0,03 МПа, а сила сопротивления воздуха не превышает 40 – 60 Н.

Решением уравнения (1) определяется скорость бойка в момент контакта с плунжером верхнего силового элемента. Из условия о неупругом соударении бойка с плунжером следует, что начальную скорость совместного движения бойка с плунжером для уравнения (2) можно определить по закону сохранения импульса. Сила сопротивления внедрения плунжера в гидравлическую полость определяется площадью нижнего торца плунжера и гидравлическим давлением. Вопрос определения величины давления в силовом элементе, в зависимости от конструктивных параметров и энергии удара, решён в работе [19]. Это позволяет определить силу, создаваемую давлением в силовом элементе, для решения уравнений (2, 3, 5, 6).

Сила трения в уплотнении плунжера при использовании уплотнительных фторопластовых колец трапецеидального сечения определяется усилием сжатия

уплотнения, углом между наклонными поверхностями и коэффициентом трения фторопласта о плунжер.

Аналогичным способом определяется динамика движения бойка при движении вниз и его взаимодействие с нижним плунжером.

Разработанная математическая модель основана на последовательном решении уравнений (1 – 6) и позволяет установить теоретические зависимости перемещения и скорости движения бойка электромагнитного ударного узла от времени. Из результатов экспериментальных исследований [15] известны значения скоростей ударов бойка по плунжерам силовых элементов. В настоящей работы представлены результаты сравнения теоретических и экспериментальных значений скорости удара.

Результаты

С использованием вышеописанной математической модели рассчитаны зависимости перемещения и скорости бойка от времени. Пример графиков перемещения и скорости при значениях тяговых усилий верхней и нижней катушек соответственно 330 и 40 Н показан на рис. 2.

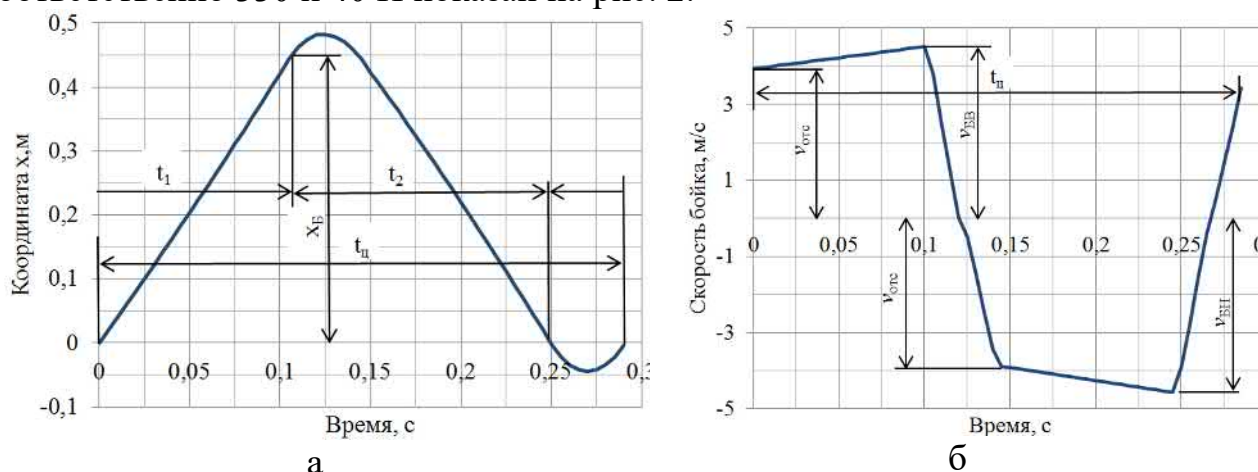


Рис. 2. Теоретические зависимости перемещения (а) и скорости (б) бойка от времени

На графиках введены следующие условные обозначения: t_1 – время включения верхней катушки; t_2 – время включения нижней катушки; $t_{\text{ц}}$ – длительность рабочего цикла; $x_{\text{б}}$ – величина хода бойка между точками касания с плунжерами; $v_{\text{отс}}$ – скорость бойка после отрыва от плунжера силового элемента; $v_{\text{бв}}$, $v_{\text{бн}}$ – скорости движения бойка в моменты касания соответственно верхнего и нижнего плунжеров.

Результаты сравнения расчётных и экспериментальных значений времени работы катушек и времени цикла приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение экспериментального и расчётного времени рабочего цикла

Эксперимент при $U=100\text{ В}$			Расчёт при $F_1 = 300$ $H, F_2 = 10\text{ Н}$			Абсолютное откло- нение			Относительное от- клонение, %		
$t_1, \text{ мс}$	$t_2, \text{ мс}$	$t_{ц}, \text{ мс}$	$t_1, \text{ мс}$	$t_2, \text{ мс}$	$t_{ц}, \text{ мс}$	$\Delta t_1, \text{ мс}$	$\Delta t_2, \text{ мс}$	$\Delta t_{ц}, \text{ мс}$	$\varepsilon(t_1), \%$	$\varepsilon(t_2), \%$	$\varepsilon(t_{ц}), \%$
161	134	295	147	143	289	-14	9,7	-5,6	9,75	6,09	1,94
Эксперимент при $U=120\text{ В}$			Расчёт при $F_1 = 315$ $H, F_2 = 25\text{ Н}$			Абсолютное откло- нение			Относительное от- клонение, %		
$t_1, \text{ мс}$	$t_2, \text{ мс}$	$t_{ц}, \text{ мс}$	$t_1, \text{ мс}$	$t_2, \text{ мс}$	$t_{ц}, \text{ мс}$	$\Delta t_1, \text{ мс}$	$\Delta t_2, \text{ мс}$	$\Delta t_{ц}, \text{ мс}$	$\varepsilon(t_1), \%$	$\varepsilon(t_2), \%$	$\varepsilon(t_{ц}), \%$
147	129	276	141	137	278	6	8	2	4,25	5,84	0,72
Эксперимент при $U=140\text{ В}$			Расчёт при $F_1 = 330$ $H, F_2 = 40\text{ Н}$			Абсолютное откло- нение			Относительное от- клонение, %		
$t_1, \text{ мс}$	$t_2, \text{ мс}$	$t_{ц}, \text{ мс}$	$t_1, \text{ мс}$	$t_2, \text{ мс}$	$t_{ц}, \text{ мс}$	$\Delta t_1, \text{ мс}$	$\Delta t_2, \text{ мс}$	$\Delta t_{ц}, \text{ мс}$	$\varepsilon(t_1), \%$	$\varepsilon(t_2), \%$	$\varepsilon(t_{ц}), \%$
138	122	260	135	132	267	-3,2	10	7	2,37	7,76	2,62

Обсуждение

Для оценки корректности предложенной математической модели произведен сравнительный анализ расчётных и экспериментальных временных характеристик рабочего цикла ударного узла [17]. Из результатов анализа, представленных в табл. 1, следует, что относительное отклонение расчётных значений времени работы катушек и длительности рабочего цикла от экспериментальных значений не более 10 % в диапазоне исследуемых параметров напряжения и тяговых усилий. Это значит, что разработанная математическая модель с совокупностью принятых допущений адекватно описывает динамику движения бойка электромагнитного ударного узла и позволяет определять зависимости скорости и перемещения бойка от времени для различных режимов работы.

С помощью разработанной модели определены такие сочетания тяговых усилий катушек, при которых обеспечивается режим работы ударного узла с равными энергиями нижнего и верхнего удара. Для этого разность между значениями электромагнитной силы верхней и нижней катушки необходимо обеспечивать в интервале от $2,05m_{\delta}g$ до $2,15m_{\delta}g$, где m_{δ} – масса бойка, g – ускорение свободного падения. Такое сочетание тяговых усилий позволяет создавать в нефтяном пласте аналогичные сейсмические волны при верхнем и нижнем ударе бойка, что повышает эффективность вибровоздействия.

Разработанная модель позволяет исследовать влияние конструктивных параметров на динамику рабочего цикла ударного узла и может быть использована для оптимизации конструкции длинноходовых электромагнитных ударных узлов с отношением длины намагничивающей катушки к радиусу бойка в диапазоне 12 – 25, применяемых для создания скважинных виброисточников. Также модель может быть использована при проектировании новых типоразмеров

скважинных виброисточников, удовлетворяющих требованиям нефтегазовых промыслов России и мира.

Заключение

Для технической реализации виброволнового метода увеличения нефтеотдачи могут быть использованы скважинные виброисточники на основе линейных электромагнитных двигателей ударного действия, обеспечивающие минимальные потери энергии при её передаче с дневной поверхности к скважинному виброисточнику.

В работе предложена математическая модель электромагнитного ударного узла виброисточника, описывающая динамику движения бойка под действием электромагнитных сил катушек, сил сопротивления движению и реакций со стороны гидромеханических силовых элементов виброисточника. Подтверждена удовлетворительная сходимость результатов расчётов по разработанной модели с экспериментальными данными, что позволяет использовать модель для научно-исследовательских работ и для проектирования типоразмерного ряда виброисточников, востребованных нефтегазовой промышленностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Апасов, Т.К. Методы интенсификации добычи нефти и повышения нефтеотдачи для месторождений Западной Сибири: Учебное пособие / Т.К. Апасов, Р.Т. Апасов, Г.Т. Апасов. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. – 187 с.
2. Ибрагимов, Л.Х. Интенсификация добычи нефти / Л.Х. Ибрагимов, И.Т. Мищенко, Д.К. Челоянц. – М.: Наука, 2000. – 414 с.
3. Алтунина, Л.К. Физико-химические и комплексные технологии увеличения нефтеотдачи Пермо-Карбоновой залежи высоковязкой нефти Усинского месторождения / Л.К. Алтунина, А.А. Кувшинов, И.В. Кувшинов, Л.А. Стасьева, М.В. Чертенков, Л.С. Шкрабюк, Д.В. Андреев // Нефтяное хозяйство. – 2017. – №7. – С.26-29.
4. Bera A. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects / A. Bera, T. Babadagli // A review. Applied Energy. – 2015. – Vol. 151. — P. 206–226. doi.org/10.1016/j.apenergy. 2015.04.031.
5. Esmaeilzadeh P. Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO₂, SiO₂ and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery / P. Esmaeilzadeh, M. T. Sadeghi, Z. Fakhroueian, A. Bahramian and R. Norouzbeigi // J. Natural Gas Sci. and Eng. – 2015. – Vol. 26. — P. 1294–1305. doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.037.
6. Sheng J. J., Leonhardt B., and Azri N. Status of polymer-flooding technology, J. Canadian Petroleum Technology. – 2015. – Vol. 54, No 2. — P. 116–126. doi.org/10.2118/174541-PA.
7. Крянев, Д.Ю. Применение методов увеличения нефтеотдачи пластов в России и за рубежом. Опыт и перспективы / Д.Ю. Крянев, С.А. Жданов // Бурение и нефть. – 2011. – №2. – С. 22-26.
8. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф. и др. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. – Новосибирск: Наука, 2010. – 404 с.
9. G.Yu, Y. Z. Chen, X. M. Wang, O. H. Zhang, Y. P. Li, B. Y. Zhao, J. J. Wu, J. Greer. Walkaway VSP using multimode optical fibers in a hybrid wireline. The Leading Edge. – 2016. – Vol. 35. – No 7. – pp 615-619. doi.org/10.1190/tle35070615.1.

10. Дыбленко, В.П. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами / В.П. Дыбленко, Е.Ю. Марчуков, И.А. Туфанов, Р.Я. Шарифуллин, В.С. Евченко. — М. : РАЕН, 2012. — 344 с.
11. Ганиев О.Р. Основы волноводной механики продуктивных пластов / О.Р. Ганиев, Р.Ф. Ганиев, Л.Е. Украинский, И.Г. Устенко // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 466, №3. — С. 298–301.
12. Курленя, М. В. Развитие метода повышения притока нефти к скважине в процессе разработки месторождения / М.В. Курленя, В.И. Пеньковский, А.В. Савченко, Д.С. Евстигнеев, Н.К. Корсакова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 3. — С. 62–71.
13. Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели: монография / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. — Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. — 220 с.
14. Пат. 2642199 Российская Федерация, МПК E21B23/01 (2006.01). Скважинный сейсмоисточник / Б.Ф. Симонов, Ю.В. Погарский, А.О. Кордубайло, Ю.А. Лебедев; заявитель и патентообладатель ПАО «СилэнСейсмоимпульс»; заявл. 19.04.2017; опубл. 24.01.2018; Бюл. № 3. — 11 с.: ил.
15. Кордубайло, А.О. Исследование конструкций скважинного электромагнитного импульсного виброисточника / А.О. Кордубайло, Б.Ф. Симонов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — №5 — С.146-153.
16. Кордубайло, А.О. Исследование тяговых характеристик электромагнитов для скважинного виброисточника / А.О. Кордубайло, Б.Ф. Симонов // Интерэкспо Гео–Сибирь. — 2018. — Т.5. — С. 74–79.
17. Ряшенцев, Н.П. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин / Н.П. Ряшенцев, А.Н. Мирошниченко. — Новосибирск: Наука, 1987. — 160 с.
18. Кордубайло, А.О. Исследование компрессионно-вакуумного сопротивления движению бойка ударного узла скважинного виброисточника / А.О. Кордубайло, А.Ю. Примычкин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — №3. — С.137–142.
19. Кордубайло А.О. Увеличение эффективности волнового воздействия на нефтяной пласт скважинным сейсмоисточником / А.О. Кордубайло // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — №3. — С.137–142.

© А. О. Кордубайло, Б. Ф. Симонов, 2021

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШАХТНОГО ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА ПРИ РАБОТЕ В РЕВЕРСИВНОМ РЕЖИМЕ

Павел Владимирович Косых

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091 Россия, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 54, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, т. +7 (383) 205–30–30, p.kosykh@yahoo.com

В статье описан порядок определения приближённой аэродинамической характеристики вентилятора, работающего в реверсивном режиме с обратным направлением вращения рабочего колеса и развёрнутым положением лопаток спрямляющего аппарата. Для расчёта аэродинамической характеристики использованы результаты вычислительного моделирования обтекания плоской решётки, составленной из профилей лопаток вентилятора. Для проверки адекватности применяемых расчётных моделей проведены сравнения углов отклонения потока и потерь полного давления при обтекании плоских решёток в прямом режиме, составленных из профилей NACA65, с известными экспериментальными данными. На примере вентилятора, выполненного по схеме ЦАГИ ОВ-103, с известной экспериментально полученной аэродинамической характеристикой реверсивного режима, рассчитаны углы отклонения реверсивного потока в решётке на среднем радиусе и потери полного давления в ней. Полученные данные использованы для расчёта значений коэффициента полного давления вентилятора в зависимости от коэффициента расхода воздуха, протекающего через вентилятор. В полученных характеристиках значение максимального коэффициента расхода получилось большим, чем в экспериментальных. Однако при этом оно ближе к полученным экспериментально, чем рассчитываемые по известным теоретическим характеристикам плоских решёток.

Ключевые слова: вентилятор главного проветривания, осевой реверсивный вентилятор, аэродинамическая характеристика вентилятора

DETERMINING THE AERODYNAMIC CHARACTERISTIC OF A MINE AXIAL FAN WHEN OPERATING IN REVERSIBLE MODE

Pavel V. Kosykh

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher, office: +7 (383) 205–30–30, e-mail: p.kosykh@yahoo.com

This paper describes the procedure for determining the approximate aerodynamic characteristics of a fan operating in a reversible mode with the reverse direction of impeller rotation and deployed position of the straightener blades. To calculate the aerodynamic characteristic, the results of computational modeling of the flow around a flat cascade of airfoil blades were used. To check the adequacy of the applied design models, the comparison of flow deflection angles and total pressure losses when flowing around flat cascades composed of NACA65 airfoils in the direct mode and the known experimental data was made. Using the example of a OV-103 fan made according to the design of Central Institute of Aerohydrodynamics, with the known experimentally obtained aerodynamic characteristic of the reversible mode, the angles of reverse flow deflection in a cascade at the middle radius and total pressure loss in it were calculated. The obtained data were used to calculate the values of the coefficient of total fan pressure depending on the flow rate of air flowing through the fan. The obtained characteristics showed the value of maximum air flow rate higher than in the experimental characteristics. But in this case, it is closer to experimentally obtained data than the value calculated from the known theoretical characteristics of flat cascades.

Keywords: main fan, axial reversible fan, aerodynamic characteristic

Введение

Согласно нормам безопасности, вентилятор главного проветривания, работающий в шахте или руднике в реверсивном режиме работы должен обеспечивать подачу воздуха, составляющую как минимум 60% от объёма, подаваемого им в прямом режиме [1]. Технически самым простым способом реверсирования осевого вентилятора является перемена направления вращения рабочего колеса с разворотом лопаток аппаратов в реверсивное положение. Такой способ широко применяется для реверсирования шахтных и тоннельных осевых вентиляторов главного проветривания. Для этого не требуется специальных механизмов или устройств реверсирования, однако при этом зачастую значительно снижается КПД вентилятора. Кроме того, таким способом реверсируются струйные осевые вентиляторы [2].

При создании аэродинамической схемы осевого вентилятора для повышения его реверсивного качества прибегают к специальным мерам. Для проектируемых реверсивных вентиляторов могут применяться лопатки с определенной формой средней линии профиля (например, S-образные лопатки [3, 4]), симметричные профили [5, 6], профили с уменьшенным изгибом средней линии [7].

Уменьшение изгиба средней линии профиля лопатки сопряжено с увеличением углов атаки в рабочей точке в прямом режиме, что может приводить к уменьшению КПД вентилятора в ней. Однако при этом он позволяет уменьшить потери давления и увеличить углы отклонения потока в решётке профилей при реверсировании, поскольку известно ([7, 8]), что в реверсивном режиме большие углы атаки и несоответствие направления поворота потока изгибу профилей являются главными причинами больших потерь давления в такой решётке.

При создании аэродинамической схемы шахтного осевого вентилятора, от которого реверсивная работа требуется только в случае аварийного режима, и реверсируемого обратным направлением вращения рабочего колеса, необходимо стремиться к обеспечению максимального КПД в рабочей области при обеспечении требуемого минимума расхода в реверсивном режиме работы. Не лишено смысла ещё на этапе проектирования аэродинамической схемы такого вентилятора определять параметры его реверсивной характеристики. Известный метод [7] оценки реверсивных качеств решёток профилей аэродинамических схем состоит в определении теоретических характеристик решёток (углов отклонения потока) по известным [9] аналитическим зависимостям. Для этого диффузорную решётку рабочего колеса при реверсивном обтекании рассматривают как конфузорную, работающую, однако, в вентиляторном режиме, и принимают, что зависимость угла отклонения потока в такой решётке линейна и такая же, как и для конфузорного режима. При этом рассматривают решётку на среднем радиусе вентилятора, делящим проточную часть на два кольца равной площади. Осевые скорости потока во всех сечениях принимают равными осредненной по расходу.

Проблема такого метода в том, что он не позволяет учесть потери полного давления в решётке, которые достигают значительных величин. В [7] приводятся данные, что коэффициент силы лобового сопротивления профиля в решётке при

реверсивном режиме обтекания более, чем в 5 раз превосходит таковой в прямом режиме. Современные численные методы решения задач аэродинамики позволяют определять углы поворота потока в решётках и потери давления в ней с высокой точностью [10]. В некоторых методах возможен учёт шероховатости поверхности [11]. В связи с этим представляется интересным использовать численные методы для вычисления углов отклонения потока в плоской решётке профилей и потерь давления в ней при обтекании в реверсивном режиме (т.е. со стороны острой кромки), с последующим использованием этих данных для оценки полного давления вентилятора в реверсивном режиме.

Методы и материалы

Рассмотрим задачу обтекания плоской решётки, обтекаемой в нормальном режиме, составленную из профилей типа NACA 65, для которых имеются обширные экспериментальные данные, полученные на основании продувок [12]. Особенностью этих испытаний являлось то, что решётка обдувалась с определённого угла входа потока β_1 , при этом угол атаки менялся изменением угла установки профилей. В результате для широкого ряда решёток разных густот и кривизн средних линий их профилей, были получены, в частности, графики углов отклонения потока в решётке и коэффициентов лобового сопротивления в зависимости от углов атаки.

В программе Ansys Fluent были составлены конечно-объёмные сетки участка плоской решётки, содержащего один профиль NACA 65 (рис.1). На верхнюю и нижнюю границы участка накладывались периодические граничные условия. Поток протекал от правой границе участка к левой. Число Рейнольдса составляло $2,45 \cdot 10^5$, рассчитанного по длине хорды лопатки. Расчёт проводился для ряда профилей NACA 65 различных кривизн в решётках с различными густотами.

В расчётах применялись различные модели турбулентности, а именно модель Спаларта – Аллмареса, k- ϵ модель, SST модель Ментера. Следует отметить, что для каждой модели турбулентности требования к качеству пристеночного слоя, характеризуемой параметром y^+ , различны [13, 14], поэтому для каждой модели сетка строилась с учётом этих требований, и в ходе вычислений контролировалось значение параметра y^+ .



Рис. 1. Участок решётки с профилем NACA 65-010 с контрольными объёмами

С учётом полученных результатов и сравнения их с экспериментальными данными, была составлена модель для расчёта параметров обтекания плоских решёток, составленных из профилей вентилятора аэродинамической схемы ЦАГИ ОВ-103, работающих в реверсивном режиме. Эта схема является одной из тех, которые были разработаны в ЦАГИ для реверсивных вентиляторов [15]. При их создании принимались меры для повышения реверсивных качеств, и, поскольку они изначально задумывались как реверсируемые обратным вращением рабочего колеса, для них были измерены аэродинамические характеристики реверсивного режима работы.

Рассматриваемая схема ОВ-103 имеет рабочее колесо (РК) с 10-ю лопатками ($z_K = 10$), которые могут иметь разный угол установки θ_K . В справочной литературе приводятся характеристики реверсивного режима работы для углов установки (угол между плоскостью вращения вентилятора и касательной к нижней поверхности профиля) 15° , 25° и 35° . Вентилятор может быть снабжён спрямляющим аппаратом (СА) с 14-ю лопатками ($z_{CA} = 14$), которые в режиме реверса разворачиваются на такой угол θ_{CA} , что СА начинает работать как направляющий аппарат (НА).

КПД вентилятора в реверсивном режиме работы низкий и не превышает 35%, однако при этом максимальный расход, который может дать вентилятор, при нулевом полном давлении, превышает таковой в прямом режиме. В первую очередь, как отмечается в [7], наибольшие потери и низкий КПД в реверсивном режиме связаны с работой профилей на больших углах атаки на входе в решётку, при этом направление поворота потока не совпадает с направлением изгиба средней линии профиля. В меньшей степени низкий КПД связан с наличием острой кромки профиля на входе потока, а также с работой лопаток РК и СА с непостоянной циркуляцией по радиусу.

В Ansys была составлена расчётная схема для плоской решётки, составленной из профилей на среднем радиусе РК ОВ-103 (рис. 3.а). Для того, чтобы оценить влияние острой кромки, направленной навстречу потоку, на качество расчёта, была также составлена расчётная модель с профилем, имеющим такой же угол установки, относительную толщину и прогиб средней линии, но инвертированным по длине средней линии, т.е. с гладкой кромкой на входе (рис. 3.б).

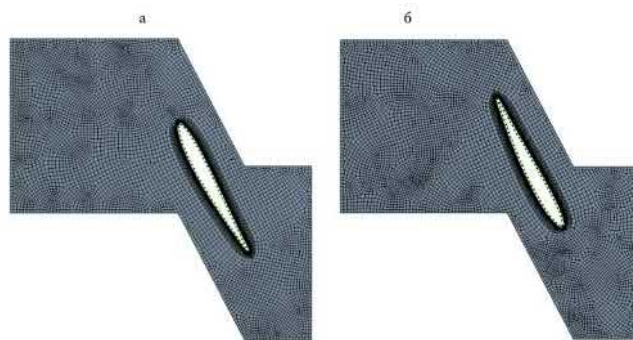


Рис. 2. Участок решётки с профилем лопатки К-103 на среднем радиусе:
а – профиль с входом потока со стороны острой кромки (реверсивный режим);
б – решётка с инвертированным профилем с входом потока со стороны гладкой кромки

Результаты

В результате расчёта углов отклонения для решёток, составленных из профилей NASA, были получены значения углов поворота потока $\Delta\beta$ в зависимости от угла атаки α_1 . На рис. 3 приведены сравнение графиков, полученных с использованием разных моделей турбулентности, с экспериментальным, для профиля NASA 65-010 нулевой кривизны с густотой τ , равной 1.

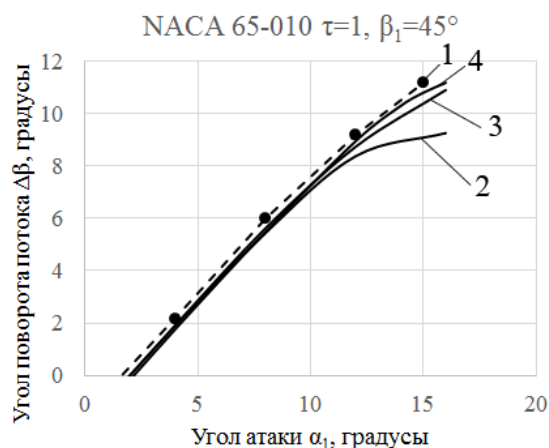


Рис. 3. Зависимость угла поворота потока от угла атаки в решётке профилей NASA65-010 с густотой $\tau = 1$, углом входа потока $\beta_1 = 45^\circ$:

1 – экспериментальные данные, 2 – модель Спаларта - Аллмареса, 3 – k-ε модель, 4 – SST-модель

Как видно из представленных графиков, наилучшее приближение к эксперименту обеспечивает SST-модель турбулентности. На линейном участке изменения угла поворота от угла атаки все модели показали приемлемый результат. По мере увеличения угла атаки и развития срыва в решётке лучший результат дала SST-модель турбулентности, однако и она в некоторых случаях недостаточно надёжно предсказывала угол отклонения. В последующих расчётах именно эта модель турбулентности применялась для вычисления параметров обтекания решёток ОВ-103.

Далее для параметров потока и характеристики вентилятора будут употребляться обозначения, принятые в [7]. В ходе расчёта реверсивных качеств решётки профилей ОВ-103 определялись углы выхода потока β_2 и потери полного давления ζ в решётке в зависимости от угла входа β_1 (рис. 4). Расчёт показал, что при небольшом отрицательном угле поворота потока ($\beta_2 - \beta_1$) потери полного давления минимальны и составляют менее 2% от давления на входе в решётку. При этом диффузорный режим обтекания ($\beta_2 > \beta_1$) сопровождается большими, чем в конфузорном режиме, потерями давления.

Решётка с инвертированным профилем обтекает с меньшими потерями ($\zeta_{\min} < 1,5\%$). При этом углы поворота потока в решётке из таких профилей меньше, чем в решётке с профилем, развернутым острой кромкой к потоку.

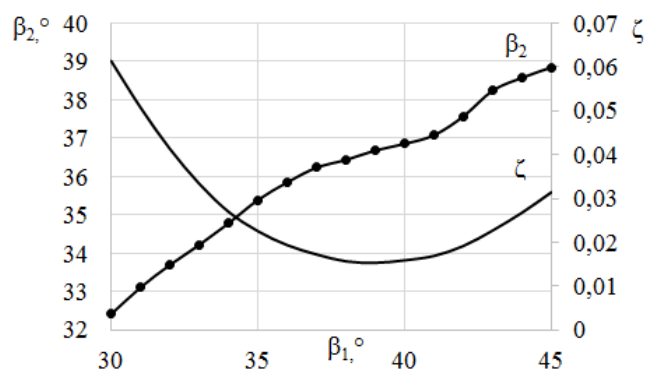


Рис. 4. Зависимости угла выхода потока β_2 и коэффициента потерь полного давления ζ для решётки из профилей ОВ-103 на среднем радиусе от угла входа потока β_1

Полученные зависимости можно использовать для оценки давления, создаваемого вентилятором. Коэффициент теоретического давления ψ_T можно определить по известной формуле Эйлера [16]:

$$\psi_T = 2\bar{r}\varphi_a(\operatorname{ctg}\beta_1 - \operatorname{ctg}\beta_2)$$

Здесь $\bar{r} = \sqrt{(1-v^2)}/2$ – относительный средний радиус вентилятора, v – втулочное отношение, φ_a – коэффициент среднерасходной скорости потока. При этом угол входа потока можно связать с φ_a как

$$\varphi_a = \bar{r} / (\operatorname{ctg}\beta_1 + \operatorname{ctg}\delta_1),$$

где δ_1 – угол выхода потока из СА, работающего в реверсивном режиме как НА.

Для того, чтобы найти зависимость коэффициента давления от коэффициента расхода φ , необходимо выразить последний через φ_a :

$$\varphi = \varphi_a(1-v^2).$$

Учесть потери полного давления в решётке можно, умножив оставшуюся долю полного давления на коэффициент теоретического давления, определив, таким образом, коэффициент давления ψ :

$$\psi = (1-\zeta)\psi_T.$$

С использованием приведённых формул были рассчитаны аэродинамические характеристики схемы ОВ-103 (рис.5, рис.6). Для схемы с СА угол выхода потока δ_1 из него на среднем радиусе был рассчитан по теоретическим зависимостям и составил 114° .

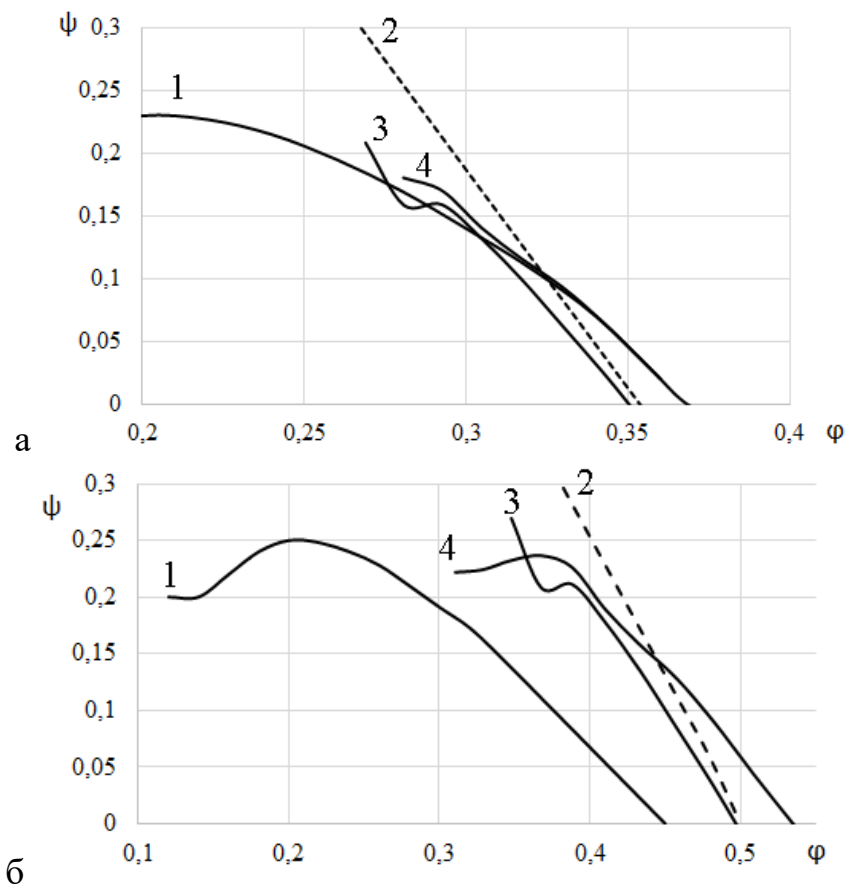


Рис. 5. Аэродинамические характеристики реверсивного режима схемы ОВ-103
а – без СА, б - с СА. $\theta_K = 35^\circ$, $\theta_{CA} = 100^\circ$, $z_K = 10$; $z_{CA} = 15$. 1 – экспериментальная;
2 – теоретическая; 3 – рассчитанная по вычисленным углам отклонения в решётке
с закруглённой кромкой на входе; 4 – рассчитанная по вычисленным углам откло-
нения в решётке с острой кромкой на входе

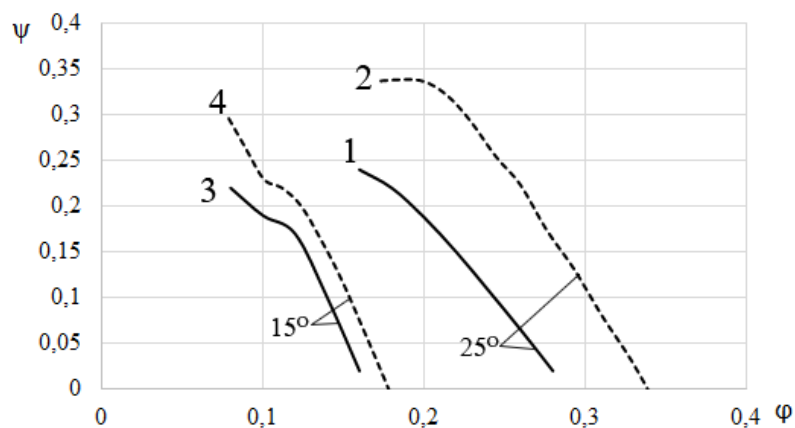


Рис. 6. Аэродинамические характеристики реверсивного режима схемы ОВ-103 с
СА

1 – экспериментальная характеристика при угле установки лопаток РК 25° , 2 – рас-
счётная характеристика при угле установки лопаток РК 25° , 3 - экспериментальная
характеристика при угле установки лопаток РК 15° , 4 – расчётная характеристика
при угле установки лопаток РК 15°

Обсуждение

Аэродинамическая характеристика, рассчитанная по вычисленным параметрам потока, обтекающего плоские решётки, составленные из профилей РК на среднем радиусе для схемы ОВ-103, которая состоит из одного колеса, для угла установки лопаток 35° (рис.5а, кривая 4) получилась достаточно близкой к экспериментальной (рис.5а, кривая 1). Величина максимального расхода совпала с высокой точностью (разница составила менее 5%). Однако при этом полученная характеристика не может быть использована для предсказания точки максимального давления вентилятора. На рис.5а показана также характеристика, рассчитанная по параметрам потока в решётке, составленной из инвертированных профилей (кривая 3). Максимальный расход по этой характеристике меньше, чем экспериментальный. При этом он близок к получаемому по теоретическим зависимостям угла поворота потока в решётке (кривая 2).

Для схемы с СА полученные характеристики обладают большим максимальным расходом, чем экспериментальный. Это можно объяснить тем, что потери давления в потоке на радиусах, отличных от среднего, велики из-за увеличенных спрямляющим аппаратом углов атаки, при этом они не учитываются при расчёте по параметрам на среднем радиусе.

Заключение

По результатам расчёта в программе ANSYS углов отклонения потока в плоской решётке, составленной из профилей NACA 65, и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, показано, что наилучшим из рассмотренных является расчёт с применением SST модели турбулентности Ментера с 4-мя уравнениями.

В программе ANSYS Fluent вычислены углы отклонения и потери полного давления в плоской решётке, составленной из профилей лопаток рабочего колеса вентилятора ОВ-103 на среднем радиусе. По этим данным построены аэродинамические характеристики реверсивного режима. В случае вентилятора, не имеющего СА, максимально развиваемый расход на такой характеристике получился таким же (разница составила менее 5%), как и экспериментально измеренный. Для схемы с СА получаемый таким образом расход имеет большую величину, чем экспериментальный.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научной темы FWNZ-2021-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила безопасности в угольных шахтах: ПБ 05-618-03. – М.: Недра, 2004. – 296 с.
2. Benišek, M.H.; Čantrak, Đ.S.; Ilić, D.B.; Janković, N.Z. New Design of the Reversible Jet Fan. Processes 2020, 8, 1671. <https://doi.org/10.3390/pr8121671>
3. Московко Ю.Г. Методика проектирования и разработка энергоэффективных осевых вентиляторов с профилями лопаток специальной формы: Диссертация кандидата технических наук — СПб., 2011. – 134 с.

4. Грехнёва Е.Ю. Разработка аэродинамических схем с s-образными лопатками рабочих колес для реверсивных, неповоротно-лопастных осевых вентиляторов: Диссертация кандидата технических наук — Новосибирск., 2012. — 132 с.
5. A. Benazza, E. Blanco, M. Abidat. 2D Detached-Eddy Simulation Around Elliptic Airfoil at High Reynolds Number. Journal of Applied Sciences. 7. 10.3923/jas.2007.547.552.
6. Ивановский И.Г. Шахтные вентиляторы: Учебное пособие. — Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. — 196 с.
7. Брусиловский И.В., Аэродинамический расчет осевых вентиляторов. — М.: Машиностроение, 1986. — 288 с.
8. Левин Е.М. Эффективность реверсирования шахтных осевых вентиляторов изменением направления вращения. — Научные труды. М.: Изд-во Московского института радиоэлектроники и горной электромеханики, 1962 — с.125 - 135
9. Ушаков К.А., Брусиловский И.В, Бушель А.Р. Аэродинамика осевых вентиляторов и элементы их конструкций. М: Госгортехиздат, 1960. — 422 с.
10. Терещенко Ю.М., Дорошенко Е.В., Дж. Аболлхассан заде Моделирование течения в компрессорных решетках при больших углах атаки // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2015. - №4/8 (76) — с. 26-30
11. J. Joo, G. Medic, Om. P. Sharma Large-Eddy Simulation of Roughened NACA65 Compressor Cascade // Conference: ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition - June 2017. DOI:10.1115/GT2017-64889
12. Emery I.C. et al, Systematic Two-Dimensional Cascade Tests of NACA 65-Series Compressor Blades at Low Speeds. NACA Report 1368, 1958 — p.85
13. Батурин О.В., Батурин Н.В., Матвеев В.Н. Расчет течений жидкости и газа с помощью универсального программного комплекса Fluent. Учеб. Пособие. — Самара.: Изд-во Самар. гос. аэро-косм. Ун-та, 2009. — 151 с.
14. Гарбарук А. В. Современные подходы к моделированию турбулентности : учеб. пособие. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. — 234 с.
15. Брусиловский И.В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. М.: Недра, 1978 — 198 с.
16. Брусиловский И.В. Аэродинамика осевых вентиляторов. М.: Машиностроение, 1984 — 240 с.

© П. В. Косых, 2021

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ВЫВАЛОВ ПОРОД ФЕНОЛЬНЫМИ СМОЛАМИ

Андрей Анатольевич Красновский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 633091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383) 205-30-30 доп. 189, e-mail: visanta@ngs.ru

Сформулирована постановка задачи о нахождении напряженно-деформированного состояния крепи и окружающих выработку горных пород при забутовке пустот закрепного пространства фенольными смолами и проведено его математическое моделирование. Установлен характер распределения полей напряжений в крепи и породном массиве и их изменение в зависимости от геометрических размеров области, заполненной фенольными смолами, при различных граничных условиях. Показано, что применение фенольных смол способствует повышению устойчивости крепи, что дает возможность использовать разработанную технологию ликвидации обрушений горных пород в различных горно-геологических условиях. Обсуждаются результаты расчетов.

Ключевые слова: массив горных пород, выработка, крепь, напряженно-деформированное состояние, концентрация напряжений, неустойчивые породы, фенольные смолы

FEATURES OF STRESS-STRAIN STATE OF MINE SUPPORT WHEN FILLING ROCK FALLS WITH PHENOLIC RESINS

Andrey A. Krasnovsky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, office: + (383) 205-30-30 ext. 189, e-mail: visanta@ngs.ru

The problem of finding the stress-strain state of the mine support and surrounding rocks when filling the voids with phenolic resins has been formulated and its mathematical modeling has been carried out. The pattern of distribution of stress fields in mine support and rock mass and their change depending on the geometric dimensions of the area filled with phenolic resins have been determined under various boundary conditions. It is shown that the use of phenol resins contributes to an increase in mine support stability, which allows using the developed technology for the elimination of rock caving in different mining and geological conditions. The calculation results have been discussed.

Keywords: rock mass, working, mine support, stress-strain state, stress concentration, unstable rocks, phenolic resins

Введение

Для обеспечения высокопроизводительной, безопасной и экономичной выемки полезных ископаемых при возрастающих глубинах разработки месторождений необходимо совершенствовать технологию крепления горных выработок.

В сложных горно-геологических условиях (при неустойчивых породах) при повышенном напряженно-деформированном состоянии применение стандартных методов крепления с установкой тяжелых металлических рамных крепей приводит к их значительному деформированию, за счет обрушения пород кровли образуются «купола» довольно больших объемов, что приводит к аварийному состоянию горных выработок или необходимости проходки обгонных выработок. Часто размеры вывалов в кровле выработок превышают ее высоту, причем в ходе дальнейшей проходки процесс разрушения пород не ослабевает и делает невозможным ведение горных работ [1-4].

В этой связи актуальной практической задачей становится разработка оперативной и качественной технологии ликвидации вывалов. Перспективным направлением, позволяющим успешно решить возникающие вопросы, является технологии быстрого заполнения пустот, образовавшихся вследствие вывалов, вспенивающимися полимерными смолами. Так, для заполнения закрепных пустот и куполов в горных выработках при ведении подготовительных и очистных работ широкое распространение на шахтах Кузбасса получила технология заполнения пустот вспенивающейся смолой «Карбофил». Эффективным способом заполнения куполов является технология с применением фенольной или органоминеральной смолы. Такая технология апробирована в подготовительных выработках на Орловской шахте ТОО «Востокцветмет» [2]. Выполненные работы позволяют утверждать, что заполнение зоны вывалов пород в кровле выработки фенольными смолами обеспечивает их поддержание в рабочем состоянии, останавливает процесс дальнейшего вывалообразования в образовавшихся «куполах» и повышает устойчивость аварийных участков выработок. Установлено, что основными факторами, влияющим на напряженно-деформированное состояние (НДС) массива пород вокруг выработки являются параметры природного поля напряжений, характерные для месторождения и форма поперечного сечения выработки, а увеличение геометрических размеров выработки в процессе ее проходки на 5 – 15% (согласно действующей инструкции допускается отклонения на 10%) не оказывает влияние на НДС массива пород вокруг выработки. В качестве обоснованности выбора форм сечения выработок принят анализ практического опыта применения различных форм поперечного сечения выработок с учетом физико-механических свойств пород, их назначения в различных условиях проявления горного давления.

Для обоснования параметров технологии ликвидации обрушений горных пород с восстановлением и последующей проходкой выработок в сложных горно-геологических условиях необходима геомеханическая оценка напряженно-деформированного состояния массива, установление особенностей распределения напряжений в крепи и вмещающих породах при применении разработанных технологий и прогноз перераспределения напряжений при изменении горно-технических условий [5, 6].

Постановка задачи

Полное описание процесса деформирования горных пород в окрестности выработок, пройденных в неустойчивых породах с использованием технологии заполнения пустот обрушения вспенивающимися смолами, является сложной задачей.

На рис. 1 представлена схема нагружения металлической рамной крепи при плотном заполнении “купола” обрушения забутовочным материалом (фенольными смолами) [3].

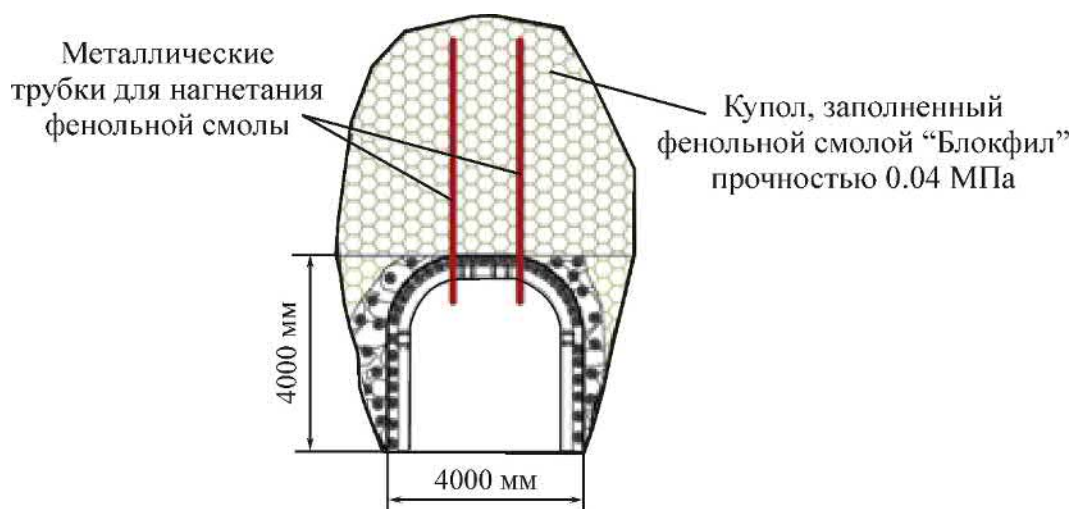


Рис. 1. Схема заполнения “купола” в кровле выработки забутовочным материалом (фенольной смолой “Блокфил” прочностью 0.04 МПа)

В работе рассмотрена наиболее простая ее постановка, позволяющая оценить важные особенности формирования напряженного состояния массива горных пород около выработки и в крепи в условиях гидростатического исходного поля напряжений.

В данном случае максимальные внешние силовые воздействия на крепь и забутовочный массив будут создаваться в условиях практически мгновенного их возведения за очистным забоем, т.е. при предотвращении разгрузки пород в окрестности забоя от исходных напряжений. Поэтому для оценки максимально возможных напряжений в горных породах и в крепи достаточно рассмотреть схему плоской деформации с заданием на внешнем контуре расчетной области усилий, соответствующих исходному напряженному состоянию массива горных пород.

На рис. 2 показана схема расчетной области с заданием граничных условий, соответствующих гидростатическому исходному полю напряжений ($\lambda = 1$), где 1 – металлическая рамная крепь; 2 – затяжка круглым лесом; 3 – забутовочный материал (фенольная смола); 4 – вмещающие породы; λ – коэффициент бокового распора, H – расстояние до земной поверхности, γ – удельный вес пород.

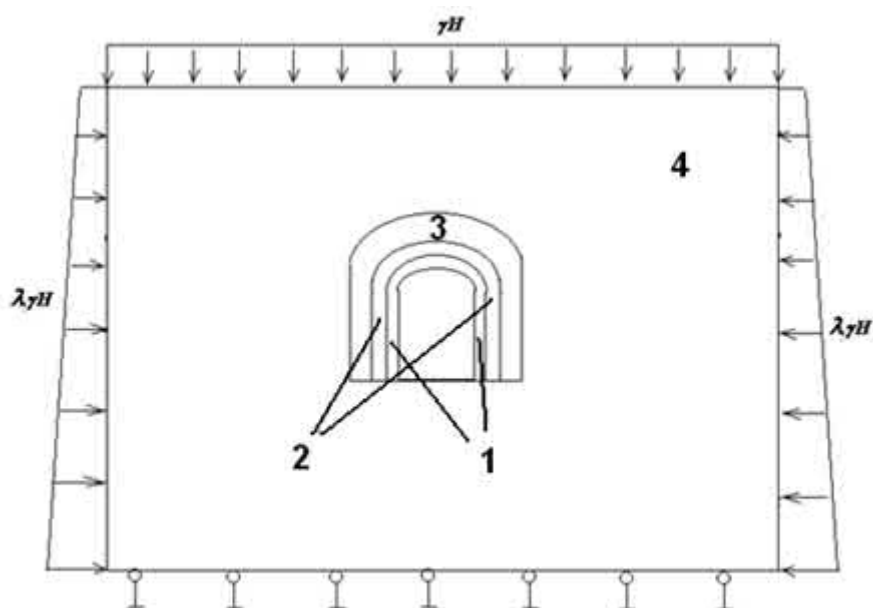


Рис. 2. Граничные условия в задаче расчета напряжено-деформированного состояния породного массива, металлической рамной крепи и забутовочного материала при заполнении закрепного пространства фенольной смолой в условиях гидростатического исходного поля напряжений

В работе, в качестве примера, приняты геометрические параметры выработки, металлической крепи, деревянной затяжки и областей, заполняемых фенольными смолами, соответствуют условиям отработки рудных месторождений Восточного Казахстана. Механические параметры деформируемых сред выбраны согласно экспериментальным данным, выполненным на рассматриваемых месторождениях [2, 3]. Геометрические размеры пустот в кровле и боках выработки при расчетах изменялись.

Методы и материалы

Зависимость между напряжениями и деформациями для всех материалов принята линейной. В этом случае для описания их напряжено-деформированного состояния достаточно двух механических характеристик материалов: модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν , значения которых в расчетах принимались следующими: для крепи $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$; для деревянной затяжки $E = 1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.02$; для вмещающих пород $E = 3 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0.2$. Деформирование фенольных смол также описывалось упругой моделью с низким значением модуля Юнга и коэффициентом Пуассона близким к значению 0.5. В этом случае механическое поведение материала близко к поведению несжимаемой среды. Такие механические характеристики для фенольных смол позволяют моделировать основную особенность их деформирования после затвердевания.

В расчетах было принято $E = 0.04 \text{ МПа}$, $\nu = 0.48$. В расчета задавались следующие значения удельного веса γ всех материалов: для крепи $\gamma = 7.85 \text{ т/м}^3$; для деревянной затяжки $\gamma = 0.6 \text{ т/м}^3$; для фенольной смолы $\gamma = 1.4 \text{ т/м}^3$; для вмещающих пород $\gamma = 3 \text{ т/м}^3$.

Напряженно-деформированное состояние в области расчета определялось методом конечных элементов с применением комплекса программ ANSYS. Область расчета разбивалась на конечные элементы. Явно выделялись границы между материалами с разными механическими свойствами, на которых принимались условия жесткого механического контакта [7, 8].

Для достоверности созданной конечно-элементной модели выполнен ряд тестовых расчетов. Сравнение с известными аналитическими и численными решениями показало хорошее соответствие. Расчеты показали сходимость решений, полученных на сетках с постепенно уменьшающимися размерами элементов.

Результаты

Общая картина распределения нормальных напряжений соответствует имеющимся представлениям о характере напряженного состояния пород вокруг выработок.

На рис. 3 приведены изолинии компонент напряжений σ_x и σ_y в крепи и во вмещающих породах при граничных условиях, соответствующих гидростатическому исходному полю напряжений, при высоте слоя смолы в кровле выработки 3 м.

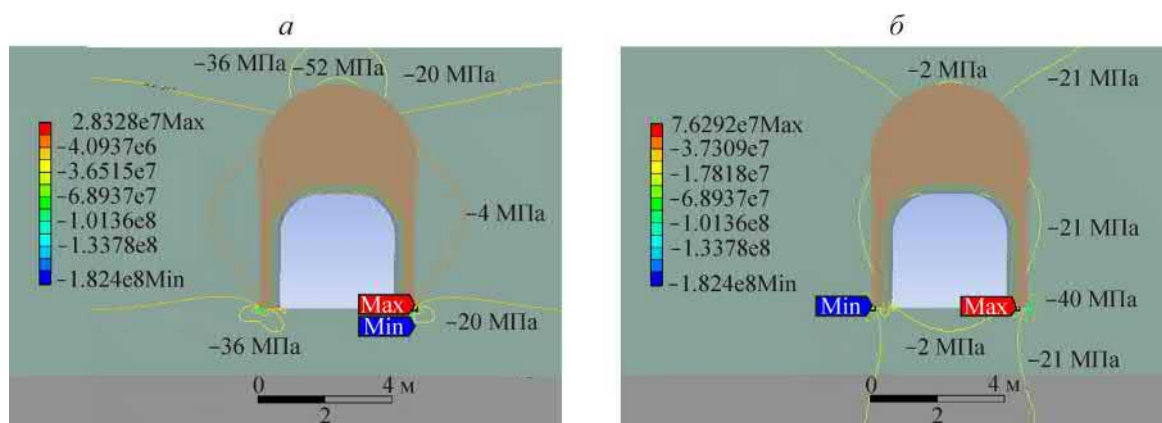


Рис. 3. Распределение горизонтальных и вертикальных напряжений в элементах крепи и во вмещающем массиве при высоте закрепного пространства в кровле 3 м в условиях действия гидростатического поля напряжений

Наличие вокруг выработки областей, заполненных фенольными смолами, приводит к значительным изменениям в распределении напряжений в крепи.

Максимальные значения компонент напряжений в сравнении с вариантом расчета при возведении крепи в выработке, пройденной в сплошном вмещающем массиве, существенно уменьшаются. Сжимающие напряжения в крепи уменьшаются в среднем в 5 раз. Наибольшей нагрузке подвержены ее верхняя часть (сжатие) и основание (растяжение). При этом величины максимальных растягивающих горизонтальных напряжений практически не меняются.

На рис. 4 представлены распределения нормальных компонент тензора напряжений σ_x и σ_y в крепи при высоте слоя фенольных смол в кровле 6 м при гидростатическом исходном поле напряжений.

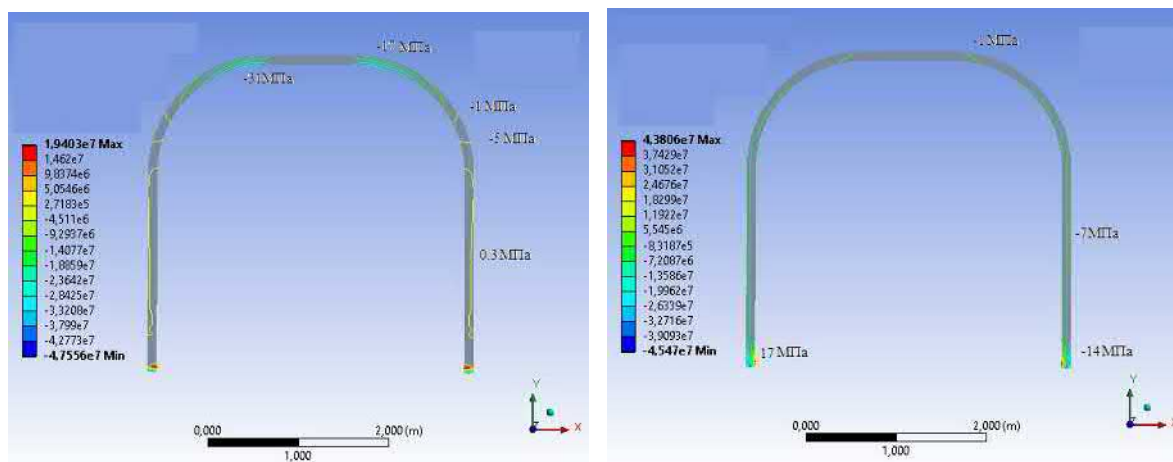


Рис. 4. Распределение горизонтальных и вертикальных напряжений в элементах крепи при высоте закрепного пространства в кровле 6 м при гидростатическом исходном поле напряжений

Анализируя характер распределения напряжений в окрестности закрепленной выработки при заполнении закрепного пространства фенольными смолами, установлено, что слой, выполненный из вспенивающегося материала прочностью 0.04 МПа, равномерно распределяет нагрузку по периметру рамной крепи и способствует повышению ее устойчивости.

Увеличение высоты заполняемого фенольными смолами закрепного пространства в кровле выработки приводит к росту нормальных напряжений в зонах их концентрации во вмещающем массиве. Вертикальные участки крепи находятся в состоянии изгиба, проявляющегося формированием зон растягивающих и нормальных напряжений по толщине крепи, арочные — в состоянии равномерного сжатия. По мере увеличения вертикального размера области, заполненной фенольными смолами, эти напряжения возрастают, причем зависимость практически линейная.

Выводы

Таким образом, сформулированная в работе постановка задачи определения напряженно-деформированного состояния крепи и породного массива вокруг выработки, пройденной в неустойчивых породах, при заполнении образовавшихся пустот фенольными смолами, позволила установить особенности его формирования в условиях действия гидростатического исходного поля напряжений. Выполнено его математическое моделирование. Проведен анализ полученных результатов. Установлен характер распределения полей напряжений в крепи и породном массиве и их изменение в зависимости от геометрических размеров области, заполненной фенольными смолами. Показано, что применение фенольных смол приводит к формированию равномерного давления окружающих пород на арочный участок крепи и способствует повышению ее устойчивости. Это дает возможность использовать разработанную технологию ликвидации обрушений горных пород в различных горно-геологических условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Якоби О. Практика управления горным давлением. // Пер. с нем. – М.: Недра. – 566 с.
2. Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н., Шапошник С.Н. // Опыт внедрения технологии заполнения "куполов" вспенивающимися смолами на шахтах ТОО "Востокцветмет" // Безопасность труда в промышленности, 2017. – № 7. – С. 38 – 43.
3. Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н., Шокарев Д.А., Шапошник С.Н., Конурин А.И. Совершенствование технологии крепления выработок на Артемьевской шахте ТОО «Востокцветмет» // ФТПРПИ, №6, 2017. – С. 140 – 148.
4. Ерёменко В.А., Лушников В.Н., Сэнди М.П., Милкин Д.А., Мильшин Е.А. Обоснование и выбор технологии проведения, способов крепления и поддержания горных выработок в неустойчивых горных породах Холбинского рудника // Горный журнал, 2013, №7. – С. 59 – 66.
5. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
6. Мартыненко И.И., Мартыненко И.А., Минакова Ж.А. Влияние заполнения закрепного пространства на работу крепи // ГИАБ, 2005. – С.160 – 163.
7. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М: Недра, 1987. – 224 с.
8. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. М: Недра, 1975. – 185 с.

REFERENCES

1. Jacobi O. Praktika upravleniya gornym davleniem. M: Nauka, 1987. – 566 s.
2. Krupnik L.A., Shaposhnik Ju.N., Shaposhnik S.N. // Opyt vnedrenija tehnologii zapolnenija "kupolov" vspenivajushhimisja smolami na shahtah TOO "Vostokcvetmet" // Bezopasnost' truda v promyshlennosti, 2017. – № 7. – S. 38 – 43.
3. Krupnik L.A., Shaposhnik Ju.N., Shokarev D.A., Shaposhnik S.N., Konurin A.I. Sovershenstvovanie tehnologii krepnenija vyrabotok na Artem'evskoj shahte TOO «Vostokcvetmet» // FTPRPI, №6, 2017. – S. 140 – 148.
4. Erjomenko V.A., Lushnikov V.N., Sjendi M.P., Milkin D.A., Mil'shin E.A. Obosnovanie i vybor tehnologii provedenija, sposobov krepnenija i podderzhaniya gornyh vyrabotok v neustojchivyh gornyh porodah Holbinskogo rudnika // Gornyj zhurnal, 2013, №7. – S. 59 – 66.
5. Borisov A.A. Mehanika gornyh porod i massivov. - M.: Nedra, 1980. – 360 s.

6. Martynenko I.I., Martynenko I.A., Minakova Zh.A. Vlijanie zapolnenija zakrepnogo prost-
ranstva na rabotu krepі // GIAB, 2005. – S.160 – 163.
7. Fadeev A.B. Metod konechnyh jelementov v geomehanike. M: Nedra, 1987, 224 s.
8. Amusin B.Z., Fadeev A.B. Metod konechnyh jelementov pri reshenii zadach gornoj geome-
haniki. M: Nedra, 1975. – 185 s.

© *A. A. Красновский*, 2021

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ САМОСВАЛОВ С КУЗОВОМ АКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Евгения Григорьевна Куликова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383) 205-30-30 доп. 169, e-mail: shevchyk@ngs.ru

Владимир Михайлович Усольцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383) 205-30-30 доп. 168

Приведен аналитический обзор существующих автосамосвалов с принудительной разгрузкой кузова, реализуемой с помощью гидравлических или механических устройств, встроенных в его конструкцию, а также за счет вибрационного воздействия автомобильных площадочных вибровозбудителей, закрепляемых на стенках кузова. Обоснована возможность использования транспортирующих устройств с упругим рабочим органом, разработанных в ИГД СО РАН, в качестве ложного днища кузова большегрузного автосамосвала и необходимость их оснащения самосинхронизирующимися инерционными вибровозбудителями. Приведены методика проведения и результаты экспериментальных исследований динамики упругих рабочих органов различной жесткости, оснащенных двумя дебалансными источниками колебаний. Установлены геометрические и динамические соотношения, обеспечивающие стабильность синхронного режима работы вибровозбудителей в условиях изменения технологической нагрузки на поверхность рабочего органа вследствие выпуска сыпучего материала из кузова. Экспериментально определена степень виброизоляции вибротранспортирующих устройств от несущей конструкции самосвала.

Ключевые слова: разгрузка кузова, упругий рабочий орган, дебалансный вибровозбудитель, самосинхронизация, устойчивость режима, длина волны, виброзащита

TO THE PROBLEM OF CREATING LARGE DUMP TRUCKS WITH ACTIVE BODIES

Evgeniya M. Kulikova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Researcher of Vibrotechnics Laboratory, office: +7 (383) 205-30-30 ext. 169, e-mail: shevchyk@ngs.ru

Vladimir M. Usol'tsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Researcher of Vibrotechnics Laboratory, office: +7 (383) 205-30-30 ext. 168

An analytical review of existing dump trucks with forced unloading of the body, implemented using hydraulic or mechanical devices built into its structure, as well as due to the vibration effect of automobile on-site vibration exciters fixed on the body walls, is given. The possibility of using the transporting devices with an elastic function element, developed at the Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, as a false bottom of the body of large dump truck and the need to equip them with self-synchronizing inertial vibration exciters has been

substantiated. The procedure and results of experimental studies of the dynamics of elastic function elements with different rigidity, equipped with two unbalanced vibration sources have been presented. Geometric and dynamic ratios that ensure the stability of synchronous operation of vibration exciters in conditions of a change in the technological load on the surface of a function element due to the release of bulk material from the body have been found. The degree of vibration isolation of vibrotransporting devices from the supporting structure of a dump truck has been experimentally determined.

Keywords: body unloading, elastic function element, unbalanced vibration exciter, self-synchronization, mode stability, wavelength, protection against vibration

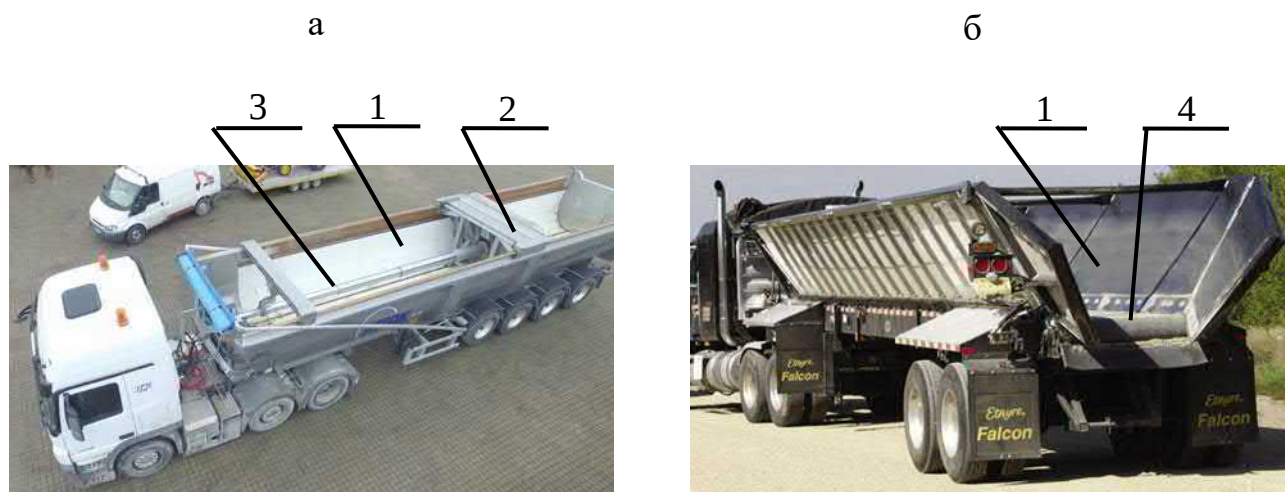
На протяжении долгого времени автомобильный транспорт остается основным средством доставки полезных ископаемых, добываемых как открытым, так и закрытым способом. Отработанная порода также перевозится к месту отсыпки с его помощью. В условиях роста объемов добычи горных пород увеличивается и грузоподъемность самосвалов, которая в настоящее время может превышать 450 т [1–7]. В связи с этим происходит не только модернизация системы управления автотранспортом, но и принципиальные изменения его конструкций, позволяющие облегчить выполнение рабочих операций, сократить их время и повысить безопасность работы большегрузных автосамосвалов.

В частности, уделяется внимание системе разгрузки кузова. Сыпучие материалы имеют различные физико-механические свойства (связность, липкость и т.д.) и в большом количестве способны слеживаться и уплотняться, а транспортировка в условиях пониженных температур способствует их смерзанию. Все это затрудняет разгрузку большегрузных самосвалов. Увеличение угла подъема кузова для активации перемещения сыпучего груза вызывает опасность потери устойчивости машины и повышенные требования к устойчивости гидроцилиндров и системы подъема груженого кузова. Поэтому наряду с традиционной выгрузкой за счет опрокидывания кузова назад применяются методы принудительной разгрузки.

К ним можно отнести горизонтальное выталкивание сыпучего материала из кузова с помощью подвижной задней стенки. Такой способ реализуется самосвалами датской компании MTDK [8]. Кузов этих машин представляет собой полуприцеп, работающий с серийными автомобилями (рис. 1,а). При заполнении и транспортировке сыпучего материала его задняя стенка находится в крайнем втянутом положении, а при разгрузке перемещается с постоянной скоростью вдоль всей длины кузова при помощи мощного гидроцилиндра. Это позволяет производить отсыпку без подъема кузова, и, следовательно, работать в стесненных условиях, в том числе при подземной добыче полезных ископаемых. При разгрузке в отвал такой способ разгрузки не вызывает смещение центра тяжести груженной машины, и не влияет на изменение ее устойчивости. Движение сыпучего материала идет с контролируемой скоростью. Таким образом машина может быть своеобразным питателем при перегрузке сыпучего материала. Кроме того, подвижная задняя стенка позволяет выполнить полный выпуск всего груза без

налипаний на стенки и дно кузова, несмотря на отсутствие наклона последнего. Однако, использование такого метода разгрузки на автосамосвалах грузоподъемностью более 100 тонн не рентабельно, так как требует применения дорогостоящих мощных гидроцилиндров, способных протолкнуть заднюю стенку на значительное расстояние, преодолевая сопротивления горной породы, находящейся на пути его действия.

Другим способом освобождения кузова является постепенное перемещение сыпучего груза к месту отсыпки с помощью конвейерного устройства, представляющего собой его ложное дно. Примером таких машин может быть самосвал компании Etnyre (США), кузов которого оснащен ленточным конвейером Falcon® (рис. 1,б) [9]. При такой разгрузке также не требуется наклонная поверхность, сыпучий материал перемещается с контролируемой скоростью, но сдвигающее воздействие оказывается на материал одновременно по всей длине кузова, благодаря чему выравниваются сопротивления его перемещению в направлении выгрузки. Материал движется равномерно. Кроме того, в сравнении с гидравлической системой управления использование ленточного конвейера требует меньших энергетических и экономических затрат. Однако конвейерная лента имеет низкую износостойкость, особенно при работе с горной массой, причем степень абразивного износа увеличивается с ухудшением погодных условий, для работы в которых предназначен самосвал.



а – МДТК (Дания), б – Etnyre (США)

1 – кузов; 2 – подвижная стенка; 3 – гидроцилиндр; 4 – конвейер

Рис. 1. Самосвалы с принудительной разгрузкой

Альтернативой является вибрационный способ воздействия на горную массу, ускоряющий процесс разгрузки. Например, специалисты Ярославского завода «Красный маяк» предлагают автомобильные вибраторы [10], закрепляемые на днище кузова со стороны рамы шасси и приводимые от бортовой сети автомобиля. Конструктивно они представляют собой дебалансные вибровозбудители,

создающие колебания кузова за счет центробежной силы вращения дебалансов. При всей простоте конструкции, монтажа и использования, создание колебаний всего кузова и находящейся в нем горной породы с амплитудой, достаточной для ее выпуска, требует значительных затрат мощности. Кроме того, такие колебания будут передаваться на элементы крепления кузова к шасси и его гидравлическую систему управления поворотом, вызывая дополнительные динамические нагрузки и ускоряющие их износ.

Альтернативой может быть оснащение дна кузова ложным днищем в виде нескольких вибрационных транспортирующих устройств с упругим рабочим органом (рис. 2), разработанных в ИГД СО РАН и используемых к конструкции передвижного гидрофицированного вибрационного отвалообразователя [11–17].



1 – кузов; 2 – вибрационное транспортирующее устройство;
3 – несущая рама; 4 – гидроцилиндр подъема-опускания кузова

Рис. 2. Кузов с вибрационной разгрузкой

Такие транспортирующие устройства отличаются малой металлоемкостью, простотой конструкции и монтажа, возможностью реализации различных режимов вибротранспортирования в зависимости от физико-механических свойств перегружаемого материала. Использование его в конструкции самосвала позволяет уменьшить энергозатраты на создание колебаний выгружаемого сыпучего материала, и снизить передачу вибрации на все элементы самосвала, так как вибровозбудители передают вибрацию не на весь кузов, а только на его дно.

При этом каждый упругий рабочий орган должен укладываться в подготовленных пазах металлоконструкции кузова и закрепляться по торцам, представляя собой элемент днища. Элементы крепления должны, с одной стороны, удерживать рабочий орган от смещения, а, с другой стороны, – не оказывать влияние на

распространение колебаний, создаваемых инерционным вибровозбудителем, вдоль транспортирующей поверхности. Выравнивание вибрационного поля достигается с помощью двух дебалансных вибровозбудителей, способность которых к самосинхронизации позволяет достигнуть желаемого результата с минимальными затратами и без усложнения конструкции [18 – 23].

Для проверки стабильности синхронного режима вращения дебалансов вибровозбудителей в условиях переменной нагрузки, и определения вибропередачи от упругого рабочего органа на несущую металлоконструкцию была проведена серия лабораторных экспериментов на стендах, включающих в себя идентичные модели вибротранспортирующих устройств (рис. 3) с жесткостями грузонесущих органов EI , равными 154, 875 и 55000 Н×м².



1 – рабочий орган; 2 – инерционный вибровозбудитель; 3 – рама;
4, 5 – вертикальный и упругий опорный элемент соответственно

Рис. 3. Вибрационное транспортирующее устройство

Вынуждающая сила источников колебаний P_A принималась равной 4,0 кН для создания вибрации рабочих органов жесткостью 154 и 875 Н×м² и 10,0 кН – для работы с грузонесущим органом жесткостью 55000 Н×м².

В качестве сыпучего материала использовалась супесь влажностью 4 – 8 %. Ее погонный вес принимался равным $q = 1,23, 2,04, 2,86, 3,68$ или 4,46 кН/м.

С помощью комплекта виброизмерительной аппаратуры измерялась скорость колебаний транспортирующей поверхности на участках закрепления вибровозбудителей, рамы и опорных элементов. Рассогласование парциальных виброисточников определялось априорно по осциллограммам изменения

виброскорости. При этом допускаемым рассогласованием Δf считалось такое, при котором синхронный режим работы вибровозбудителей был устойчив. Кроме того, фиксировалось время выпуска мерного объема сыпучего материала при работе виброустройства в накопительной емкости.

В работе [18] указано, что наиболее устойчивый синхронный режим достигается при работе вибровозбудителей в противофазе. Однако экспериментально было установлено, что угол сдвига фаз зависит от нагрузки со стороны перемещаемого материала и жесткости грузонесущего органа (рис. 4), и может меняться в процессе выпуска.

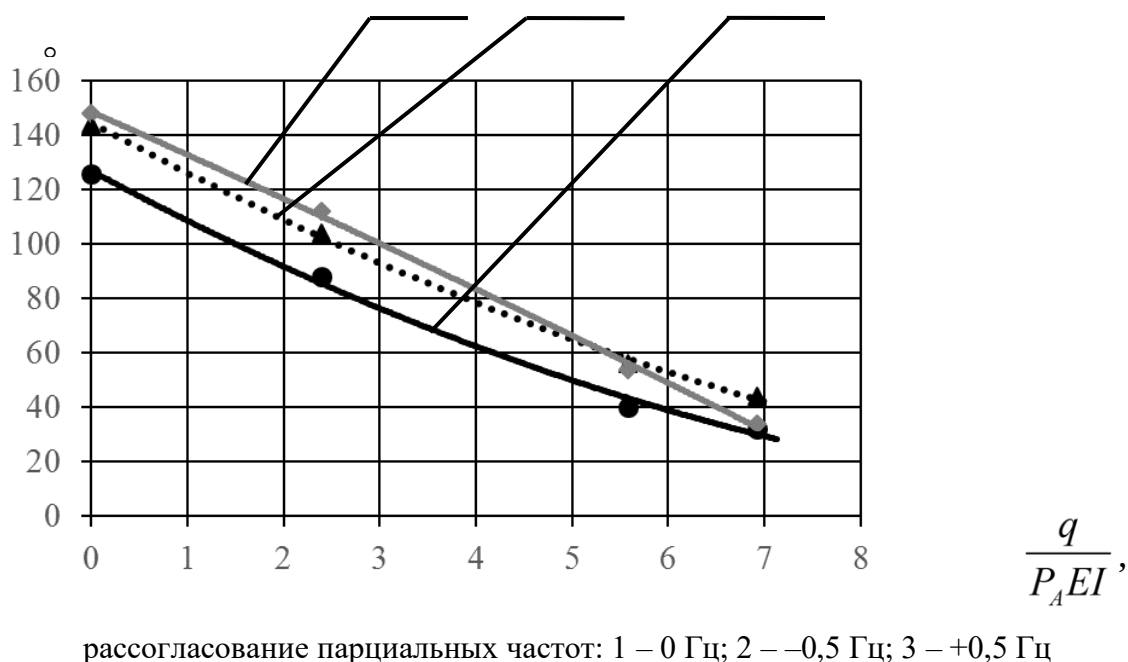


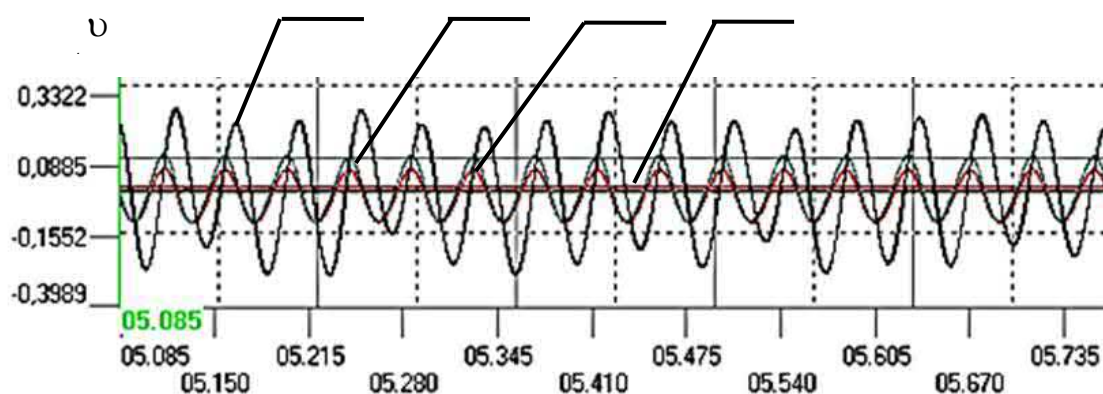
Рис. 4. Зависимость угла сдвига фаз вибровозбудителей в зависимости от амплитуды их вынуждающей силы P_A , погонного веса сыпучего материала q и жесткости рабочего органа EI

При этом степень влияния вибровозбудителей, установленных на основании малой жесткости, друг на друга зависит в основном от характера волнового движения последнего и степени затухания колебаний, передаваемых от одного виброисточника к месту закрепления другого. Стабильный режим работы на протяжении всего выпуска с частотой колебаний 49 – 50 Гц был получен при отношении $l/l_B = 0,5 – 0,6$ (l – расстояние между участками приложения вынуждающей силы), которое может считаться определяющим при проектировании вибро-транспортирующего устройства. В свою очередь наибольшее отношение погонного веса сыпучего материала к амплитуде вынуждающей силы, при котором

затухание колебаний не влияет на стабильность синхронного режима, составило $q/P_A = 0,6 - 0,7$.

Проверка стабильности синхронного режима работы виброисточников в условиях разгрузки кузова с помощью предлагаемых транспортирующих устройств была выполнена при выгрузке сыпучего материала из кузова экспериментального отвалообразователя грузоподъемностью 10 тонн. Результаты испытаний подтвердили эффективность предлагаемого конструктивного решения.

Определение степени передачи вибрации на элементы конструкции выполнялось на самой тяжелой модели вибротранспортирующего устройства с жесткостью рабочего органа $55000 \text{ Н} \times \text{м}^2$ (рис. 3). Полученные результаты показали, что амплитуда виброскорости рамы составляет не более 30% от амплитуды рабочего органа (рис. 5). Предполагается, что вследствие массивности кузова автомобиля этот показатель будет еще меньше, что значительно снизит динамическую нагрузку на его металлоконструкцию в сравнении с использованием автомобильных вибровозбудителей, закрепленных непосредственно на раме. В свою очередь на упругих элементах виброустройства, соответствующих элементам крепления кузова к шасси, вибрация практически отсутствует (кривая 4, рис. 5).



1 – рабочий орган; 2 – рама; 3, 4 – вертикальный и упругий опорный элемент соответственно

Рис. 5. Осциллограмма скорости колебаний элементов конструкции вибротранспортирующего устройства

ВЫВОДЫ

1. Использование вибротранспортирующих устройств с упругим рабочим органом в качестве ложного днища позволяет повысить эффективность, производительность и безопасность разгрузки кузовов большегрузных автомобилей.

2. Данное конструкторское решение проще и дешевле в сравнении с гидрофицированной подвижной стенкой кузова и надежнее в сравнении с днищем в виде ленточного конвейера.

3. Использование двух дебалансных самосинхронизирующихся вибровозбудителя в конструкции каждого вибротранспортера позволяет обеспечить равномерное вибрационное поле по всей площади днища кузова. При этом конструктивные и динамические параметры устройств подбираются такими, чтобы соблюдались экспериментально полученные отношения $l/l_v = 0,5 - 0,6$ (l – расстояние между участками приложения вынуждающей силы; l_v – длина изгибной волны, передаваемой от одного виброисточника к другому) и $q/P_A = 0,6 - 0,7$ (q – погонный вес сыпучего материала, P_A – амплитуда вынуждающей силы).

4. В результате физического моделирования установлено, что при колебаниях упругих рабочих органов вибрация практически не передается на шасси автомобиля, а амплитуда вибрации кузова составляет не более 30 % от амплитуды их колебаний.

Работа выполнена в рамках научного проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090003-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Интенсификация погрузочно-транспортных работ на карьерах / С. Г. Молотилев, Е. И. Васильев, О. Б. Кортелев и др. – Новосибирск: Из-во СО РАН, 2000. – 208 с.
2. БЕЛАЗ накануне 65-летия выпустил первый 450-тонный карьерный самосвал // Горная промышленность – 2013. – № 5 (111) – С. 7
3. Егоров А.Н., Насковец А.М., Мариев П.Л. Карьерный самосвал БЕЛАЗ-75710 грузоподъемностью 450 тонн // Актуальные вопросы машиноведения – 2013. – Т. 2. – С. 18–20
4. Левенсон С. Я., Гендлина Л. И., Морозов А. В., Усольцев В. М. Совершенствование процесса формирования автоотвалов при открытой разработке полезных ископаемых // ГИАБ – 2016. – № 1. – С. 96–105
5. Зенков И. В., Нефедов Б. Н., Барадулин И. М., Кирюшина Е. В. Современные тенденции и экологические проблемы в формировании и рекультивации породных отвалов при добыче угля открытым способом // Экология и промышленность России. – 2014. – № 6. – С. 22–25
6. Окунева А. Ю., Переверзева В. Ю. К вопросу о формировании отвалов вскрышных пород // Сб.: Образование, наука, производство VIII Международный молодежный форум. – 2016. – С.1207–1212
7. Левенсон С. Я., Гендлина Л. И., Морозов А. В., Усольцев В. М. Оборудование для безопасного формирования породных отвалов большегрузными автосамосвалами // Сб.: Перспективы инновационного развития угольных регионов России. Сборник трудов IV Международная научно-практическая конференция. – 2014. – С. 181–183
8. АМТ разработали самосвальный прицеп с горизонтальной разгрузкой [Электронный ресурс] // <http://interdalnoboy.com/2013/10/17/amt-razrabotali-samosvalnyjj-pricep-s-gorizontalnojj-razgruzkojj.html>
9. Live bottoms [Электронный ресурс] // <https://www.etnyre.com/live-bottoms/>
10. Автомобильные вибраторы // <https://vibrotrade.ru/catalog/ploshchadochnye-vibratory/avtomobilnye-vibratory-postoyannogo-toka/>
11. Патент на полезную модель № 88004 В65G27/00. Вибрационный отвалообразователь / Левенсон С. Я., Гендлина Л. И., Еременко Ю. И., Морозов А. В., Протасов С. И., Голдобин В. А. – 2009. – 2 с.

12. Патент на полезную модель № 121800 В65G27/00. Вибрационный отвалообразователь / Левенсон С. Я., Гендлина Л. И., Усольцев В. М., Голдобин В. А., Морозов А. В. – 2012.
13. Морозов А. В. Куликова Е. Г. Формирование автомобильных отвалов с использованием вибротехники // Труды XV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» - Томск, 2011. – Т.2. – С. 383–285
14. Тишков А. Я., Гендлина Л. И., Еременко Ю. И., Левенсон С. Я. Вибрационное воздействие на сыпучую среду при выпуске ее из емкости // ФТПРПИ – 2000. – № 1. – С. 55–60
15. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные и волновые транспортирующие машины. – М.: Наука, 1983.
16. Гендлина Л. И., Куликова Е. Г. О численном моделировании динамики вибрационного питателя для выпуска горной массы // ГИАБ – 2015. – № 11. – С.224–230
17. Тишков А. Я. Теория и практика создания машин для выпуска и доставки руды, основанных на принципе бегущей волны: Автореф. дис...докт. техн. наук / А. Я. Тишков; СО АН СССР. Совет секции по прочности материалов и технологии машиностроения Объед. учен. Совета по физ.-мат. и техн. наукам. — Новосибирск, 1974. — 28 с.
18. Блехман И. И. Синхронизация динамических систем – М.: «Наука» – 1971. – 894 с.
19. Блехман И. И., Васильков В. Б., Ярошевич Н. П. О некоторых возможностях совершенствования вибрационных машин с самосинхронизирующимися инерционными вибровозбудителями // Проблемы машиностроения и надежности машин – 2013. – № 3. – с.18–22
20. Нагаев Р.Ф., Шишкин Е.В. Самосинхронизация инерционных вибровозбудителей в вибрационной конусной дробилке // Обогащение руд. – 2003. – № 1. – С. 33–36
21. Ярошевич Т.С., Тимошук В.Н., Ярошевич Н.П. Динамическая синхронизация дебалансных вибровозбудителей с кратными частотами вращения // Вестник СевНТУ. – 2011. – № 120. С 228-233
22. Протасов С.И., Молотиллов С.Г., Левенсон С.Я., Гендлина Л.И. Результаты испытания вибрационного конвейера – Рукопись деп. В ЦНИЭИУголь, №1634. – Кемерово, 1979. – 9с.
23. Креймер В.И., Тишков А.Я. Колебания виброленты и их затухание по длине // ФТПРПИ – 1972. – № 3. – С. 111–115

© Е. Г. Куликова, В. М. Усольцев, 2021

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЩЕЛЕЙ-КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРИКОНТУРНОЙ ЗОНЕ СКВАЖИН В КРЕПКИХ ПОРОДАХ

Аркадий Васильевич Леонтьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383) 205-30-30 доп. 173, e-mail: leon@misd.ru

Екатерина Владимировна Рубцова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383) 205-30-30 доп. 174, e-mail: rubth@misd.ru

Показано, что в целях расширения области практического применения метода направленного измерительного гидроразрыва необходимо создание технических средств, обеспечивающих нарезание иницирующих щелей на стенках скважин в массивах горных пород различной прочности. Предложена новая конструкция щелеобразователя, отличительной особенностью которого является использование твердосплавных резцов, выдвигаемых в процессе нарезания щелей по нормали к оси устройства. Приведение устройства в рабочее состояние осуществляется за счет нормированного его перемещения с упором в забой скважины. Габаритные размеры щелеобразователя позволяют использовать его в скважинах алмазного бурения калибра 76 мм. Устройство предназначено для создания щелей-концентраторов напряжений в приконтурной зоне скважин в крепких породах с коэффициентом 5–8 по шкале М.М. Протоdjeяконова.

Ключевые слова: скважина, приконтурная зона, измерительный гидроразрыв, щелеобразователь, крепкие породы, твердосплавный резец

DEVICE FOR CREATING SLOTS-VOLTAGE CONCENTRATORS IN THE BOUNDARY AREA OF WELLS IN FINE ROCKS

Arkady V. Leont'ev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Doctor of Engineering Sciences, Principal Researcher, Mining Information Science Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 173, e-mail: leon@misd.ru

Ekaterina V. Rubtsova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Mining Information Science Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 174, e-mail: rubth@misd.ru

It is shown that in order to expand the field of practical application of directional measuring hydraulic fracturing, it is necessary to create technical means that provide cutting of initiating slots on the walls of boreholes in rock masses of different strength. A new slotter design is proposed, the distinctive feature of which is using carbide cutters that are extended during cutting slots along the normal to the device axis. The device is brought into operation due to its normalized movement tagging the bottom. The slotter dimensions allow using it in diamond drill holes of 76 mm diameter. The device is designed to create stress concentrator slots in adjoining zones of boreholes in hard rocks with a coefficient of 5–8 according to M. M. Protodyakonov's scale.

Keywords: borehole, adjoining zone, measuring hydraulic fracturing, slotter, hard rocks, carbide cutter

В мировой практике геомеханических исследований значительная роль отводится экспериментальному определению напряжений, действующих в массиве горных пород, и их изменениям в процессе добычи полезных ископаемых. К настоящему времени предложено порядка двадцати методов контроля напряжений в натурных условиях [1, 2]. К числу наиболее активно развиваемых в последние годы относится метод измерительного гидроразрыва [3-13]. Реализация метода возможна в трех вариантах: как гидроразрыв добротной (без трещин) скважины (HF), как гидравлический тест скважины с существующей трещиной природного характера (HTRF), а также в варианте направленного гидроразрыва, когда на стенках скважины искусственно создаются инициирующие щели с определенной ориентацией [5, 14-17]. Наиболее перспективными являются способы расчета компонент действующих в массиве напряжений по данным направленного гидроразрыва в разноориентированных скважинах [18, 19].

Технология проведения тестов направленного гидроразрыва включает бурение скважины на глубину до 10 – 12 метров, нарезание инициирующей щели на выбранном участке скважины, герметизацию этого участка специальным пакерным устройством (зондом) с последующим нагнетанием рабочего флюида в межпакерное пространство вплоть до достижения разрыва породы. Предполагается, что если изолированный участок скважины содержит заранее выполненную продольную или поперечную щель-концентратор напряжений, трещина гидравлического разрыва на небольшом расстоянии от поверхности скважины сохраняет заданное направление. При этом процедура интерпретации экспериментальных данных существенно упрощается.

К настоящему времени опыт практического применения направленного гидроразрыва при исследовании полей напряжений в нетронутом массиве на отечественных горно-рудных предприятиях достаточно ограничен. Одним из вопросов, который требует особого внимания, является создание щелеобразователей, обеспечивающих реализацию метода направленного измерительного гидроразрыва в породах различной прочности.

Выполненный обзор способов и оборудования для формирования щелей-концентраторов напряжений в стенках скважин показал, что основное внимание разработчиков сосредоточено на создании устройств для технологий направленного гидроразрыва в целях дегазации, разупрочнения горного массива, а также для повышения продуктивности скважин при термошахтной добыче тяжелой нефти [20]. Устройства, прошедшие испытания в шахтных условиях, предназначены для применения только в породах мягких и средней прочности [21].

Для выполнения направленного измерительного гидроразрыва в ИГД СО РАН разработан щелеобразователь, обеспечивающий нарезание поперечных инициирующих щелей в соляном массиве. Устройство было успешно использовано в экспериментах на калийных рудниках Верхнекамского месторождения [22]. Инициирующие щели выполнялись в вертикальных скважинах диаметром 76 мм на глубине порядка 10 м от контура подземной выработки. Прочность породы на разрыв в местах

испытания составляла 2.5-3.8 МПа. Однако следует отметить, что разработанный щелеобразователь не предназначен для применения на более прочных породах.

Таким образом, в целях расширения области практического применения метода направленного измерительного гидроразрыва необходимо создание технических средств, обеспечивающих нарезание иницирующих щелей на стенках скважин в массивах прочностью до 80 ед. по шкале проф. М.М. Протодьяконова.

Одной из таких разработок является предлагаемая конструкция щелеобразователя (рис. 1). Устройство предназначено для нарезания поперечных иницирующих щелей в скважинах диаметром 76 мм в крепких породах. Передняя крышка 1 устройства снабжена стержнем 2 для упора в забой. Длина стержня определяется с учетом выбранного места выполнения щели и расстояния до забоя. В собранном виде устройство досылается в скважину 3 с помощью буровых штанг, соединение с которыми обеспечивает переходник 4. Устройство приводится во вращение. В процессе вращения в рабочую камеру 5 подается жидкость под давлением, при этом происходит движение поршня 7 гидроцилиндра 6, который толкает разжимные плунжеры 9, что в свою очередь вызывает перемещение ползушек 11 с резцами 12 до контакта с поверхностью скважины. Три резца, твердосплавные, либо с алмазным напылением, расположены равномерно в сечении устройства через 120 градусов и прочно закреплены в ползушках. Плавность выдвижения резцов и степень их перемещения регулируется давлением рабочей жидкости. В конце операции подача давления прекращается и поршень гидроцилиндра под действием возвратной пружины 8 перемещается в исходное состояние. Сопряжение ползушек с раздвижным плунжером выполнено по схеме ласточкиного хвоста, поэтому при движении поршня также в исходное состояние возвращаются резцы.

Использование для выдвижения резцов разжимного плунжера с наклонными пазами в виде ласточкиного хвоста обеспечивает повышенную жесткость конструкции для нарезания щелей в крепких породах, а также надежный возврат резцов в исходное состояние после окончания процесса резания. Кроме того, приведение резцов в рабочее состояние в нормальном по отношению к оси скважины направлении позволяет обеспечить постоянство углов резания и способствует повышению эффективности процесса нарезания иницирующей щели.

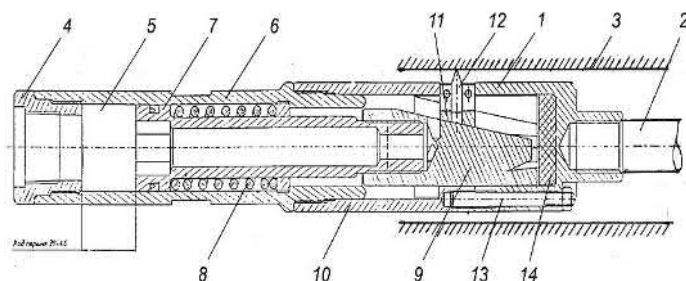


Рис. 1. Схема устройства для создания поперечных щелей в стенках скважины (резцы раздвинуты):

1 – крышка передняя; 2 – стержень; 3 – контур скважины; 4 – переходник; 5 – рабочая камера; 6 – гидроцилиндр; 7 – поршень; 8 – пружина возвратная; 9 – плунжер разжимной; 10 – корпус; 11 – ползушка; 12 – резец; 13 – болт стяжной, 14 – упор

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Haimson B.C., Cornet F.H. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation – Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTRF). *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2003. – № 40. – pp. 1012-1020.
2. Леонтьев А.В., Попов С.Н. Опыт практического применения измерительного гидроразрыва. М: Горный журнал. – 2003. – № 3. – С. 37-43.
3. Joong-Ho Synn, Chan Park, Yong-Bok Jung, Choon Sunwoo, Ki-Seog Kim, Si-Young Choi, Myung-Kyu Song, Il-Jae Shin, Jonny Rutqvist. Integrated 3-D stress determination by hydraulic fracturing in multiple inclined boreholes beneath an underground cavern. // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 75, 44-55 (2015).
4. Chuan-cheng Zhang, Qing-hui Jiang, Xiang He, Gang Liu. Applications of Hydraulic Fracturing Method in Measurement of in-situ Railway Tunnel Stress // *Electronic Journal Geotechnical Engineering*. 18, 2851-2862 (2013).
5. Ratigan J.L. The Use of the Fracture Reopening Pressure in Hydraulic Fracturing Stress Measurements. *Rock Mech. Rock Engng.* 25 (4), 225-236 (1992).
6. Yokoyama T., Sakaguchi K., Ito T. Re-Opening and Shut-in Behaviors under a Large Ratio of Principal Stresses in a Hydraulic Fracturing Test. *Symposium of the International Society for Rock Mechanics. Proceeding Engineering*. 191, 862-868 (2017).
7. Jalali M.R., Gischig V., Doetsch J., Krietsch H., Amann F. Mechanical, Hydraulic and Seismological of Crystalline Rock as a Response to Hydraulic Fracturing at the Grimsel Test Site. *ARMA. 51st U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. San Francisco, California, USA (2017).
8. Krietsch H., Gischig V., Evans K., Doetsch J., Dutler N.O., Valley B., Amann F. Stress Measurements for an In Situ Stimulation Experiment in Crystalline Rock: Integration of Induced Seismicity, Stress Relief and Hydraulic Methods. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. V 52. Issue 2, pp. 517-542 (2019).
9. Ask D. New developments in the integrated stress determination method and their application to rock stress data at the Äspö HRL, Sweden. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 43. pp. 107-126. (2016).
10. Bjarnason B., Leijon B., Stephansson O. The Bolmen project: rock stress measurements using hydraulic fracturing and overcoring techniques. *Tunnelling Underground Space Technology*. Vol. 3. pp. 305-316. (1988).
11. Yokoyama T., Sano O., Hirata F., Ogawa K., Nakayama Y., Ishida N., Mizuta Y. Development of borehole-jack fracturing technique for in situ stress measurement. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 67, pp. 9-19 (2014).
12. Азаров А.В., Курленя М.В., Сердюков С.В., Патутин А.В. Особенности развития трещины гидроразрыва вблизи свободной поверхности в изотропной среде // *ФТПРПИ*. – 2019. – № 1. – С. 3-11.
13. Сердюков С.В., Курленя М.В., Патутин А.В.: К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // *ФТПРПИ*. – 2016. – № 6. – С. 1-10.
14. Пат. 2522677 РФ. Способ направленного гидроразрыва массива горных пород (приоритет от 27.09.2012) / С.В. Сердюков, А.В. Патутин, А.С. Сердюков, Т.В. Шилова // *Опубл. в БИ*. – 2014. – № 20.
15. Makówka J. Podstawy metody określania naprężeń głównych z wykorzystaniem ukierunkowanego hydroszczelinowania skał (Basis of principal stresses determination method using directional hydraulic hydrofracturing of rocks – in Polish). *Prace Naukowe GIG nr 868*. Katowice, 2006.
16. Рубцова Е.В., Скулкин А.А. Развитие методических основ измерительного гидроразрыва // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – № 5. – С. 188-191.
17. Rutqvist J., Tsang Chin-Fu, Stephansson O. Uncertainty in the maximum principal stress estimated from hydraulic fracturing measurements due to the presence of the induced fracture // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2003. – № 40. – pp. 107-120.
18. Mizuta Y., Sano O., Ogino S., Katou H. Three dimensional stress determination by hydraulic fracturing for underground excavation design // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 1987. – Vol. 24. – pp. 15-29.
19. Synn J.H., Park C., Jung Y.B., Sunwoo C., Kim K.S., Choi S.Y., Song M.K., Shin I.J., Rutqvist J. Integrated 3-D stress determination by hydraulic fracturing in multiple inclined boreholes beneath an underground cavern. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2015. – № 75. – pp. 44-55.

20. Рубцова Е.В. О способах создания щелей-концентраторов напряжений в приконтурной зоне скважины // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2019. – Т. 2. – № 4. – С. 274–281.
21. Леконцев Ю.М., Леонтьев А.В. Устройство для создания инициирующих щелей в стенках солевых скважин // Сб. материалов XII Международного научного конгресса и выставки Интерэкспо «ГЕО-Сибирь 2016» – Новосибирск: – Изд-во СГУГиТ. – Т 3. – С. 181-184.
22. Леонтьев А.В., Рубцова Е.В., Скулкин А.А. Экспериментальное определение напряжений в окрестности подземных выработок на калийных рудниках г. Соликамска // Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах – Новосибирск: Изд-во СО РАН, – 2018. – С. 95-106.

© А. В. Леонтьев, Е. В. Рубцова, 2021

РАЗВИТИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ТАШТАГОЛЬСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ: РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ

Нелли Александровна Мирошниченко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории горной информатики, (383)205-30-30 доп. 174, e-mail: mna@misd.ru

Лариса Алексеевна Назарова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории горной информатики, (383)205-30-30 доп. 337, e-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru

Антон Владимирович Панов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории горной информатики, (383)205-30-30 доп. 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

На примере Таштагольского железорудного месторождения реализован подход, позволяющий выявить пространственно-временные связи между параметрами случайных и детерминированных процессов различной физической природы, протекающих в породном массиве при ведении крупномасштабных горных работ. Подход заключается в кросскорреляционном анализе длинных временных рядов «число и энергия слабых и умеренных динамических событий» и «вариация параметров поля напряжений» в различных областях геомеханического пространства исследуемого объекта. По данным автоматизированной системы микросейсмического контроля рудника (с 1989 по 2019 гг.) и результатов расчетов по разработанной трехмерной модели месторождения установлены величины коэффициентов корреляции r между числом N сейсмособытий с энергией до 3 кДж и приращениями максимального касательного T и среднего S напряжений в различных блоках. Построенные для статистически значимых r регрессионные зависимости $N(T)$ и $N(S)$ верифицированы посредством сравнения прогнозных и реальных значений величины N в 2020 г. Полученные зависимости могут быть использованы для геомеханического обоснования планов отработки запасов посредством форвардных расчетов напряженного состояния и на этой основе – оценки уровня сейсмической активности с использованием установленных корреляционных зависимостей.

Ключевые слова: породный массив, техногенная сейсмичность, эволюция поля напряжений, прогноз, объемная геомеханическая модель, кросскорреляционный анализ, Таштагольское железорудное месторождение

DEVELOPMENT OF INDUCED SEISMICITY IN MINING TASHTAGOL IRON ORE DEPOSIT: RETROSPECTIVE ANALYSIS AND FORECAST

Nelly A. Miroshnichenko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand.Sci (Phys.-Math.), Researcher, Mining Informatics Laboratory, office: +7 (383)205-30-30 ext. 174, e-mail: mna@misd.ru

Larisa A. Nazarova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr.Sci (Phys.-Math.), Principal Researcher, Mining Informatics Laboratory, office: +7 (383)2053030, ext. 337, e-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru

Anton V. Panov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher, Mining Informatics Laboratory, office: +7 (383)205-30-30 ext. 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

Using the example of the Tashtagol iron ore deposit, an approach has been implemented that makes it possible to reveal the space-time relationships between the parameters of random and deterministic processes of various physical nature, which occur in the rock mass during large-scale mining operations. The approach consists in cross correlation analysis of long time series “number and energy of weak and moderate dynamic events” and “variation of stress field parameters” in different areas of geomechanical space of the object under study. According to the data of automated micro-seismic control system of the mine (from 1989 to 2019) and calculation results based on the developed 3D model of the deposit, the values of correlation coefficients r between number N of seismic events with an energy of up to 3 kJ and increments of the maximum tangential T and average S stresses in different blocks were determined. The regression dependences $N(T)$ and $N(S)$ constructed for statistically significant r were verified by comparing the predicted and real values of N in 2020. The obtained dependences can be used for geomechanical justification of reserves mining using forward calculations of the stress state and, on this basis, for assessing seismic activity level using the found correlation dependences.

Key words: rock mass, induced seismicity, stress field evolution, forecast, 3D geomechanical model, cross correlation analysis, Tashtagol iron ore deposit

Введение

Крупномасштабные горные работы, связанные с перемещением больших объемов породы, добыча углеводородов и разработка геотермальных месторождений, эксплуатация подземных хранилищ газа, захоронение жидких и газообразных отходов производства в природных пластах – вот далеко не полный перечень антропогенных воздействий, влияющих на напряженно-деформированное состояние недр [1-5]. Изменение напряжений в породном массиве сопровождается повышением сейсмической активности [6-10] вплоть до возникновения сильных динамических событий, которые можно квалифицировать как горные удары и даже техногенные землетрясения [11]. Задача краткосрочного прогноза природных катастроф, по-видимому, до конца неразрешима вследствие неопределенности информации о состоянии и свойствах геофизической среды и количественных характеристиках геодинамических процессов [12-15]. Перспективы форвардной оценки параметров техногенной сейсмичности более оптимистические, хотя бы потому, что изменение полей напряжений, например, при ведении горных работ – процесс детерминированный.

В настоящей статье с использованием сейсмических данных и геотехнической информации, полученных при эксплуатации Таштагольского железорудного месторождения (ТЖМ) в 1989-2020 гг., посредством ретроспективного

анализа проведена верификация разработанного в [16,17] подхода, позволяющего установить количественные зависимости между параметрами детерминированных и стохастических природных и техногенных процессов.

Геомеханическая модель объекта и эволюция полей напряжений

Промышленная эксплуатация ТЖМ, расположенного в Алтае-Саянской складчатой области, началась с сороковых годов прошлого века. К настоящему времени горные работы достигли абсолютных глубин 800 м. Естественное поле напряжений соответствует взбросовому геодинамическому режиму (рис. 1а): максимальная σ_H (ориентирована по простиранию рудных тел) и минимальная σ_h горизонтальные компоненты соответственно в 2.5 и 1.3 раза больше вертикальной σ_V [18].

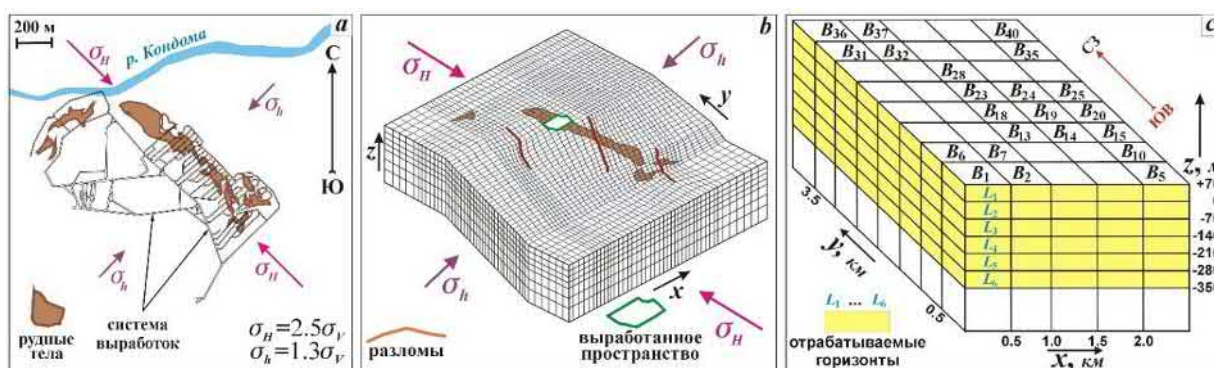


Рис. 1. Структурная схема ТЖМ, максимальное σ_H и минимальное σ_h горизонтальные напряжения во внешнем поле (а); фрагмент 3D сетки конечных элементов (b); разбиение расчетной области на блоки для пространственно-временного анализа техногенной сейсмичности (с)

В [19] разработана и на основе оригинального алгоритма [20] реализована детальная модель геомеханического пространства ТЖМ (рис. 1b демонстрирует фрагмент конечноэлементной дискретизации расчетной области, показанной на рис. 1с), с использованием которой рассчитаны поля напряжений $\sigma_{ij}(s)$ (s ассоциирован с календарным годом, $i, j = x, y, z$) на различных этапах отработки.

На рис. 2 представлены изолинии нормальных напряжений σ_{xx} и σ_{yy} на горизонте $z = -280$ м (глубина 780 м) для $s = 2009, 2014$ и 2020 , иллюстрирующие эволюцию поля напряжений по мере отработки месторождения: области концентрации мигрируют в соответствии с изменением конфигурации очистного пространства и продвижением фронта горных работ.

Оценка параметров техногенной сейсмичности

На каждом горизонте L_n разобьем расчетную область на блоки B_m (размеры $500 \times 500 \times 70$ м, рис. 1с), введем интегральную характеристику напряженного состояния

$$T_{mn}(s) = V^{-1} \iiint_{B_m} \tau_{max}(s) dV$$

(τ_{max} – максимальное касательное напряжение, V – объем B_m) и на каждом этапе отработки s подсчитаем число слабых и умеренных (энергия не превышает 3 кДж) динамических событий $N_{mn}(s)$, гипоцентры которых расположены внутри B_m .

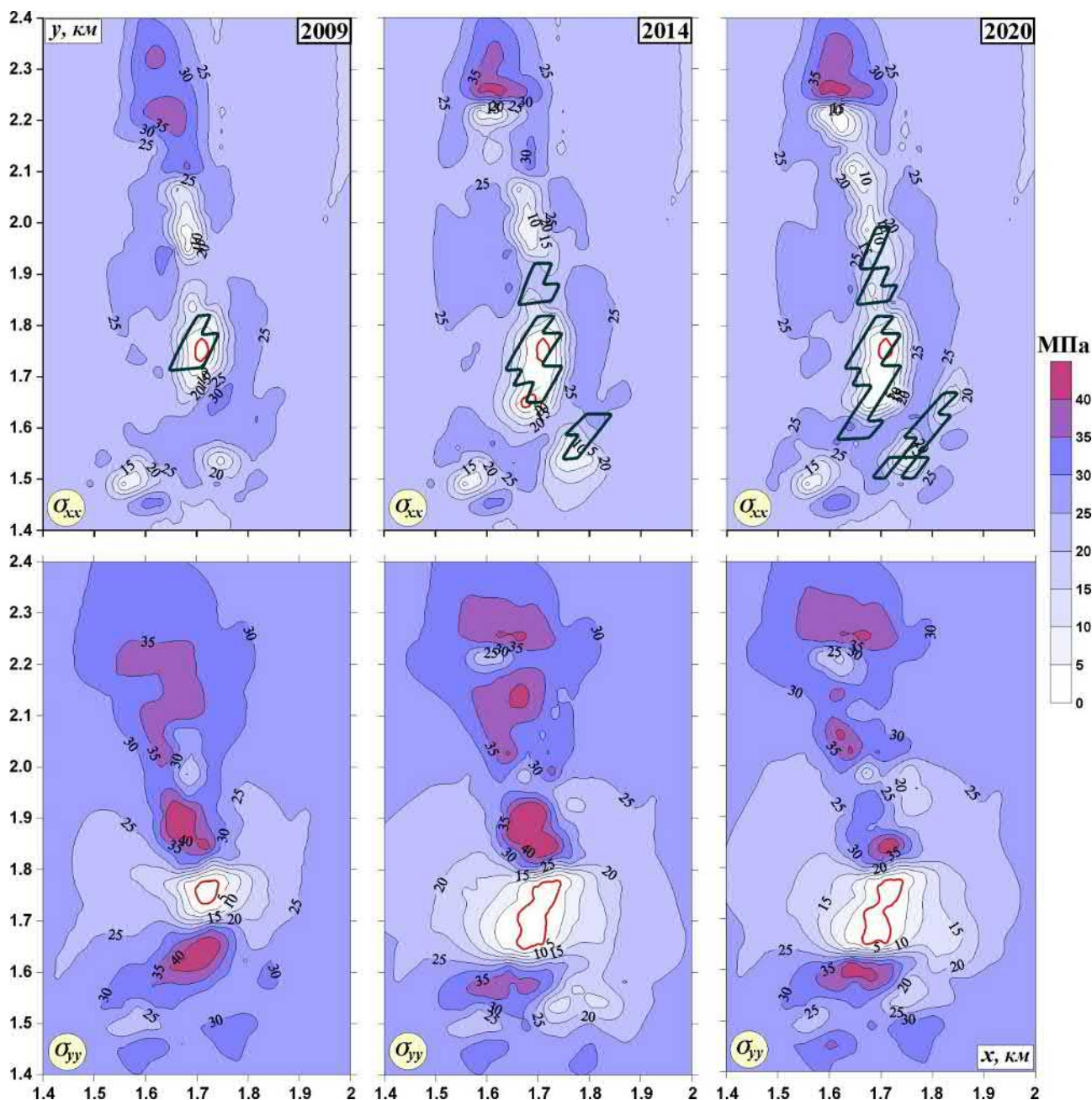


Рис. 2. Линии уровня компонент тензора напряжений $\sigma_{xx}(s)$ и $\sigma_{yy}(s)$ на различных этапах отработки ($s = 2009, 2014, 2020$)

Рассмотрим временные ряды детерминированных $\{T_{mn}(s)\}$ и случайных $\{N_{pq}(s)\}$ величин ($s=1989, 1990, \dots, 2020$; $m, p=1, \dots, 40$; $n, q=1, \dots, 7$) и для всех пар (T_{mn}, N_{pq}) рассчитаем коэффициент корреляции

$$\rho(m, n, p, q, S) = \frac{D(T_{mn}, N_{pq}, S)}{\sqrt{D(T_{mn}, T_{mn}, S)D(N_{pq}, N_{pq}, S)}},$$

где $\bar{T}_{mn} = (S - 1988)^{-1} \sum_{s=1989}^S T_{mn}(s)$, $\bar{N}_{pq} = (S - 1988)^{-1} \sum_{s=1989}^S N_{pq}(s)$,
 $D(T_{mn}, N_{pq}, S) = (S - 1988)^{-1} \sum_{s=1989}^S T_{mn}(s)N_{pq}(s) - \bar{T}_{mn}\bar{N}_{pq}$.

Если $|\rho(m, n, p, q, S)|$ близок к 1 (табл. 1), то геотехническая информация о блоках B_m и B_p пригодна для прогноза уровня сейсмической активности в обрабатываемом породном массиве. Запишем уравнение линейной регрессии

$$N_{pq}(s, S) = \rho(m, n, p, q, S) \frac{\sqrt{D(N_{pq}, N_{pq}, S)}}{\sqrt{D(T_{mn}, T_{mn}, S)}} (T_{mn}(s) - \bar{T}_{mn}) + \bar{N}_{pq}, \quad (1)$$

которое при $s \leq S$ связывает число динамических событий в блоке B_p (горизонт L_q) и напряжения в блоке B_m (горизонт L_n). Далее, проведя в соответствии с перспективным планом развития горных работ форвардный расчет напряженно-деформированного состояния на «момент времени S », по (1) можно определить ожидаемое в блоке B_p число динамических событий и верхнюю оценку выделившейся суммарной сейсмической энергии.

Таблица 1

Статистически значимые коэффициенты корреляции ρ

$\rho(24,5,23,5,2014) = 0.75$	$\rho(24,5,23,5,2020) = 0.83$
$\rho(19,7,18,7,2014) = 0.78$	$\rho(19,7,18,7,2020) = 0.70$
$\rho(23,4,24,4,2014) = -0.81$	$\rho(23,4,24,4,2020) = -0.74$

Для верификации такого подхода построены корреляционные зависимости (1) по геомеханической и сейсмической информации за 1989-2014 гг. (рис. 3, синяя линия) и за 1989-2020 гг. (красная линия).

Проведем ретроспективную оценку точности предлагаемой методики прогноза уровня техногенной сейсмичности посредством экстраполяции корреляционной зависимости $N_{pq}(s, 2014)$ на временной промежуток $2015 \leq s \leq 2020$ (рис. 3, синяя пунктирная линия). Среднеквадратичная невязка между «предсказанными» $N_{pq}(s, 2014)$ и «истинными» $N_{pq}(s, 2020)$ значениями числа событий

$$J = \frac{1}{6} \sum_{s=2015}^{2020} \left(1 - \frac{N_{pq}(s, 2014)}{N_{pq}(s, 2020)} \right)^2 = 0.1533$$

($N_{pq}(s, S)$ находятся по формуле (1)), что свидетельствует о принципиальной возможности использования предложенного подхода как одного из этапов при геомеханическом обосновании планов развития горных работ.

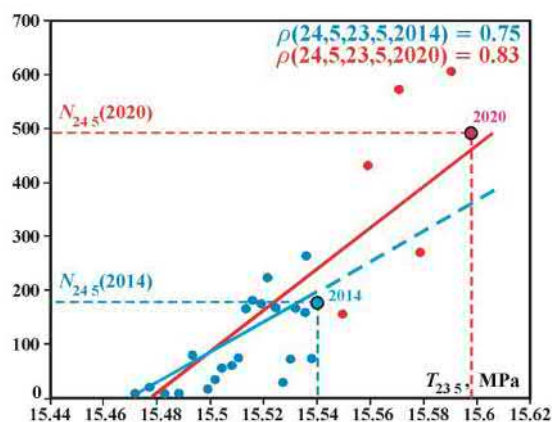


Рис. 3. Корреляционные зависимости числа динамических событий от напряжений, построенные по данным за 1989-2014 гг. (синяя линия) и за 1989-2020 гг. (красная линия)

Заключение

На основе ретроспективного анализа геотехнической и сейсмической информации, полученной при эксплуатации Таштагольского рудника, выполнена верификация разработанного подхода, позволяющего выявить пространственно-временные зависимости между параметрами стохастических и детерминированных физических полей. Точность получаемых форвардных оценок числа и суммарной энергии динамических событий в ограниченном объеме геофизической среды зависит от объема и надежности входных данных и может быть улучшена привлечением дополнительной информации, например, об эволюции параметров электромагнитных полей при развитии горных работ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А17-117121140065-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ellsworth W. Injection-Induced Earthquakes // Science. – 2013. – Vol. 341. – P. 1225942-1–1225942-8.
2. Grigoli F., Cesca S., Priolo E., Rinaldi A. P., Clinton J., Stabile T. A., Dost B., Garcia-Fernandez M., Wiemer S., Dahm T. Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: A European perspective // Reviews of Geophysics. – 2017. – Vol. 55, Issue 2. – pp. 310–340.
3. Gaucher E., Schoenball M., Heidbach O., Zang A., Fokker P.A., Van Wees J.D., Kohl T., Induced seismicity in geothermal reservoirs: A review of forecasting approaches // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2015. – Vol. 52. – pp. 1473–1490.

4. Langenbruch C., Weingarten M., Zoback M.D. Physics-based forecasting of manmade earthquake hazards in Oklahoma and Kansas // *Nat. Commun.* – 2018. – Vol. 9. – pp. 1–10.
5. Ruiz-Barajas S., Santoyo M.A., Benito Oterino M.B. *et al.* Stress transfer patterns and local seismicity related to reservoir water-level variations. A case study in central Costa Rica // *Scientific Reports*, 2019. – 9-5600.
6. Konicek P., Schreiber J., Nazarova L. Volumetric changes in the focal areas of seismic events corresponding to destress blasting // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2019. – Т. 29, № 4. – pp. 541-547.
7. Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes // *Earth-Science Reviews*. – 2018. – Vol. 178. – pp. 438-514.
8. Keranen K. M., Weingarten M. Induced seismicity // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 2018. – Vol. 46. – pp. 149–174.
9. Shapiro S. A. Fluid-induced seismicity. – Cambridge: Cambridge University Press, 2015. – 289 pages.
10. Zoback M.D., Kohli A.H. Unconventional reservoir geomechanics: Shale gas, tight oil, and induced seismicity. – Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – 492 pages.
11. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) // *ФТПРПИ*. – 2014. – № 2. – С. 41–46.
12. Holliday J., Nanjo K., Tiampo K., Rundle J., Turcotte D.. Earthquake forecasting and its verification // *Nonlinear Process. Geophys.* – 2005. – No. 12. – pp. 965–977.
13. Khaled G. and Zainah I. Earthquake Prediction, In: Zouaghi, T., Ed., *Earthquakes –Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*, IntechOpen, London, 2017. <https://www.intechopen.com/books/earthquakes-tectonics-hazard-and-risk-mitigation/earthquake-prediction>.
14. Seif S., Mignan A., Zechar J. D., Werner M. J., Wiemer S. Estimating etas: The effects of truncation, missing data, and model assumptions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2017. – 122 (1). – pp. 449–469.
15. Scholz C.H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. – 3rd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – 512 pages.
16. Назаров Л.А., Назарова Л.А., Ярославцев А.Ф., Мирошниченко Н.А., Васильева Е.В. Эволюция геомеханических полей и техногенная сейсмичность при отработке месторождений полезных ископаемых // *ФТПРПИ*. – 2011. – № 6. – С. 3–11.
17. Nazarova L. Diagnostics and prediction of geomechanical objects state based on back analysis // *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium (ISRM 2018, Saint Petersburg, Russia, 22-26 May 2018)*. – CRC Press/Balkema. – Vol. 1. – pp. 73-86.
18. Nazarova L.A., Zakharov V.N., Nazarov L.A. *et al.* Stress evolution and induced seismicity in mining: lab test, observation and modeling. In: *Rock Dynamics - Experiments, Theories and Applications. Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Rock Dynamics and Applications, ROCODYN-3 2018*. –Р. 461-467.
19. Назаров Л.А., Назарова Л.А., Панов А.В., Мирошниченко Н.А. Эволюция напряженно-деформированного состояния породного массива при отработке Таштагольского железорудного месторождения по результатам 3D-моделирования // *ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ – 2016. Том 2 Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: сб. матер. XII Межд. научн. конгресса*. – Новосибирск: Изд. СГУГиТ, 2016. – С. 87–91.
20. Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Трехмерная вязкоупругая модель литосферы Центральной Азии: методология построения и численный эксперимент // *Физическая мезомеханика*. – 2004. – Т. 7, № 1. – С. 91–101.

© Н. А. Мирошниченко, Л. А. Назарова, А. В. Панов, 2021

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ВЫСОКОПЛОТНЫХ МАССИВОВ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Алексей Васильевич Морозов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)205-30-30 доб.169, e-mail: alex02@ngs.ru

Самуил Яковлевич Левенсон

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел (383)205-30-30 доб. 312, e-mail: lev@misd.ru

Одной из важнейших технологических операций при открытой разработке полезных ископаемых является отвалообразование. Постоянное увеличение глубины карьеров приводит к росту объемов вскрышных пород, которые доставляются на отвалы автотранспортом. Фракционный состав вскрышных пород разнообразен. В первые годы на отвалы вывозились рыхлые породы с верхних горизонтов в нижние ярусы отвалов, а в последующие годы – скальные породы. В связи с этим, из-за низкой прочности и устойчивости отвального массива обеспечить безопасные условия работы, как правило, не удастся. Обеспечить повышение безопасности проведения работ возможно за счет уплотнения слагающих его пород. На основе проведенного анализа технологий уплотнения дисперсных материалов с использованием известного оборудования предложено самоходное вибрационное устройство для формирования устойчивого отвального массива. Использование в конструкции устройства вибрационного рабочего органа, реализующего полигармонический режим колебаний, позволит расширить область его применения в технологических процессах при проведении открытых горных работ.

Ключевые слова: отвалообразование, вскрышные породы, вибрационное устройство для формирования устойчивого отвального массива, режим вибровоздействия, уплотнение, рабочий орган

WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF ENGINEERING PROCESSES WHEN FORMING HIGH-DENSITY ARRAYS OF DISPERSE MATERIALS

Alexey V. Morozov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Researcher, Vibrotechnics Laboratory, office: +7 (383)205-30-30 ext.169, e-mail: alex02@ngs.ru

Samuil Y. Levenson

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Principal Researcher, Vibrotechnics Laboratory, office: +7 (383)205-30-30 ext. 312, e-mail: lev@misd.ru

One of the most important production operations in open pit mining is dumping. The depth of open pit mines increases constantly and the volume of overburden rocks also grows. Overburden is

truck-delivered to the dumps. Fractional composition of overburden is diverse. In the early years, loose rocks were transported to the dumps from the upper horizons to the lower levels of the dumps, and in subsequent years - hard rocks. In this view, due to the low strength and stability of the dump mass, it is usually not possible to provide safe working conditions. The mining safety can be increased due to the compaction of rocks composing the dump mass. Based on the analysis of technologies for compaction of dispersed materials using known equipment, a self-propelled vibration device is proposed for the formation of a stable dump mass. The use of a vibrating function element in the design, which implements a polyharmonic vibration mode, will expand the scope of its application during the open pit mining.

Keywords: dumping, overburden rocks, vibration device for forming stable dump mass, vibration effect, compaction, function element

При добыче полезных ископаемых на горных предприятиях широкое распространение получил открытый способ, обладающий рядом преимуществ в сравнении с подземной разработкой месторождений. Однако запасы руды и угля, залегающие в приповерхностном слое доступных для разработки участков Земли, практически израсходованы.

В России в настоящее время значительное число карьеров имеют глубину более 150 метров, и она будет только увеличиваться. Увеличение глубины карьеров влечет за собой увеличение объемов перемещаемых вскрышных пород. Использование самосвалов с повышенной грузоподъемностью позволяет интенсифицировать процесс проведения вскрышных работ. Однако применение оборудования, имеющего значительную собственную массу, ограничено, т.к. прочность и устойчивость отвального массива не позволяют обеспечить его безопасную эксплуатацию при формировании породных отвалов. Проблема безопасности на автоотвалах становится особенно актуальна в климатических условиях Сибири, где низкие температуры, большое количество осадков, сезонное промерзание и оттаивание породного массива оказывают отрицательное влияние на устойчивость отвалов [1, 2].

При доставке вскрышных пород на отвал автосамосвалами используют бульдозерный способ отвалообразования, который эффективен, когда разгрузка осуществляется под откос или вблизи бровки отвала, а оставшаяся часть породы сталкивается бульдозером [3]. При выполнении работ, как автосамосвал, так и бульдозер могут находиться в зоне возможного обрушения откоса отвала, что не обеспечивает безопасных условий эксплуатации тяжелой техники. На разрезах аварийные ситуации вблизи отвальной бровки с участием большегрузных автосамосвалов и бульдозеров, возникают ежегодно.

Повысить безопасность проведения работ при отсыпке отвала можно за счет уплотнения слагающих его пород.

Уплотнение широко используется в технологических процессах во многих отраслях промышленности. Этому процессу уделяется особое внимание, так как от качества уплотнения зависит конечный результат.

Используемые для уплотнения машины и механизмы разнообразны как по своему конструктивному исполнению, так и по принципу воздействия на

обрабатываемый массив. Постоянно совершенствуются их конструктивные схемы, усложняются режимы воздействия на материал. Оборудование, изготавливаемое разными фирмами, имеет однотипные конструктивные схемы и обладает близкими параметрами [2 - 6].

Анализ результатов исследований показывает, что среди большого разнообразия существующих методов уплотнения вибрационный является достаточно эффективным и сравнительно легко осуществимым [3-11]. Вибрация влияет на поведение уплотняемого материала, а проявляющиеся при ее воздействии реологические эффекты приводят к изменению сил трения и сцепления между частицами материала и, в целом, снижают сопротивление его деформированию.

Опыт создания ударных и вибрационных устройств [12, 13], который накоплен в ИГД СО РАН, служит базой для создания самоходных уплотняющих устройств, использование которых целесообразно на отвалах с неустойчивыми породами и слабым основанием.

Предложена технология отвалообразования с использованием вибрационного устройства для формирования устойчивого отвального массива, которое размещается на поверхности отвала (рис.1).

С помощью механизма передвижения 1 (рис.1а) устройство устанавливается на отвальном массиве таким образом, чтобы блок статической обработки 2 располагался вблизи неустойчивой зоны отвального массива 3, а катки механизма передвижения 1 опирались на его уплотненную устойчивую зону 4. При рабочем ходе перемещение устройства осуществляется по стрелке А (рис. 1а). Порода, доставленная на отвал автосамосвалами, сталкивается под откос отвала 5 блока статического уплотнения, а неустойчивая зона отвального массива уплотняется или обрушается за один или несколько циклов. Одновременно производится планировка поверхности отвального массива.

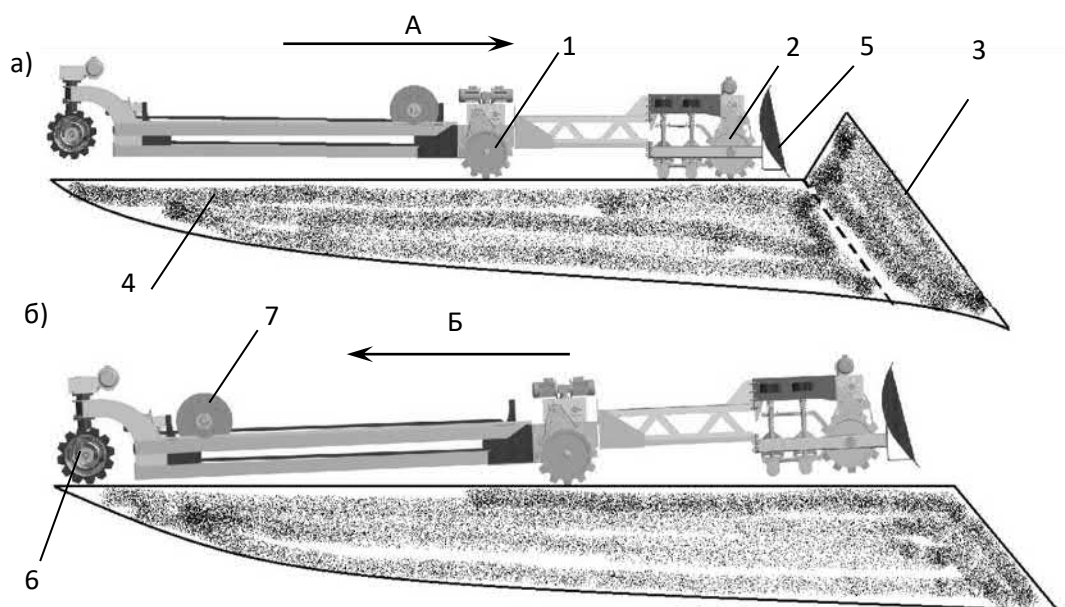
Для перестановки на соседний участок устройство приводится в транспортное положение (рис. 1б). При перемещении устройства (по стрелке А или Б) корректировка траектории его движения осуществляются изменением скорости вращения сдвоенных катков механизма передвижения 1. Повороты выполняются в транспортном положении при помощи механизма поворота 6, расположенного в хвостовой части устройства. Перевод из транспортного в рабочее положение осуществляется при помощи противовеса 7.

При обрушении материал заполняет нижерасположенное пространство отвала, увеличивая, также, как и уплотнение, его устойчивость за счет дополнительного подпора нижних слоев, залегающих в основании.

Работа устройства для формирования устойчивого отвального массива основана на формировании уплотненного массива в ограниченном пространстве, эффективность которого подтверждена при уплотнении дисперсных материалов. В качестве прототипа использована предложенная в ИГД СО РАН схема вибрационного устройства для уплотнения дисперсных материалов в ограниченном пространстве, новизна которой защищена патентами РФ [14, 15].

Эффективность предложенного способа уплотнения была подтверждена экспериментальными исследованиями [16], которые позволили установить, что

на плотность материала основное влияние оказывает ускорение колебаний, передаваемых сыпучей среде, причем, доминирующее значение имеет частота при гармоническом режиме колебаний виброблока.



1 – механизм передвижения, 2 – блок статической обработки, 3 – неустойчивая зона отвального массива, 4 – устойчивая зона отвального массива, 5 – отвал, 6 – механизм поворота, 7 – противовес

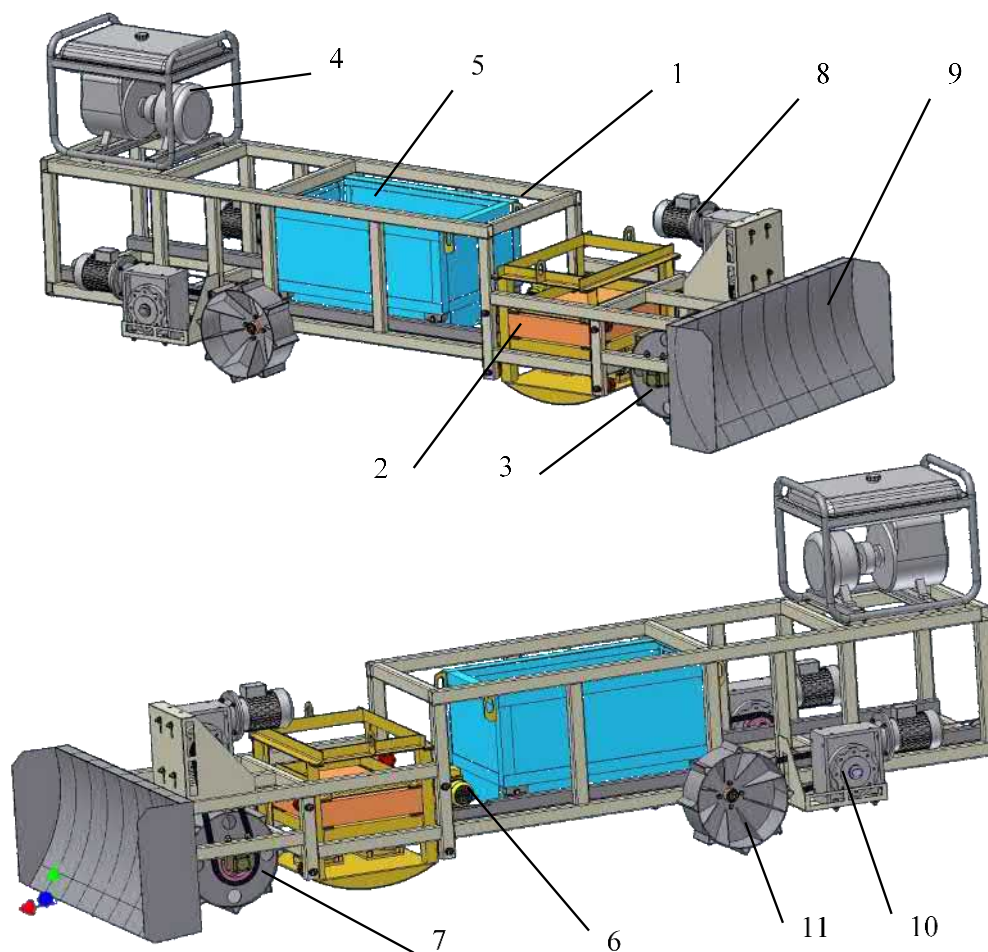
Рис. 1. Технология работы устройства для формирования устойчивого отвального массива

Также установлено, что реализация полигармонического режима работы уплотняющего рабочего органа обеспечивает его колебание, в котором присутствуют частоты, превышающие частоту вращения дебалансов при соизмеримой амплитуде. На плотность образуемого компакта материала оказывает влияние величина виброскорости высокочастотной составляющей в исследованном частотном диапазоне от 25 до 80 Гц, а также обеспечивается повышение плотности компакта на 10 – 15 % в сравнении с гармоническим режимом колебаний [17].

Используя результаты экспериментальных исследований была разработана конструкторская документация и изготовлен макетный образец вибрационного устройства для формирования устойчивого отвального массива. Общий вид разработанного устройства представлен на рисунке 2. Оно состоит из рамы 1, на которой смонтированы: блок динамической обработки 2, блок статической обработки 3, механизм перемещения, силовая установка 4 и противовес 5.

Рама 1 макетного образца выполнена в виде пространственной металлоконструкции, внутри которой размещается противовес 5. Противовес представляет собой емкость, которая может быть заполнена бетоном или любым другим материалом. Перемещение противовеса 5 внутри рамы 1 осуществляется при

помощи блочно-канатного привода 6 для перевода макетного образца в рабочее или транспортное положение.



1 –рама; 2 – блок динамической обработки; 3 – блок статической обработки с дополнительным механизмом перемещения; 4 – силовая установка; 5 – противовес; 6 - привод противовеса; 7 – приводное колесо; 8 – привод дополнительного механизма перемещения; 9 – отвал; 10 - привод ходового колеса; 11 – ходовое колесо

Рис. 2. Макетный образец устройства

Блок статической обработки 3 включает в себя приводное колесо 7 и дополнительный механизм перемещения 8. Приводное колесо 7 заполнено бетоном, что обеспечивает статическую нагрузку на обрабатываемый материал, а дополнительный механизм перемещения 8 при рабочем ходе устройства позволяет повысить тяговую способность устройства при сталкивании породы под откос и обеспечить движение без пробуксовок. Для планировки и сталкивания породы под откос в конструкции устройства предусмотрен отвал 9, который жестко крепится к раме и обеспечивает дополнительную статическую нагрузку на обрабатываемый материал. Блок динамической обработки 2 установлен с возможностью вертикального перемещения по направляющим относительно рамы 1.

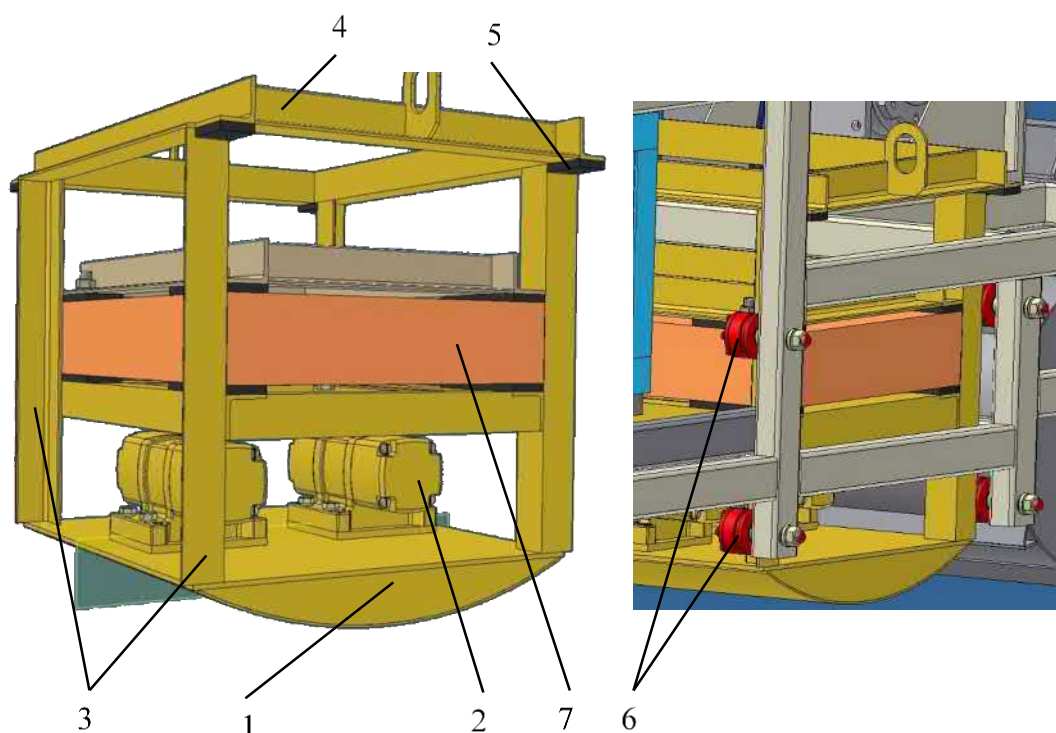
Для передвижения макетного образца предусмотрен механизм 10, состоящий из червячного мотор-редуктора и открытой цепной передачи, которая приводит в движение ходовое колесо 11. С каждой стороны рамы установлено по ходовому колесу, каждое из которых оборудовано своим независимым приводом. Регулирование частоты вращения ходовых колес осуществляется при помощи преобразователей частоты, что позволяет использовать механизм передвижения как механизм поворота. Для поворота вправо или влево необходимо при движении уменьшить частоту вращения того колеса, в какую сторону необходимо осуществить поворот.

Так как конструктивно механизм передвижения и блоки статической и динамической обработки располагаются на раме достаточной длины, во время воздействия на неустойчивую зону отвального массива блоком динамической обработки механизм передвижения остается в области устойчивой зоны отвального массива (за призмой возможного обрушения) и осуществляет ее дополнительное статическое уплотнение.

Ранее выполненные исследования показывают, что качество уплотнения повышается при использовании полигармонического привода. Идея создания полигармонического вибрационного привода изложена в работах И.И. Быховского [18]. Суть ее заключается в практическом использовании неравномерности вращения дебалансов центробежного вибровозбудителя. В результате возникают колебания, содержащее кроме основной частоты соизмеримую по амплитуде высокочастотную гармонику.

Для обеспечения полигармонического режима колебаний вибрационного рабочего органа в разрабатываемом устройстве необходимо обеспечить направленное движение источника колебаний с одной степенью свободы и упругое соединение с рамой.

Общий вид блока динамической обработки показан на рисунке 3. На уплотняющей плите 1 установлены два вибровозбудителя 2 с круговой вынуждающей силой. Такая установка вибровозбудителей способствует созданию направленной силы при вращении валов дебалансов в противоположные стороны, так как гасится горизонтальная составляющая колебаний. К уплотняющей плите крепятся четыре направляющие стойки 3, которые сверху объединены жестким поясом 4 с подъемными проушинами. Снизу к верхнему поясу крепятся амортизирующие прокладки 5, которыми виброблок опирается на раму установки в транспортном положении. Направленность колебаний виброблока обеспечивается за счет установки направляющих стоек 3 виброблока в направляющие ролики 6 рамы. После установки виброблока в раму ролики плотно поджимаются к направляющим стойкам и при помощи болтового соединения фиксируются в таком положении. Такая фиксация блока в раме обеспечивает возможность только вертикального перемещения виброблока относительно рамы, тем самым создаются условия для получения полигармонического режима колебаний.



1 – уплотняющая плита; 2 – вибровозбудитель; 3 – направляющая стойка; 4 – верхний пояс с подъемными проушинами; 5 – упругие опоры; 6 – направляющие ролики; 7 – дополнительная масса

Рис. 3. Конструктивное исполнение блока динамической обработки

Таким образом, чтобы обеспечить полигармонический режим колебаний необходимо обеспечить упругую связь виброблока с дополнительной массой 7, которая соединена с ним через упругие опоры. Из-за существенной разницы масс виброблока и рамы устройства последнюю можно считать неподвижной.

Поскольку технически сложно обеспечить резонансный режим только изменением конструктивных параметров системы (жесткость упругих элементов, масса), предусмотрена подстройка системы в резонанс за счет изменения в небольших пределах основной частоты вибровозбудителя с помощью преобразователя частоты.

Реализация полигармонического режима колебаний позволяет использовать серийные вибровозбудители с меньшей частотой вращения вала дебалансов и, как следствие, осуществлять уплотнение с меньшими энергозатратами и механическими нагрузками на механизм, что существенно повысит надежность работы вибропривода.

Лабораторные испытания макетного образца устройства для формирования устойчивого отвалного массива проводились на полигоне ИГД СО РАН «Зеленая горка».

Для проверки работоспособности предложенной схемы устройства для формирования устойчивого отвального массива решено было осуществить рабочий цикл, который включает в себя срезание и сталкивание породы под откос отвала. Для этого была подготовлена яма, на краю которой был уложен материал, имитирующий породу. При сталкивании материала был включен виброблок, который осуществлял уплотнение.

В ходе проведения испытаний макетный образец уверенно осуществлял сталкивание материала под откос и уплотнение выровненного участка сталкиваемой породы.

Использование экспериментальных данных позволяет подобрать режим вибровоздействия на отвальный массив и тем самым повысить его устойчивость по средством его уплотнения.

Испытания макета подтвердили предположение, что при возникновении в процессе работы деформации отвального массива (трещины, закола, оползня) существует опасность повреждения только устройства для формирования устойчивого отвального массива, которое может работать в автоматическом режиме. Но учитывая, что его стоимость в несколько раз меньше стоимости автосамосвала, а также конструктивную «живучесть» установки и отсутствие в опасной зоне людей, последствия любой, самой серьезной аварийной ситуации несравнимы с последствиями аварий автосамосвалов с водителями.

Закономерности и зависимости, полученные в предшествующие отчетные периоды, позволили разработать конструктивную схему вибрационного устройства для формирования устойчивого отвального массива с использованием источника полигармонической вынуждающей силы и изготовить его макетный образец. В предлагаемом устройстве реализуется метод уплотнения материала в ограниченном объеме, эффективность которого подтверждена в лабораторных и промышленных условиях.

Полученный результат позволяет разработать конструкцию промышленного образца устройства для безопасного и эффективного формирования устойчивого отвального массива без использования бульдозера и при отсутствии людей в опасной зоне.

Работа выполнена в рамках научного проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090003-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Интенсификация погрузочно-транспортных работ на карьерах / С. Г. Молотиллов, Е. И. Васильев, О. Б. Кортелев и др. – Новосибирск: Из-во СО РАН, 2000. – 208 с.
2. Вибрации в технике: Справочник. Т.4. Вибрационные процессы и машины/. Под ред. Э.Э. Лавендела– М.: Машиностроение, 1981.– 509 с.
3. Бауман В.А. Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М.: "Высшая школа", 1977. – 255 с.
4. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб.: Изд. «Руда и Металлы», 2013. — 640 с.

5. Зубкин В.Е., Коновалов В.М., Королев Н.Е. Способ нагнетающей укатки и классические дорожные катки // Строительные и дорожные машины – 2001 – № 3 – С. 12 – 15.
6. Егоров А.Н., Насковец А.М., Мариев П.Л. Карьерный самосвал БЕЛАЗ-75710 грузоподъемностью 450 тонн // Актуальные вопросы машиноведения – 2013. – Т. 2. – С. 18–20
7. Применение вибрационной техники с бигармоническим режимом колебаний при обогащении углей [Текст] / Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, С.Л. Букин и др. // Уголь Украины, май 2011. – С. 41-44.
8. Букин, В.П. Кондрахин, В.Н. Беловодский, В.Н. Хоменко Возбуждение полигармонических колебаний в одномассовой вибромашине с инерционным приводом и упругой муфтой // ФТПРПИ. – 2014. – №4. – С. 103–110.
9. Левенсон С. Я., Гендлина Л. И., Морозов А. В., Усольцев В. М. Совершенствование процесса формирования автоотвалов при открытой разработке полезных ископаемых // ГИАБ – 2016. – № 1. – С. 96–105
10. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника / И.И. Блехман – СПб.: Изд. «Руда и Металлы», 2013. – 640 с.
11. Захаренко А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: Дисс. докт. техн. наук: 05.05.04 Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. – Омск, 2005. – 320 с.
12. Патент на полезную модель № 88004 B65G27/00. Вибрационный отвалообразователь / Левенсон С. Я., Гендлина Л. И., Еременко Ю. И., Морозов А. В., Протасов С. И., Голдобин В. А. – 2009. – 2 с.
13. Патент на полезную модель № 121800 B65G27/00. Вибрационный отвалообразователь / Левенсон С. Я., Гендлина Л. И., Усольцев В. М., Голдобин В. А., Морозов А. В. – 2012.
14. Патент РФ 2296819. МПК8 С 25 С 3/06, С 25 С 3/08 Способ формирования бесшовных футеровочных слоев в алюминиевых электролизерах и устройство для его осуществления / А.В. Прошкин, В.В. Пингин, В.С. Тимофеев, С.Я. Левенсон., Л.И. Гендлина, Ю.И. Еременко, В.А. Голдобин. № 20051266100/02; заявл. 17.08.2005; – опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10
15. Патент РФ № 2553145. МПК8 С 25 С 3/08 Способ футеровки катодного устройства электролизера неформованными материалами и устройство для его осуществления / Прошкин А.В., Левенсон С.Я., Пингин В.В., Морозов А.В. – БИ № 16 от 10 июня 2015 г.
16. Гендлина Л.И. Результаты исследования процесса уплотнения дисперсных материалов вибрационным способом / Л.И. Гендлина, С.Я. Левенсон С.Я., Ю.И. Еременко, В.В. Виданов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М, 2011. – № 8 – С. 255–259
17. Morozov A.V., Usoltsev V.M. Compaction of dispersed granular material by a vibratory compactor with polyharmonic oscillation exciter // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science [Electronic resource]. – 2020. – Vol. 523 – doi:10.1088/1755-1315/523/1/012003.
18. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники / И.И. Быховский – М.: Машиностроение, 1968. – 362 с.

© А. В. Морозов, С. Я. Левенсон, 2021

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ ГЕОМАТЕРИАЛОВ

Лариса Алексеевна Назарова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории горной информатики, (383)205-30-30 доп. 337, e-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru

Галина Владимировна Нестерова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 3, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей, тел. +79138928751, email: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

Леонид Анатольевич Назаров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, г. Новосибирск, Красный пр. 54, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией горной информатики, тел. (383)2053030 доп. 337, email: mining1957@mail.ru

Фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) пород-коллекторов зависят не только от петрофизических характеристик пласта, но и от действующих в массиве горных пород напряжений. Перераспределение последних при бурении обуславливает возникновение анизотропии проницаемости в прискважинной зоне, которая влияет не только на расходные характеристики скважин, но и на процесс проникновения фильтрата бурового раствора в пласт. Это должно учитываться при построении геомеханико-электродинамической модели околоскважинного пространства. Представлены результаты фильтрационных испытаний регулярно-неоднородных цилиндрических образцов из искусственного геоматериала и предложен метод синтеза зависимости эффективной проницаемости от полярного угла на основе решения коэфффициентной обратной задачи. Полученные зависимости дополнили базу данных коллекторских свойств горных пород, используемую для инверсии ГИС данных при количественной оценке ФЕС, пример которой представлен в настоящей статье.

Ключевые слова: породный массив, фильтрационно-емкостные свойства, анизотропия проницаемости, численное моделирование, обратная задача

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF POROPERM PROPERTIES ANISOTROPY USING ARTIFICIAL GEOMATERIALS

Larisa A. Nazarova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of RAS 630091, Novosibirsk, 54 Krasny Prospekt, DSc, principal researcher of Mining Informatics Laboratory, phone (383) 2053030, add. 337, e-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru

Galina V. Nesterova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian branch of Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, 3, Prospekt Koptyuga, PhD, senior researcher of Laboratory of Electromagnetic Fields, tel. (383)3304953, email: NesterovaGV@ipgg.nsc.ru

Leonid A. Nazarov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of RAS, 630091, Novosibirsk, 54, Krasny Prospekt, DSc, Head of Mining Informatics Laboratory, phone (383)2053030 add. 337, email: mining1957@mail.ru

Keywords: rock mass, poroperm properties, permeability anisotropy, numerical simulation, inverse problem

Заблаговременная дегазация подготавливаемых к отработке участков угольных пластов, проектирование систем утилизации шахтного метана, выделение продуктивных интервалов и определение фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород по ГИС данным – вот далеко не полный перечень практических задач, для решения которых необходима разработка и верификация мультифизических моделей [1-9]. Такие модели, помимо законов сохранения и уравнений состояния, включают эмпирические соотношения между параметрами возникающих в околоскважинном пространстве физических полей: петрофизические формулы электропроводности гетерогенной среды, связь фазовой проницаемости с концентрацией флюидов, зависимость ФЕС пород-коллекторов от напряжения. Это обстоятельство, а также различие горизонтальных компонент внешнего поля напряжений и вносимые бурением возмущения последнего обуславливают возникновение анизотропии проницаемости околоскважинного пространства. Ранее при моделировании геомеханических и электрогидродинамических процессов с целью определения ФЕС по результатам геофизического исследования скважин использовались одномерные осесимметричные модели, в которых применялись зависимости ФЕС от напряжения, полученные при исследовании изотропных сред [10-15]. Для инверсии данных ГИС в случае природной или техногенной (вызванной изменением напряжений) анизотропии проницаемости разработаны и численно реализованы модели [4, 16-18], позволяющие описывать 2D и 3D массообменные процессы в окрестности скважины, разбуриваемой на репрессии (рис. 1).

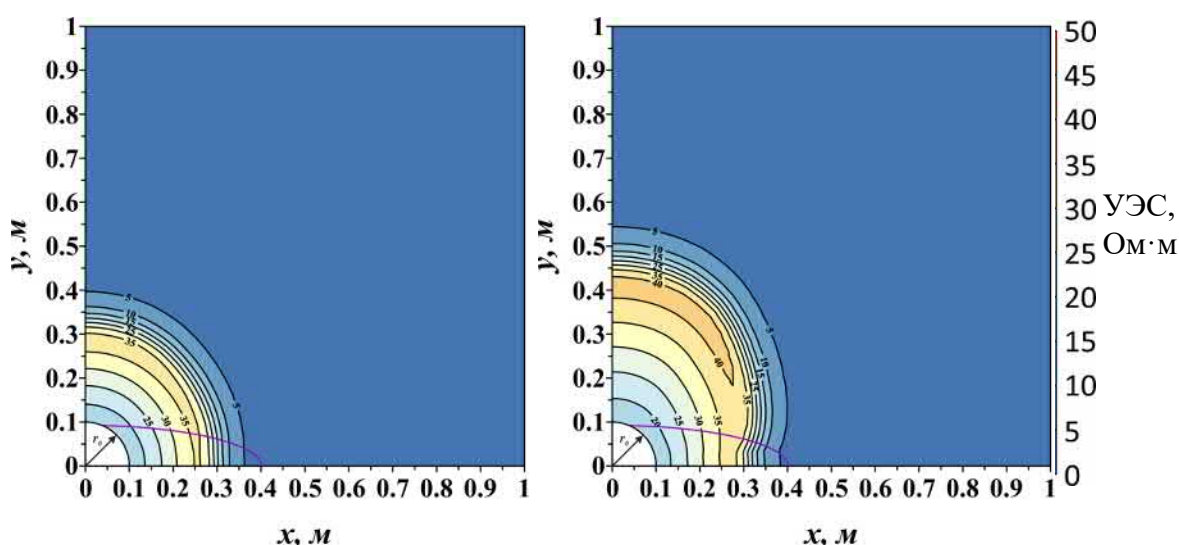


Рис. 1. Распределение удельного электрического сопротивления пласта (УЭС) при слабой (слева) и сильной (справа) азимутальной анизотропии пласта

Для параметрического обеспечения таких моделей и апробации метода синтеза обобщенных зависимостей, описывающих анизотропию ФЕС, возникающую в окрестности вертикальной скважины, пробуренной в пласте при неравнокомпонентном поле внешних горизонтальных напряжений, были проведены эксперименты на искусственных цилиндрических образцах (высота $H=110$ мм, внешний и внутренний радиусы $R=75$ мм и $a=4$ мм). Части образца одинаковой формы (секторы с углом раствора $2\beta = 60^\circ$), но с разными проницаемостями (k_0 , k_1 и k_2) изготавливались из калиброванного песка трех фракций размером 0.5, 1 и 1.5 мм (рис. 2) по технологии, описанной в [19].

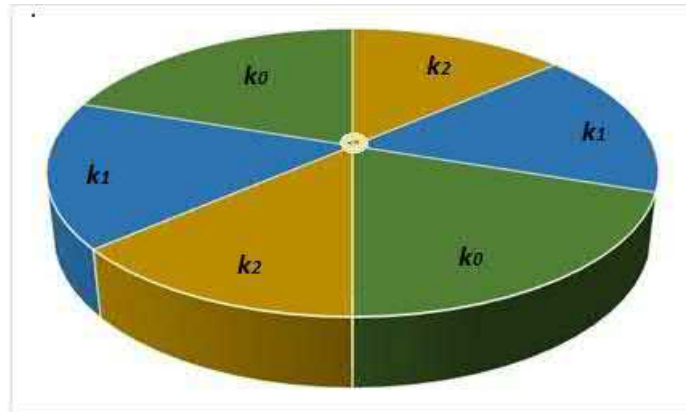


Рис. 2. Структура образца из искусственного геоматериала

Через центральное отверстие образца нагнетался воздух с постоянным давлением p_m , а на различных сегментах боковой поверхности образца, положение которых определялось углом φ_n , в стационарном режиме регистрировался расход Q_{mn} с относительной точностью 2%. Для решения обратной задачи «определение зависимости проницаемости от полярного угла по измеренным Q_{mn} » рассматривается система, описывающая стационарное распределение гидродинамических полей в образце [20]:

$$\text{уравнение неразрывности} \quad \operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0; \quad (1)$$

$$\text{закон Дарси} \quad \vec{V} = -K \operatorname{grad} p / \eta \quad (2)$$

$$\text{и уравнение состояния} \quad p = p_0 \rho / \rho_0, \quad (3)$$

где проницаемость K является кусочно-постоянной функцией от полярного угла $K(\theta) = k_i$ при $\theta \in [\pi i/3, \pi(1+i)/3] \cup [\pi(3+i)/3, \pi(4+i)/3]$ ($i = 0, 1, 2$), p – давление, ρ и η – плотность и вязкость газа, ρ_0 – плотность газа при атмосферном давлении p_0 , $\vec{V}(r, \theta)$ – скорость фильтрации. Для системы (1)–(3) формулируются следующие граничные условия:

$$p(a, \theta) = p_m, \quad p(R, \theta) = p_a \quad \text{при} \quad |\theta - \varphi_n| \leq \beta \quad \text{и} \quad p_{,r}(R, \theta) = 0 \quad \text{при} \quad |\theta - \varphi_n| \geq \beta.$$

Расход газа через сектор на боковой поверхности, вычисляется по формуле

$$Q = HR \int_{\varphi_n - \beta}^{\varphi_n + \beta} V_r(R, \theta) d\theta,$$

где радиальная скорость V_r находится из (2).

Представим зависимость эффективной проницаемости K от полярного угла θ в виде $K(\theta) = A + (B - A)\theta/\pi$ ($0 \leq \theta \leq \pi$) и введем целевую функцию:

$$\Psi(A, B) = \sum_{m=1}^5 \sum_{n=1}^3 [Q(A, B, p_m, \varphi_n) - Q_{mn}]^2,$$

минимум которой дает искомые значения $A \approx 22$ мД и $B \approx 38$ мД. Найденная по измеренным в эксперименте расходам Q_{mn} эмпирическая зависимость $K(\theta)$ хорошо согласуется со значениями проницаемостей $k_0=24$ мД, $k_1=29$ мД и $k_2=34$ мД сегментов (рис. 2), определенными стандартным методом [21].

Получаемые по предложенной методике функции $K = K(\theta)$, предназначены для верификации двумерных анизотропных моделей массообменных процессов и встроены в базу данных системы построения цифровых двойников нефтяных коллекторов АТЛАС МФМ [22,23]. Рисунок 3 демонстрирует результаты расчетов по одной из таких моделей – радиальное распределение электрогидродинамических параметров в ортогональных направлениях (синяя линия $\theta = 0$, красная – $\theta = \pi/2$).

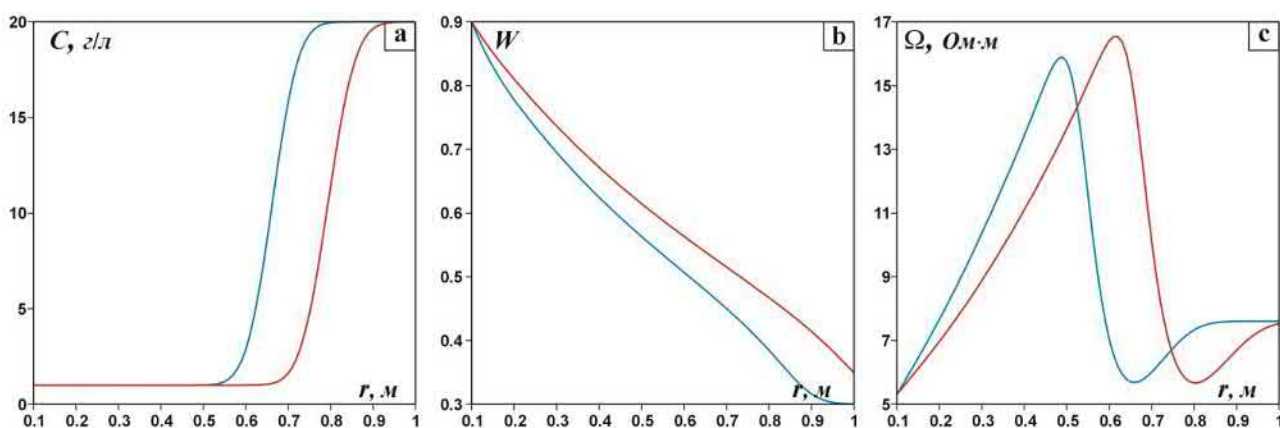


Рис. 3. Полученные в системе АТЛАС МФМ распределения: минерализации C (a); водонасыщенности W (b); УЭС Ω (c).

Закключение. Предложенный метод экспериментального исследования процессов массопереноса с использованием регулярно-неоднородных цилиндрических образцов с центральным отверстием позволяет синтезировать эмпирические зависимости эффективной проницаемости, описывающие анизотропию фильтрационных свойств геоматериалов и горных пород, которая возникает в окрестности скважин при бурении. Изменение геомеханических полей в при-скважинной зоне обуславливает возникновение азимутальной неоднородности проницаемости, что отражается в сигналах каротажных зондов и должно учитываться при интерпретации данных ГИС для повышения точности оценки параметров пласта и добычных характеристик скважины.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00689), проектов ФНИ № АААА-А17-117122090002-5 и ФНИ № 0331-2019-0015.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Seidle J. Fundamentals of coalbed methane reservoir engineering. PennWell Books, 2011. 470 p.
2. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазо-насыщения горных пород. М.: Недра, 1985. 310 с.
3. Lyons W., Plisga G. Lorenz M. Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering (3rd edition), Gulf Professional Publishing, 2015. 1822 p.
4. Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Эпов М.И. Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбуриваемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55 (5-6). – С. 978-990.
5. Назарова Л.А., Голиков Н.А., Скулкин А.А., Назаров Л.А. Экспериментальное исследование фильтрационных свойств геоматериалов в неоднородном поле напряжений // ФТПРПИ. – 2020. – № 5. – С. 33-40.
6. Jalali M.R., Dusseault M.R. Coupling geomechanics and transport in naturally fractured reservoirs // Int. J. Min & Geo-Eng. (IJMGE). – 2012. – V. 46. – No. 1. – P. 1-26.
7. Alpak F.O. Robust Fully-coupled multiphase flow and geomechanics simulation // SPE Journal. – 2015. – V. 20. – P. 1366-1383.
8. Doster F., Nordbotten J. M. Full pressure coupling for geo-mechanical multi-phase multi-component flow simulations // SPE RS Symposium – Texas, 2015. – P. MS1–MS12.
9. Garcia A.P., Heidari Z. A new multiphysics method for simultaneous assessment of permeability and saturation-dependent capillary pressure in hydrocarbon-bearing rocks // SPE Journal. – 2021. – V. 26. – No 1. – P. 155-171. – Paper Number: SPE-195468-PA.
10. Dobrynin V.M. Effect of overburden pressure on some properties of sandstones // SPE journal. – 1962. – No 12. – С. 360-366.
11. Holt R.M. Permeability reduction induced by a mon hydrostatic stress field // Formation Evaluation: SPE. – 1990. – 12. – P. 444-448.
12. Ghabezloo S., Sulem J., Guedon S., Martineau F. Effective stress law for the permeability of a limestone // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science. – 2009. – V. 46. – P. 297–306.
13. Xie S.Y., Shao J.F. Experimental study on permeability of a porous limestone under compressive stress // 48th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium. Minneapolis: ARMA. 2014. P. 1-7.
14. Григорьев Б.В., Шубин А.А. Влияние изменения эффективного давления на фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов // Вестник Тюменского гос.университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т.1. – № 2. – 15-21.
15. Jia C., Xu W., Wang H., Wang R., Yu J. Stress dependent permeability and porosity of low-permeability rock // Journal of Central South University. – 2017. – V. 24. – No 10. – P. 2396-2405.
16. GENM2D: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ // № 2018613634, заявка № 2017663592 от 26.12.2017, зарегистрировано 21.03.2018, RU.
17. Назарова Л.А., Назаров Л.А. Эволюция напряжений и проницаемости трещиновато-пористого породного массива в окрестности добычной скважины // ФТПРПИ. – 2016. – № 3. – С. 11-19.
18. Назарова Л.А., Назаров Л.А. Геомеханические и гидродинамические поля в продуктивном пласте в окрестности скважины с учетом зависимости фильтрационных свойств пород от эффективных напряжений // ФТПРПИ. – 2018. – № 4. – С. 11-20.
19. Назарова Л.А., Назаров Л.А., Голиков Н.А., Скулкин А.А. Зависимость проницаемости геоматериалов от напряжений по данным лабораторных экспериментов на цилиндрических образцах с центральным отверстием // ФТПРПИ. – 2019. – № 5. – С. 18-25.
20. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 1. 1963. 583 с.

21. ГОСТ 26450.2–85. Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации.
22. ATLAS_GEHM: Свидетельство о государственной регистрации базы данных // № 2018620241, заявка № 2017621566/69 от 26.12.2017, зарегистрировано 09.02.2018, RU.
23. Соболев А.Ю., Нестерова Г.В., Черняк Н.М., Ельцов И.Н. Организация коллекции цифровых двойников нефтегазонасыщенных коллекторов АТЛАС МФМ // Распределенные информационно-вычислительные ресурсы. Цифровые двойники и большие данные (DICR-2019): Труды XVII междунар. конф. (г. Новосибирск, 3-6 декабря 2019 г.). – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. – С. 17-21.

REFERENCES

1. Seidle J. Fundamentals of coalbed methane reservoir engineering. PennWell Books, 2011. 470 p.
2. Dahnov V.N. Geofizicheskie metody opredeleniya kollektorskih svoystv i neftegazonasyshcheniya gornyh porod. M.: Nedra, 1985. 310 s.
3. Lyons W., Plisga G. Lorenz M. Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering (3rd edition), Gulf Professional Publishing, 2015. 1822 p.
4. Yeltsov I.N., Nazarova L.A., Nazarov L.A., Nesterova G.V., Sobolev A.Y., Epov M.I. Geomechanics and fluid flow effects on electric well logs: Multiphysics modeling // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – Т. 55. – № 5-6. – С. 775-783.
5. Nazarova L.A., Golikov N.A., Skulkin A.A., Nazarov L.A. Experimental investigation of poroperm properties of geomaterials in nonuniform stress field // J. of Mining Science. – 2020. – V. 56. – P. 706-712.
6. Jalali M.R., Dusseault M.R. Coupling geomechanics and transport in naturally fractured reservoirs // Int. J. Min & Geo-Eng. (IJMGE). – 2012. – V. 46. – No. 1. – P. 1-26.
7. Alpak F.O. Robust Fully-coupled multiphase flow and geomechanics simulation // SPE Journal. – 2015. – V. 20. – P. 1366-1383.
8. Doster F., Nordbotten J.M. Full pressure coupling for geo-mechanical multi-phase multi-component flow simulations // SPE RS Symposium – Texas, 2015. – P. MS1–MS12.
9. Garcia A.P., Heidari Z. A new multiphysics method for simultaneous assessment of permeability and saturation-dependent capillary pressure in hydrocarbon-bearing rocks // SPE Journal. – 2021. – V. 26. – No 1. – P. 155-171. – Paper Number: SPE-195468-PA.
10. Dobrynin V.M. Effect of overburden pressure on some properties of sandstones // SPE journal. – 1962. – No 12. – C. 360-366.
11. Holt R.M. Permeability reduction induced by a nonhydrostatic stress field // Formation Evaluation: SPE. – 1990. – No 12. – P. 444-448.
12. Ghabezloo S., Sulem J., Guedon S., Martineau F. Effective stress law for the permeability of a limestone // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science. – 2009. – V. 46. – P. 297–306.
13. Xie S.Y., Shao J.F. Experimental study on permeability of a porous limestone under compressive stress // 48th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium. – Minneapolis: ARMA. – 2014. – 7 P.
14. Grigor'ev B.V., Shubin A.A. Vliyanie izmeneniya effektivnogo davleniya na fil'tracionno-emkostnye svoystva porod-kollektorov // Vestnik Tyumenskogo gos.universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С.15-21.
15. Jia C., Xu W., Wang H., Wang R., Yu J. Stress dependent permeability and porosity of low-permeability rock // Journal of Central South University. – 2017. – V. 24. – No 10. – P. 2396-2405.
16. GEHM2D: Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM // № 2018613634, заявка № 2017663592 от 26.12.2017, зарегистрировано 21.03.2018, RU.
17. Nazarova L.A., Nazarov L.A. Evolution of stresses and permeability of fractured-and-porous rock mass around a production well // Journal of Mining Science. – 2016. – V. 52. – No 3. – P. 424-431.

18. Nazarova L.A., Nazarov L.A. Geomechanical and hydrodynamic fields in producing formation in the vicinity of well with regard to rock mass permeability-effective stress relationship // Journal of Mining Science. – 2018. – V. 54. – No 4. – P. 541–549.
19. Nazarova L.A., Nazarov L.A., Skulkin A.A., Golikov N.A. Stress-permeability dependence in geomaterials from laboratory testing of cylindrical specimens with central hole // Journal of Mining Science. – 2019. – T. 55. – № 5. – C. 708-714.
20. Kochin N.E., Kibel' I.A., Roze N.V. Teoreticheskaya gidromekhanika. V. 1. 1963. 583 s.
21. GOST 26450.2–85. Porody gornye. Rocks. Method for determination of absolute gas permeability coefficient by stationary and non-stationary filtration.
22. ATLAS_GEHM: Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh // № 2018620241, zayavka № 2017621566/69 ot 26.12.2017, zaregistrirovano 09.02.2018, RU.
23. Sobolev A.Yu., Nesterova G.V., Chernyak N.M., El'cov I.N. Organizaciya kollekcii cifrovyyh dvoynikov neftegazonasyshchennyh kollektorov ATLAS MFM // Raspredelemnnye informacionno-vychislitel'nye resursy. Cifrovye dvoyniki i bol'shie dannye (DICR-2019): Trudy XVII mezhdunar. konf. (g. Novosibirsk, 3-6 dekabrya 2019 g.). – Novosibirsk: IVT SO RAN, 2019. – S. 17-21.

© Л. А. Назарова, Г. В. Нестерова, Л. А. Назаров, 2021

БЕЗОПАСНОСТЬ ОЧИСТНЫХ РАБОТ ПРИ ПОДЭТАЖНОЙ ВЫЕМКЕ С ОБРУШЕНИЕМ В ТЕКТОНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ

Сергей Алексеевич Неверов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, заведующий лабораторией подземной разработки рудных месторождений, тел. (923)224-15-79, e-mail: nsa_nsk@mail.ru

Антон Игоревич Конурин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-технических геотехнологий, (383) 205-30-30 доп. 316, e-mail: akonurin@yandex.ru

Юрий Николаевич Шапошник

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории подземной разработки рудных месторождений, тел. (383) 205-30-30 доп. 159, e-mail: shaposhnikyury@mail.ru

Рассмотрена отработка запасов мощной крутопадающей залежи системой разработки подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды при переходе от карьерной выемки к подземному способу добычи в условиях развитой тектоники. Обоснование технологии выполнено путем математического моделирования напряженного состояния массива горных пород методом конечных элементов. Поиск безопасных параметров системы разработки осуществлен путем решения вариационной задачи с изменчивой степенью нарушенности геосреды в сложившейся горнотехнической конструкции при погашении запасов на развитой стадии очистной выемки. Установлены прогнозируемые участки потерь устойчивости основных конструктивных элементов системы разработки. Определены безопасные параметры отбойки и выпуска руды по условию устойчивости горных выработок. Даны рекомендации по выемке мощных крутопадающих залежей под открытыми горными работами.

Ключевые слова: карьер, система подэтажного обрушения, численное моделирование, массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, параметры, устойчивость, безопасность

SAFETY IN SUBSTOPPING-AND-CAVING IN TECTONICALLY STRESSED ROCK MASSES

Sergey A. Neverov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Head of Underground Ore Deposit Mining Laboratory, office: +7 (923)224-15-79, e-mail: nsa_nsk@mail.ru

Anton I. Konurin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Physical and Engineering Geotechnologies, office: +7 (383) 205-30-30 ext. 316, e-mail: akonurin@yandex.ru

Yuri N. Shaposhnik

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Underground Ore Deposit Mining Laboratory, office: +7 (383) 205-30-30 ext. 159, e-mail: shaposhnikyury@mail.ru

Mining of a thick steeply dipping deposit using sublevel caving with end-face ore drawing in transition from open pit excavation to underground mining is considered in conditions of developed tectonics. The technology was justified by mathematical modeling of the stress state of the rock mass using finite element method. Safe parameters of the mining system were determined by solving a variational problem with a variable degree of geomedium disturbance in the existing mining and engineering structure when depleting reserves at an advanced stoping stage. The predicted areas of stability losses for main structural elements of the mining system have been determined. Safe parameters of ore breaking and drawing were calculated using the stability condition of mine workings. Recommendations are given for the excavation of thick steeply dipping deposits under open pit mining.

Keywords: open-pit mine, sublevel caving, numerical modeling, rock mass, stress-strain state, parameters, stability, safety.

Актуальность

Как показывает практика большинство карьеров, ведущих разработку мощных крутопадающих рудных залежей неизбежно сталкиваются с проблемой безопасного перехода от открытых горных работ к подземным [1-5]. При этом в зависимости от геологических и горнотехнических факторов отработка подкарьерных запасов может осуществляться при наличии предохранительного подкарьерного целика, это преимущественно высокоценного сырья системами с закладкой или открытым выработанным пространством, а также под защитой ранее сформированной на дне карьера породной подушки в условиях бедных и рядовых руд технологией с обрушением [6-8]. В связи с чем, вопросы обоснования технологии выемки подкарьерных запасов являются актуальными и важными как с позиции безопасности, так и эффективности их погашения.

В статье предложено обоснование конструктивных параметров системы разработки подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды при отработке подкарьерной части мощной крутой залежи применительно к месторождению, характеризующегося тектоническим распределением исходного природного поля напряжений в породном массиве [1-11].

Система разработки

Сущность технологии (рис. 1) заключается в отбойке руды в подэтажах вертикальными или крутонаклонными слоями в зажатой среде и её выпуском под обрушенными налегающими породами непосредственно в подэтажные орта (штреки) через их торцы, образующиеся по мере погашения этих выработок.

Выемочный блок разделяется на подэтажи. Высота подэтажа (h) в зависимости от выемки вкрест или по простиранию залежи варьируется от 15 до 30-40 м. В условиях отработки мощных залежей ($m > 20$ м) вкрест простирания (рис. 1 б) h изменяется от 15 до 20 м. При этом высота отбиваемого слоя или секции

($h_{\text{сл}}$) равна двум h т.е. 30 и 40 м, соответственно (панели ромбовидные). При выемки менее мощных залежей ($m < 20$ м) по простиранию отработка, как правило, осуществляется прямоугольными панелями, высотой от 30 до 40 м, т.е. h равна $h_{\text{сл}}$ – 30 и 40 м, соответственно (рис. 1 а).

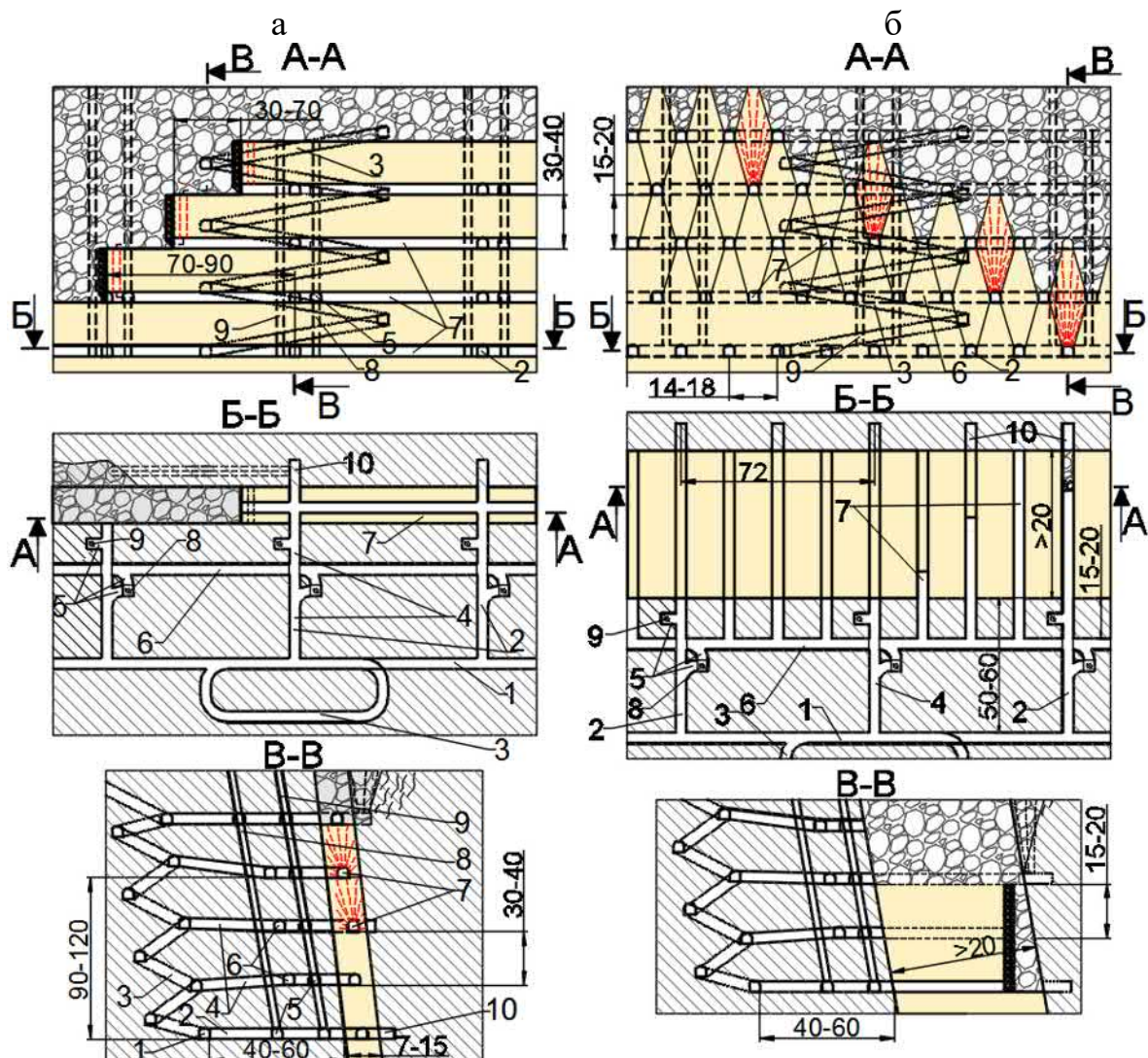


Рис. 1. Технология подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды при ведении очистных работ по простиранию рудной залежи при $m < 20$ м (а) и в крест простирания при $m > 20$ м (б):

1 – полевой откаточный штрек; 2 – полевой доставочный орт; 3 – спиральный съезд; 4 – заезд на подэтаж; 5 – ниша под рудоспуск и вентиляционный восстающий; 6 – полевые подэтажные штреки; 7 – буро-доставочный штрек (орт); 8 – рудоспуски; 9 – вентиляционные восстающие; 10 – буровая камера для погашения пород висячего бока

На начальной стадии выемки формируется компенсационная щель. После этого из буро-доставочных выработок производят бурение вееров восходящих скважин. Взрывание скважин производится слоями (2 веера) на зажатую среду.

Выпуск отбитой горной массы осуществляется в торец погрузочно-доставочной выработки. Для погрузки и транспорта отбитой руды в пределах подэтажа используются самоходные ПДМ, доставляющие ее к рудоспускам или непосредственно на дневную поверхность. При значительном плече доставки предусматривается использование автосамосвалов. Проветривание очистных забоев в буро-доставочных выработках каждого подэтажа выполняется вентиляторами местного проветривания. Выпуск и погрузка отбитой руды производится одновременно из двух-трех очистных забоев, на нескольких подэтажах, чем достигается интенсификация выемки.

Постановка задачи

Рассмотрим влияние отработки подкарьерных запасов технологией подэтажного обрушения на безопасность ведения горных работ для варианта $m > 20$ м с позиции рациональных параметров системы разработки по условию выпуска руды, определяемых:

расстоянием между буро-доставочными ортами (L , м) – $L = \frac{2h}{\operatorname{tg} f} + \frac{3}{2} A$,

толщиной отбиваемого слоя (n , м) – $n \approx \sqrt{\frac{2}{3} \times \frac{h}{\sqrt[3]{1 - R_{\text{пред}}}}} \rho$,

где, ρ – показатель сыпучести, м; h – высота подэтажа, м; A – ширина выработки выпуска, м; $R_{\text{пред}}$ – предельное разубоживание при выпуске, д.ед.; f – угол наклона стороны ромба, град:

$$f = \arctg \left[\frac{2h}{3 \times \left(\sqrt{h\rho} - \frac{A}{2} \right)} \right].$$

Граничные условия области решений примем для тектонически напряженных массивов, характеризующихся, как правило, взбросо-сдвиговым (сложным) механическим режимом нагружения [12-13]:

$$\sigma_{H_{\max}} > \sigma_{h_{\min}} > \sigma_v = 2.0\gamma H > 1.66\gamma H > \gamma H,$$

где, σ_v , $\sigma_{H_{\max}}$, $\sigma_{h_{\min}}$ – вертикальные, max и min горизонтальные напряжения, действующие на месторождении, H – глубина выемки; γ – плотность пород

Задача о нахождении решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, вычислялась методом конечных элементов (МКЭ) в прямой постановке с использованием расчетной схемы в полных напряжениях [14-16]. Физико-механические свойства в расчетах приняты согласно таблица

Физико-механические свойства горных пород

Наименование	Плотность (γ), кг/м ³	Прочность на сжатие ^{**} ($\sigma_{сж}$), МПа	Прочность на растяжение (σ_p), МПа	Сцепление (C), МПа	Угол внутрен- него трения (ϕ), град	Коэффициент Пуассона (μ)	Модуль Юнга [*] (E), ГПа
1. Мемно-серые сланцы	2800	100	14	21,4	52	0,14	7,7
2. Хлорит-серицитовые сланцы	2800	95	14	16,4	48	0,18	5,8
3. Метапесчаники кварцевые	2800	150	20	31,8	55	0,14	13
4. Бедная руда	2800	100	18	23,9	42	0,17	8,5

* – для трещиноватого массива горных пород; ** – из практики известно, что предел прочности пород при объемном сжатии в среднем в 2-2,5 раза выше, чем при одноосном

В качестве критерия устойчивости массива пород, отражающего его напряженно-деформированное состояние, использовалось выражение Кулона-Мора в главных максимальных и минимальных напряжениях [17-21]:

состояние устойчивости – $2C \cos \phi + \sigma_{\min} (1 + \sin \phi) \geq \sigma_{\max} (1 - \sin \phi)$

состояние разрушения – $2C \cos \phi + \sigma_{\min} (1 + \sin \phi) \leq \sigma_{\max} (1 - \sin \phi)$

или

состояние устойчивости – $2C \cos \phi + \sigma_{\max} (\sin \phi - 1) \geq -\sigma_{\min} (1 + \sin \phi)$

состояние разрушения – $2C \cos \phi + \sigma_{\max} (\sin \phi - 1) \leq -\sigma_{\min} (1 + \sin \phi)$

принимая, что

$$\frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} = \sigma_{сж}$$

тогда, для состояния устойчивости пород критерий примет вид:

$$\sigma_{сж} + \frac{\sigma_{\min} (1 + \sin \phi)}{1 - \sin \phi} \geq \sigma_{\max}$$

где, $\sigma_{\max}$ и $\sigma_{\min}$ – максимальные и минимальные главные напряжения, полученные из упругого решения, МПа; C , ϕ и $\sigma_{сж}$ – см. табл.

Для оценки безопасности очистных работ использовался подход анализа конфигурации и размеров зон вероятных разрушений пород, формируемых в элементах технологии выемки с учетом нарушенности горного массива. Последнее варьировалось от малой степени нарушенности ($K_c > 0,5$, где K_c – коэффициент структурного ослабления) до весьма сильной ($K_c < 0,25$).

Оценка безопасности работ при подэтажной выемке с обрушением

К рассмотрению принята горнотехническая ситуация, при которой выемка руды ведется одновременно на трех смежных по высоте подэтажах, причем фронт отработки верхнего подэтажа опережает нижний: – по простиранию на

ширину 2-х панелей; вкрест простирания в зависимости от мощности залежи на 15,0-25,0 м.

Добычные работы на рассматриваемых верхнем и нижнем смежных подэтажах обеспечивают погашение соответственно половины запасов и начало отработки очистных (ромбовидных) панелей. Параметры системы разработки соответствовали рациональным показателям полноты и качества извлечения руды, что позволило при моделировании варьировать мощностью залежи (m), высотой подэтажа (h) и расстоянием между буро-доставочными ортами (L).

На рис. 2 показан общий вид рассматриваемой горнотехнической конструкции отработки подкарьерных запасов системой подэтажного обрушения с распределением в массиве пород минимальных главных напряжений σ_3 .

На рис. 3-4 приведены фрагментарные результаты оценки устойчивости пород в элементах технологии в зависимости от мощности залежи, высоты подэтажа и глубины выемки для массивов с разной степенью нарушенности.

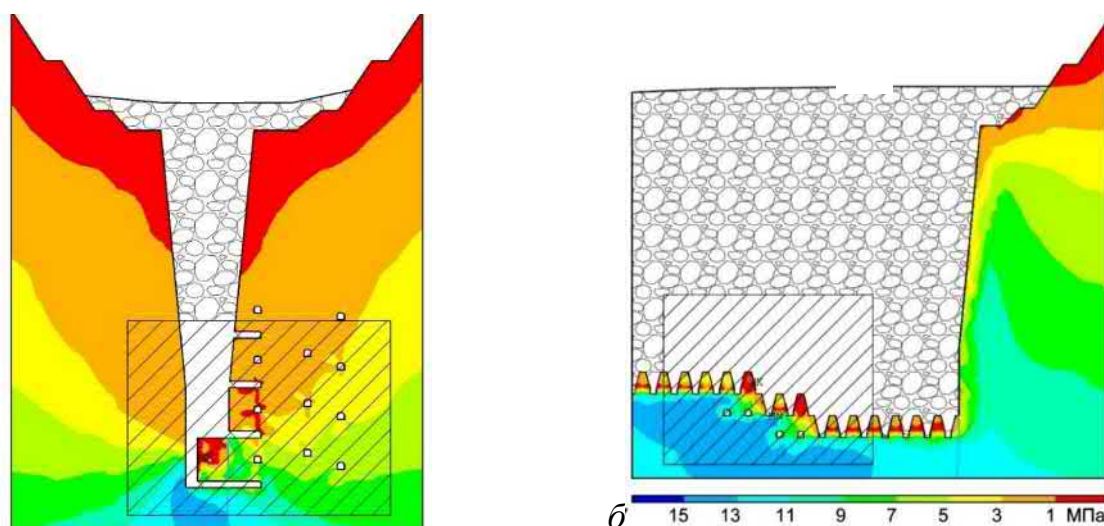


Рис. 2. Общая картина характера распределения минимальных главных напряжений σ_3 в вертикальном разрезе вкрест простирания по центру очистной (ромбовидной) панели нижнего подэтажа (а) и по простиранию залежи в области влияния очистного забоя в 4,0 метрах от отбитого слоя верхнего подэтажа (б) при выемке рудного тела системой подэтажного обрушения

На графике (рис. 5) показаны закономерности, устанавливающие связь расстояния между буро-доставочными ортами с глубиной разработки в зависимости от структурного ослабления массива горных пород, при которых обеспечивается требуемая устойчивость выработок горизонта выпуска и доставки.

Прогнозируемые области возможных обрушений пород в условиях меняющейся мощности и глубины ведения очистной выемки свидетельствуют о широком диапазоне устойчивости конструктивных элементов системы разработки в зависимости от нарушенности горного массива.

Учитывая принятое исходное поле напряжений, соответствующее тектонической модели геосреды, максимальными по величине будут являться

горизонтально ориентированные напряжения. Результаты расчетов НДС массива пород при выемке ромбовидных панелей вкрест простирания рудной залежи показали следующее.

1. Величины максимальных главных напряжений σ_1 в конструктивных элементах системы разработки изменяются: в области очистных забоев от 15,0 до 40,0 МПа; в кровле и бортах буро-доставочных ортов от 20,0 до 40,0 и более МПа; кровля и борта доставочных подэтажных штреков, обслуживающих очистные работы, испытывают сжимающие усилия соответственно в диапазоне 18,0-30,0 и 12,0-25,0 и более МПа; спиральный съезд (автоуклон), удаленный от залежи на расстояние 45,0-50,0 м, находится в условиях объемного сжатия, усилие σ_1 в кровле выработки достигает 30,0 МПа, в бортах – 10,0-25,0 МПа.

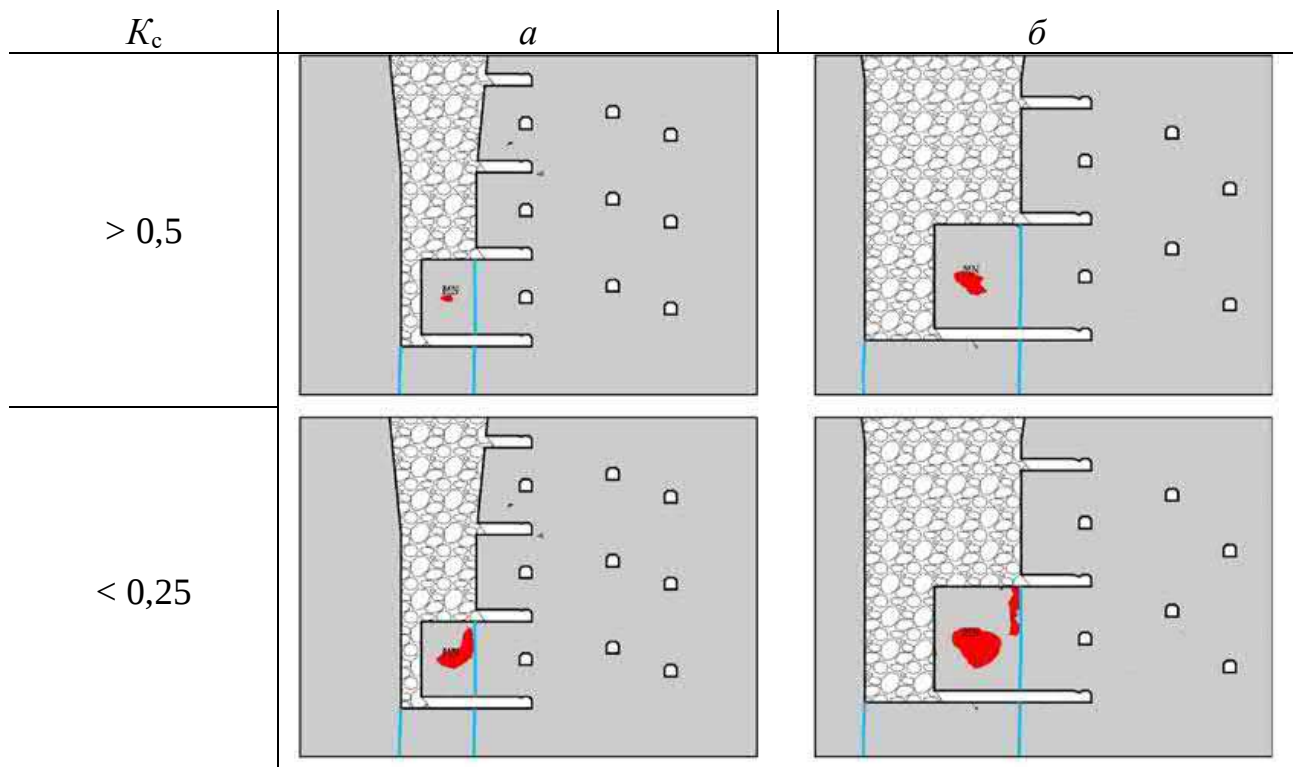


Рис. 3. Прогнозируемые участки потери устойчивости массива горных пород (выделены цветом) в конструктивных элементах системы подэтажного обрушения в разрезе см. рис. 2 в зависимости K_c : *a* – для $m = 26,0$ м, $h = 15,0$ м и $H = 200$ м; *б* – для $m = 55,0$ м, $h = 20,0$ м и $H = 300$ м

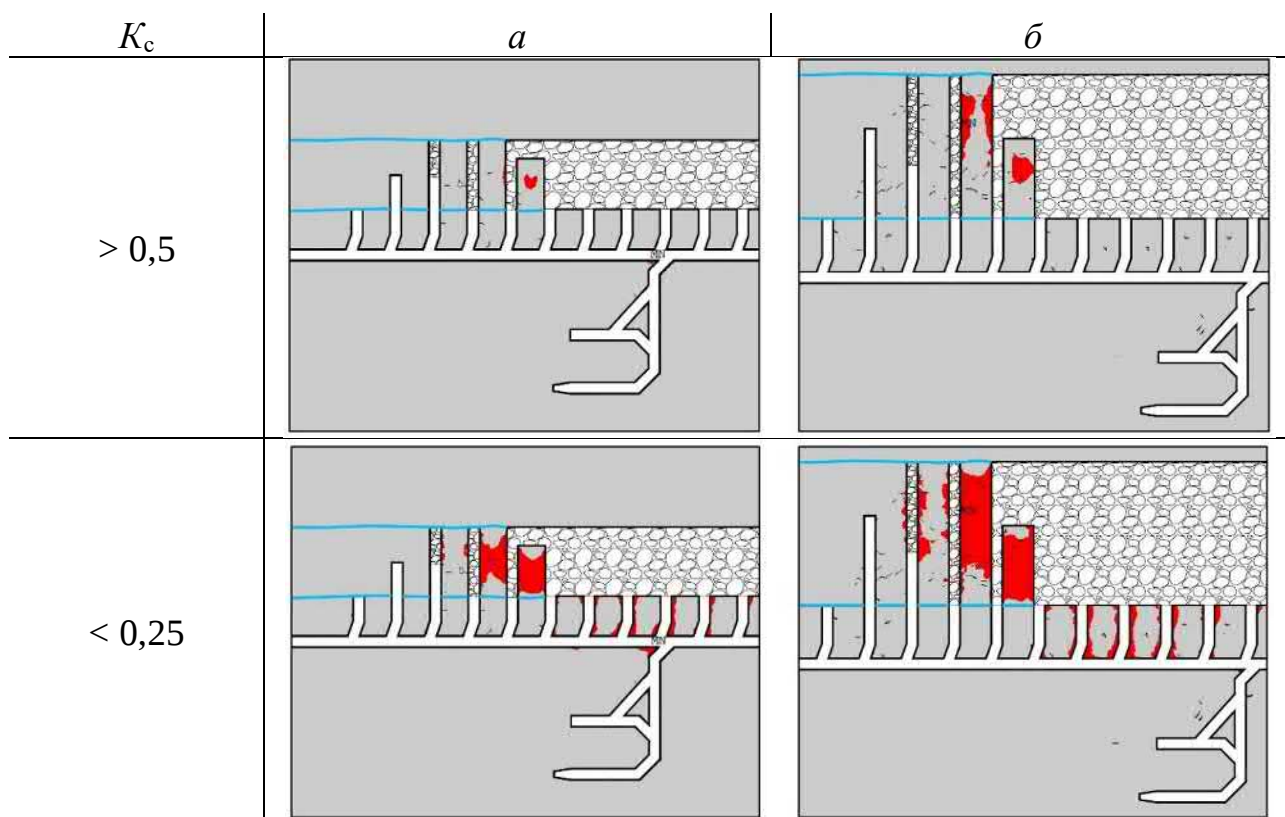


Рис. 4. Прогнозируемые участки потери устойчивости массива горных пород в элементах системы подэтажного обрушения в плане горизонта выпуска и доставки верхнего подэтажа в зависимости от K_c : *a* – для $m = 26,0$ м, $h = 15,0$ м и $H = 200$ м; *б* – для $m = 55,0$ м, $h = 20,0$ м и $H = 300$ м

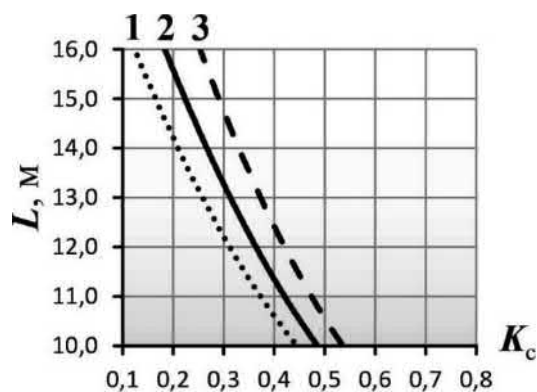


Рис. 5. Зависимость расстояний между буро-доставочными ортами от степени нарушенности массива пород (K_c) и глубины разработки:
1 – $H = 200$ м; 2 – $H = 300$ м;

2. Величины минимальных главных напряжений σ_3 в вышеописанных элементах системы разработки составляют соответственно: в области очистных забоев от $-2,0$ ("-" показывает возникновение растягивающих усилий) до $15,0$ МПа, в кровле и бортах буро-доставочных ортов соответственно $5,0$ - $12,0$ МПа и $4,0$ -

8,0 МПа; кровля и борта доставочных подэтажных штреков испытывают σ_3 в диапазоне соответственно от -2,0 (в местах сопряжения с буро-доставочными ортами) до 9,0 МПа и от 4,0 до 8,0 МПа; для спирального съезда значения усилий σ_3 не превышают величин 10,0 МПа. Зоны растяжения (до -2,0 ÷ -3,0 МПа) распространены на сопряжениях доставочных подэтажных штреков с буро-доставочными ортами (в одинаковой степени в кровле и бортах выработок). Области с растягивающими нагрузками также представлены в виде локальных участков в "теле" ромбовидной панели, особенно на границах контакта отбиваемого слоя с выработанным пространством. Возникновение растягивающих напряжений в залежи отбиваемых слоев, бортах и кровле буро-доставочных штреков, находящихся в области ведения очистных работ, отрицательно сказывается на их устойчивости и обуславливает прогнозирование потери устойчивости горных выработок.

3. Характер распределения максимальных касательных напряжений $\tau_{\max}$ на качественном уровне повторяет закономерности распределения напряжений σ_1 . Величины сдвигающих усилий в кровле и бортах буро-доставочных ортов составляют соответственно 5,0-15,0 МПа и 3,0-12,0 МПа, подэтажных доставочных штреков – 3,0-15,0 МПа и 2,0-12,0 МПа, автоуклона – до 12,0 МПа и 10,0 МПа, на сопряжениях подэтажных выработок $\tau_{\max}$ достигают значений до 15,0 МПа и более.

Установлено, что, в целом, в одинаковой степени локальному разрушению подвержены борта и кровля буро-доставочных ортов, полевых подэтажных штреков и особенно их сопряжения, а также сбойки, попадающие в область влияния очистной выемки. Также, в близком к запредельному состоянию относятся области массива пород в зоне отбиваемых слоев, где наиболее вероятно ожидать потерю их устойчивости и интенсивного трещинообразования – участки влияния очистной выемки обрабатываемой панели. Все эти элементы горнотехнической конструкции – сопряжения, а в некоторых случаях и собственно буро-доставочные орты, а также подэтажные полевые штреки подлежат обязательному креплению, как индивидуальными, так и комбинированными крепями.

Заключение

1. Как показали исследования, а также, что и демонстрирует мировой опыт подэтажная выемка с обрушением достаточна адаптирована практически ко всему диапазону горно-геологических и геомеханических условий разработки месторождений. В ситуации постоянного удорожания добычи руд, что характерно для систем с закладкой, освоение данной технологии является весьма конкурентоспособным направлением для развития многих рудников при переходе от открытых горных работ к подземным.

2. Установлены общие закономерности распределения напряжений и формирования вероятных областей потерь устойчивости пород вокруг выработок с разной степенью интенсивности их проявления в зависимости от степени нарушения горного массива. Так, в наиболее неблагоприятных условиях

находятся очистные забои и большая часть длины буро-доставочных ортов, которые проявляются с ростом нарушенности пород и глубины выемки.

3. По результатам исследований были рекомендованы следующие конструктивные параметры и элементы выемки.

- высота подэтажа – 14,0-20,0 м. С глубиной от дна карьера более 200,0 м высота подэтажа – не менее 16,0 м;

- высота отбиваемого слоя – соответствует двойной высоте подэтажа (ромбовидная панель) и составляет – 28,0-40,0 м;

- расстояние между буро-доставочными ортами – в зависимости от высоты подэтажа и глубины выемки не менее 13 м и 16,0 м;

- расстояние от подэтажных доставочных (полевых) штреков до рудной залежи – не менее 15,0 м и 20,0 м соответственно до глубин 200,0 и более 300,0 м от дна карьера;

- опережение по простиранию залежи фронта выемки вышележащего подэтажа относительно нижележащего – не менее ширины 2-х панелей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никольский, А. М. Технология подземной отработки подкарьерных запасов в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях [текст] / А. М. Никольский, А. А. Коваленко, М. В. Тишков, С. А. Неверов, А. А. Неверов // Монография, отв. ред. В. И. Клишин. – Новосибирск: Наука, 2017. – 328 с.

2. Soltani Khaboushan, A., Osanloo, M., Esfahanipour, A. Optimization of open pit to underground transition depth: An idea for reducing waste rock contamination while maximizing economic benefits // *Journal of Cleaner Production*, 2020, No. 277, 123530

3. Лобанов Е.А., Чайкин Д.А., Меньшиков П.Ю. Разработка технологических решений вскрытия и отработки прибортовых и подкарьерных запасов апатито-нефелиновых руд // *Фундаментальные и прикладные науки в горном деле*. – 2018 – Т. 5 – № 1 – С. 88–93.

4. Xu, S., Suorineni, F.T., An, L., Li, Y.H., Jin, C.Y. Use of an artificial crown pillar in transition from open pit to underground mining // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, No. 117, pp. 118-131

5. Макаров А.Б. Оценка влияния карьера на законтурный массив и условия совмещения открытой и подземной повторной разработки пологих залежей // В кн.: Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу / Сборник X Международной конференции, 2019: – Магнитогорск: МГТУ, 2019, с. 122-127.

6. Голик В.И. Исследование безопасности параметров системы разработки с обрушением / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, Н.М. Качурин, В.И. Ляшенко // *Безопасность труда в промышленности*. – 2020. – № 1. – С. 16-20.

7. Голик В.И. Совершенствование параметров выпуска руд при подэтажном обрушении с торцовым выпуском / В.И. Голик, А.А. Белодедов, А.В. Логачев, Д.Н. Шурыгин // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2018. – № 1. – С. 150-159.

8. Jakubec, J. Underground Mining at Ekati and Diavik Diamond Mines / J. Jakubec, R. Woodward, B. Boggis, L. Clark, P. Lewis // *11th International Kimberlite Conference, Botswana, 2017*. – Page. 87-91.

9. Balek, A., Sashourin, A. In-situ rock mass stress-state measurements in scales of mineral deposits: Problem-solving // *E3S Web of Conferences*, 2018, No. 56, 02004.

10. Барышников В. Д., Гахова Л. Н. Параметры рудной потолочины при переходе от открытой к подземной отработке месторождений // *Proceedings of the VI-th International*

Geomechanics Conference, 24 – 28 June 2014, Publ.: International House of Scientists “Fr. J. Curie”, Varna, Bulgaria.

11. Шоков А.Н. Геомеханическое обоснование параметров предохранительного целика при комбинированной открыто-подземной отработке Ньюпахкского месторождения / А.Г. Протосеня, А.Н. Шоков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – Екатеринбург, 2014, № 2, с. 54-58.

12. Wang, S., Yang, L., Cheng, H., (...), Shan, W., Yuan, J. Effect of basement structure on the spatial distribution of gold deposits: Structure stress transfer modeling of Jiaojia fault // Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(5), pp. 1529-1546

13. Meggitt, J.W.R., Moorhouse, A.T. Finite element model updating using in-situ experimental data // Journal of Sound and Vibration, 2020, No. 489, 115675.

14. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. & Zhu, J.Z. (2005). The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Butterworth-Heinemann, 6th edn.

15. Xue Zhang, BEng, MEng. Particle Finite Element Method in Geomechanics / Faculty of Engineering and Built Environment. The University of Newcastle, September 2014. Australia <https://www.researchgate.net/publication/301351333>.

16. B. Ilyasov. Prediction of rock movements using a finite-discrete element method / B. Ilyasov, A. Makarov I. Biryuchiov // EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium – London: CRC Press, 2018. – Vol. I, p. 805.

17. A. Makarov. Rock mechanics of pillars extraction / A. Makarov, D. Mosyakin // EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium – London: CRC Press, 2018. – Vol. I, p. 1046.

18. Фрейдин А. М., Неверов С. А., Неверов А. А., Конурин А. И. Геомеханическая оценка геотехнологий подземной добычи руд на стадии проектных решений // Горный журнал. – 2016. – № 2. – С.39-45.

19. Brzovica, A. Rock Mass Characterization and Assessment of Block-Forming Geological Discontinuities during Caving of Primary Copper Ore at the El Teniente Mine, Chile / A. Brzovica, E. Villaescusa // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. –2007. – Vol. 44. P. 565-583.

20. Brown, E.T. Block Caving Geomechanics / E.T. Brown // International Caving Study 1997-2004. Indooroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, the University of Queensland. – 2007. – 535 page.

21. Lelovic, S., Vasovic, D. Determination of mohr-coulomb parameters for modelling of concrete // Crystals, 2020, 10(9), 808, pp. 1-16.

© С. А. Неверов, А. И. Конурин, Ю. Н. Шапошник, 2021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗЕМЕЛЬ КАК ЧАСТЬ ЦИФРОВИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Наталья Анатольевна Немова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, д.54, , к.т.н., старший научный сотрудник, тел. 89628426717, e-mail: nemova-nataly@mail.ru

Александр Владиславович Резник

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, д.54, , к.т.н., научный сотрудник, тел. 89231145306, e-mail: a-reznik@mail.ru

Владимир Николаевич Карпов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, д.54, , к.т.н., старший научный сотрудник, тел. 89538784334, e-mail: karpov@misd.ru

Показано, что масштабы нарушения земель при недропользовании возрастают, что ведёт к росту отрицательного влияния на окружающую среду и угрозам полной потери ценности земли. Рассмотрены вопросы рекультивации нарушенных земель в России и за рубежом. Отмечено, что законодательством предусмотрены технический и биологический этапы их восстановления. Предложено дополнительно учитывать рекреационно-строительный этап рекультивации, целью которого является повторное использование площадей карьеров, отвалов и терриконов для промышленного и гражданского строительства, создания рекреационных зон, искусственных водоемов. Для моделирования работ по рекультивации возможно применение стандартных программных средств, позволяющих визуализировать и исследовать объекты восстановления. Широко реализуемая в настоящее время концепция масштабной цифровизации месторождений позволяет предложить и оценить меры по уменьшению экологического вреда пользователей недр и земель посредством внедрения принципов «зеленой экономики».

Ключевые слова: рекультивация, нарушенные земли, экологическая безопасность, цифровизация, моделирование, «зеленая экономика»

MODELING THE PROCESS OF LAND RESTORATION AS PART OF THE DIGITALIZATION OF DEPOSITS

Natalya A. Nemova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasny pr. 54, Novosibirsk, 630091, Russia, candidate of Technical Sciences, senior researcher ,phone: 89628426717, e-mail: nemova-nataly@mail.ru

Aleksander V. Reznik

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasny pr. 54, Novosibirsk, 630091, Russia, candidate of Technical Sciences, research associate, phone: 89231145306, e-mail: a-reznik@mail.ru

Vladimir N. Karpov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasny pr. 54, Novosibirsk, 630091, Russia, candidate of Technical Sciences, senior researcher, phone: 89538784334, e-mail: karpov@misd.ru

It is shown that the scale of land disturbance during subsurface use increases, which leads to an increase in the negative impact on the environment and the threat of complete loss of land value. The issues of recultivation of disturbed lands in Russia and abroad are considered. It is noted that the legislation provides for the technical and biological stages of their restoration. It is proposed to additionally take into account the recreational and construction stage of recultivation, the purpose of which is to reuse the areas of quarries, dumps and landfills for industrial and civil construction, the creation of recreational zones, artificial reservoirs. For the simulation of remediation works, it is possible to use standard software tools that allow you to visualize and study the objects of restoration. The currently widely implemented concept of large-scale digitalization of deposits allows us to propose and evaluate measures to reduce the environmental harm of users of subsurface resources and land through the introduction of the principles of the "green economy".

Keywords: reclamation, disturbed land, environmental safety, digitalization, modeling, "green economy"

Введение

Опыт рекультивации нарушенных земель за рубежом

Вопросы о рекультивации земель нарушенных горнодобывающими предприятиями территорий ставились еще 100–150 лет назад, сначала в государствах Европы, Америки, а затем и в Советском Союзе. После второй мировой войны проблема охватила многие страны и превратилась в целое научно-техническое направление. Первые работы по рекультивации земель в США были проведены в 1926 году на участках, нарушенных горными работами (штат Индиана). Широкое развитие в Европе и США рекультивация получила в предвоенные годы и главным образом после второй мировой войны. В настоящее время успешная работа по рекультивации бурогоугольных и каменноугольных разработок проводится в Германии, Польше, Англии, США и других странах [1]. Активно ведутся работы и в других горнодобывающих отраслях.

Рекультивация нарушенных земель в России

В России в 1912 г. на территории нынешней Владимирской области на участках заброшенных торфоразработок были поставлены опыты по их окультуриванию и выращиванию сельскохозяйственных растений. Рекультивацию земель в Советском Союзе начали проводить на отработанных месторождениях в угольной промышленности (Донбасс) с 1956 года, железорудной и горно-химической – с 1958 г., в цветной металлургии и промышленности строительных материалов – в 60-е годы. Законодательно рекультивацию земель, нарушенных открытыми горными работами, начали регламентировать с начала 70-х годов с утверждением «Основ земельного законодательства СССР и союзных республик» и ряда ведомственных постановлений. В настоящее время по проведению рекультивации имеется много различных документов, инструкций и руководств [1].

Текущие масштабы нарушения земель достигли таких размеров, что их рекультивация стала составной частью комплекса мероприятий по охране окружающей среды и рациональному использованию земельных ресурсов, включая расширение их продуктивного использования.

В современных реалиях происходит ухудшение состояния земельных ресурсов и снижается плодородие почв, что может привести к экологическим последствиям, включая катастрофические. При открытой разработке месторождений полезных ископаемых происходит максимальное по сравнению с другими отраслями нарушение территории. Это способствует потере ценности земли и отрицательному влиянию на окружающую природную среду.

Степень и интенсивность антропогенного воздействия на экосистемы, прежде всего, сказывается на растительном покрове, который претерпевает наиболее зримые прямые и косвенные изменения. Горные разработки уничтожают целые лесные, луговые и болотные массивы, соответствующие биологические сообщества, популяции различных видов растений и животных, в том числе редких и подлежащих охране. Если растительность сразу не уничтожается, в ней происходят антропогенные смены, также ведущие постепенно к деградации естественного растительного покрова.

Экологические исследования промышленных районов показали, что на отработанных месторождениях часто проводится только горнотехническая рекультивация, т.е. планировка площадей, или «противоэрозионная» отсыпка отвалов более грубообломочным материалом для предотвращения их размыва паводковыми водами [1].

Для получения экологически безопасной продукции растениеводства и животноводства необходимо использовать принцип экологической рационализации, включающий разработку и практическое использование специальных систем, технологий и способов.

Для более точного понимания приведем связь понятий земли, нарушений и рекультивации земли (рис.1), представленных в [2].

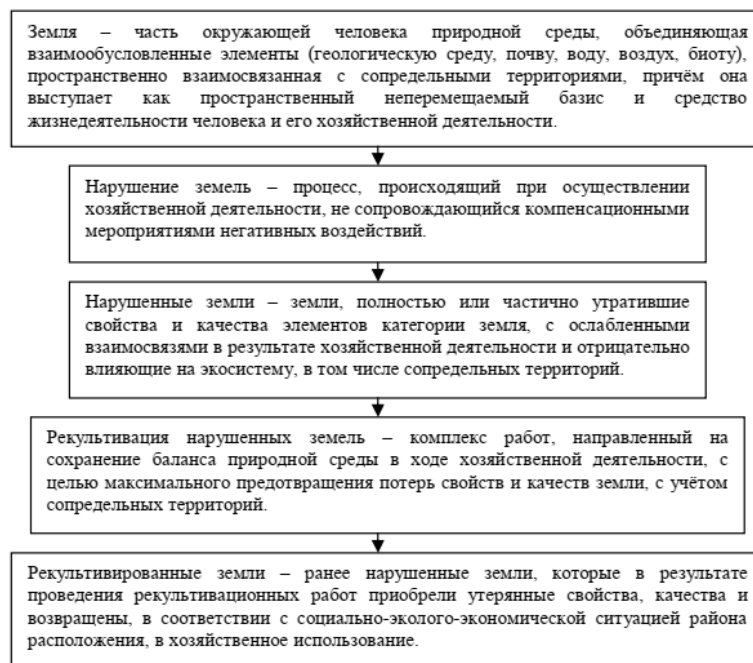


Рис. 1. Взаимосвязь понятий земля, нарушение и рекультивация земли, нарушенные и рекультивированные земли [2]

Обобщая изложенное сформулируем цель исследования – изучить эффективность применения цифрового моделирования при проектировании и планировании рекультивации нарушенных земель для последующего использования при обосновании параметров технологий, ориентированных на восстановление свойств компонентов нарушенной человеком в процессе природопользования окружающей среды и позволяющих улучшить её экологическое состояние.,

Методы и материалы, предмет и объект исследования

Методы исследования: системный анализ научно-технической литературы, законодательных, нормативных и фондовых информационных источников по изучаемой проблеме. Синтез разработанных актуальных подходов и методов сравнительного и структурного изучения объектов. Выборочное исследование объектов, учитывающее реальные условия природо- и недропользования. Обобщение опыта использования современных технологических комплексов и организационных мер по восстановлению нарушенных земель.

Объектом исследования являются нарушенные горными работами земли. При открытой разработке месторождений полезных ископаемых рекультивации подлежат: карьерные выемки; воронки провалов поверхности; терриконы; отвалы и другие отвальные комплексы; земли, нарушенные при строительных работах и в результате загрязнения их жидкими и газообразными отходами; территории полигонов твердых отходов.

Результаты

В настоящее время восстановление нарушенных земель осуществляют последовательно, поэтапно согласно нормативных требований [3-4].

Техническая рекультивация – предварительная подготовка нарушенных территорий для различных видов использования. В состав работ входят: планировка поверхности, снятие, транспортировка и нанесение плодородных почв на рекультивируемые земли, формирование откосов выемок, подготовка участков для освоения и т.п. На данном этапе рекультивации засыпают карьерные, строительные и другие выемки, в глубоких карьерах устраивают водоемы, полностью или частично разбирают терриконы, отвалы, закладывают “пустыми” породами выработанные подземные пространства. После завершения процесса осадки поверхность земли выравнивают.

Биологическая рекультивация проводится после технической для создания растительного покрова на подготовленных участках. С ее помощью восстанавливают продуктивность нарушенных земель, формируют зеленый ландшафт, создают условия для обитания животных, растений, микроорганизмов, укрепляют насыпные грунты, предохраняя их от водной и ветровой эрозии, создают сенокосно-пастбищные угодья и т.д. Работы по биологической рекультивации ведут на основе знания развития сукцессионных процессов, основанных на последовательной закономерной смене одного биологического сообщества, например, фитоценоза, другим на определенном участке среды во времени в результате влияния природных факторов (в том числе внутренних сил) или воздействия человека.

Авторы предлагают этап рекреационно–строительной рекультивации нарушенных земель, заключающийся в использовании площадей карьеров, отвалов и терриконов для промышленного и гражданского строительства, для создания рекреационных зон, искусственных рыбоводческих водоемов (рис. 2).

В состав основных работ при проведении технического этапа рекультивации нарушенных земель входят [5], первоначальная и чистовая планировка поверхности; очистка поверхности от крупногабаритных обломков, мусора, производственных конструкций и бытовых отходов, строительного мусора с последующей их переработкой или складированием; уборка всей техники и устройств на отработанной местности; строительство подъездных маршрутов к рекультивируемым участкам, устройство въездов и дорог на них с учетом прохода спецтехники; укрепление откосов, ликвидация насыпей; создание и улучшение структуры рекультивационного слоя; осушение/орошение токсичных пород и загрязненных почв, если невозможна их засыпка слоем потенциально плодородных земель; создание при необходимости экранирующего слоя; покрытие поверхности потенциально плодородными слоями почвы; противоэрозионная организация местности. Основные работы биологического способа рекультивации включают отбор проб для химического анализа; составление технологической карты рекультивации; обработку рекультивируемой территории биопрепаратами в соответствии с технологической картой; обработку растений биопрепаратами; фенологические наблюдения и почвенные анализы; оценку эффективности обработки; отбор проб растений для анализа рисков выноса вредных веществ и тяжелых металлов в окружающую среду.



Рис. 2. Этапы рекультивации с перечнем необходимых мероприятий

При благоприятных условиях процесс рекультивации нарушенных земель осуществляют не по всем этапам, а выбирают какое-либо одно преимущественное направление: водохозяйственное, рекреационное и др. В таблице рассмотрены направления рекультивации и возможный вид использования рекультивационных земель.

Использование рекультивированных земель в зависимости от направления рекультивации

Направление рекультивации	Вид использования рекультивированных земель	Этапы рекультивации
Лесохозяйственное	Лесопитомники, лесонасаждения общего хозяйственного и полевосащитного направления	Рекультивация земель состоит из двух этапов: ✓ Технический; ✓ Биологический
Сельскохозяйственное	Сенокосы, пастбища, многолетние насаждения, пашни, садовые и огородные участки	
Водохозяйственное	Водоемы различного назначения, включающие рыбоводческие	Рекультивация земель состоит из технического этапа.
Рекреационное	Водоемы для оздоровительных целей, зоны отдыха, туристические базы и спортивные сооружения	
Санитарно-гигиеническое	Насаждение газоустойчивых растений, участки законсервированные или закрепленные техническими средствами	
Строительное	Здания, сооружения и другие объекты промышленно-гражданского или иного назначения. Размещение отходов производства, полигонов хранения мусора.	

Этапы лесохозяйственного и сельскохозяйственного направлений рекультивации будут включать следующие виды работ: планировка, формирование откосов, захоронение токсичных вскрышных пород (технический); снятие и нанесение плодородного слоя почвы на подготовленную поверхность в результате выполнения технического этапа, внесение органического и минерального удобрений, агротехнические и фитомелиоративные мероприятия (биологический).

Этапы водохозяйственного, рекреационного, санитарно-гигиенического, строительного направлений рекультивации будут включать следующие виды работ: приведение земель в состояние, пригодное для строительства; приведение

нарушенных земель в состояние, пригодное для использования в природоохран-ных целях; биологическая и техническая консервация нарушенных земель, оказы-вающих отрицательное воздействие на окружающую среду, рекультивация которых экономически не эффективна; создание в понижениях техногенного ре-льефа рыбоводческих или иных водоемов.

Рекультивации могут подлежать выемки карьеров, торфоразработки, пород-ные отвалы шахт и карьеров, площадки буровых скважин и т.п. Рекультивация в условиях постоянно увеличивающейся площади нарушенных земель приобре-тает большое социально-экономическое и экологическое значение, позволяет вернуть нарушенные земли в состав сельскохозяйственных угодий, использовать их под леса, водоемы, зоны отдыха, жилищное и промышленное строительство.

Инструментами моделирования могут выступать различные программные средства. В их числе могут быть [6]: Agisoft PhotoScan; PHOTOMOD; Bentley Mi-croStation; Micromine; AutoCAD; UnrealEngine4. Их использование позволяет про-ектировать наглядные модели поведения среды в процессе рекультивации. И пусть на сегодняшний момент не существует метода точного прогнозирования протека-ния этого процесса, модели, построенные на оценках экспертов, помогают лучше предположить, как будет меняться внешний вид территории бывших объектов гор-нодобывающей промышленности в динамике. Развитие работ в этом направлении, возможно, позволит создать программные решения, позволяющее делать макси-мально точные прогнозы процесса рекультивации без использования предположе-ний экспертов, которые, в свою очередь, бывают недостоверны или ошибочны.

Для выявления важности и необходимости использования средств компью-терной графики при опережающем планировании рекультивационных работ по восстановлению земной поверхности от деятельности карьеров предлагают при-менить 3D моделирование и визуализацию относительно отработанных площа-дей разреза [7]. Планирование рекультивационных работ и выбор способа сни-жения ущерба от нарушения территорий в значительной степени зависит от условий физико-химического состава субстрата и возможности его утилизации, способности его к самозарастанию и от направления рекультивации.

В [7] предлагается функциональная модель, позволяющая управлять дей-ствиями восстановления земель, нарушенных горными работами, основанная на информационно-аналитическом анализе. В алгоритме, описывающем рассматри-ваемый процесс, учитывается основанное на комплексной оценке определенных условий экспозиции естественное зарастание терриконов от крутизны склона, плодородия почв, накопления снега, давности отсыпки.

Применение 3D моделирования и визуализации на стадии проектирования всех этапов рекультивации позволяет наглядно решить вопросы о правильности выбора способов и методов рекультивации; с высокой точностью определить объемы и формы нарушений земной поверхности; рассчитать требуемые объемы планируе-мых работ на техническом этапе рекультивации; на биологическом этапе в искус-ственно сжатые сроки наглядно увидеть и экономически обосновать результаты всех последовательных этапов принятия решений от момента обследования терри-тории до окончания работ, которые в реальном времени занимают много лет [8].

Обсуждение

Создание «умных месторождений» позволяет вести непрерывную оптимизацию и управление основными и вспомогательными процессами разработки. Принципом функционирования «умных месторождений» является объединение технологий измерения, контроля и управления в реальном времени, формирования и обработки непрерывного информационного потока, позволяющего оперативно реагировать потенциально на любую ситуацию с принятием оптимальных решений.

Цифровизация месторождения с созданием 3D моделей необходима для более объективного представления о состоянии массива и его изменении во времени. Работа с моделями объектов осуществляется средствами геоинформационных систем, реализующих инструменты хранения и обработки пространственно-распределенной информации, ее визуализации в удобном для анализа виде [10]. Полномасштабная цифровизация горнодобывающего предприятия способна обеспечить синергетический эффект не столько за счет минимального повышения эффективности отдельных элементов горнотехнической системы, сколько за счет обеспечения оптимизированной взаимосвязи между ними [10].

Переход к принципам «зеленой» экономики необходимо рассматривать как модернизацию горнодобывающей отрасли в рамках создания и реализации концепций «умных месторождений» [11-12]. При этом существуют сложности перехода, и здесь сдерживающим фактором будет являться инерционность процессов развития. С одной стороны, необходима государственная поддержка предприятий, перестраивающих технологический процесс с целью обеспечения долговременного социально-экономического развития на основе снижения антропогенной нагрузки на природные среды, с другой необходима координация на региональном уровне усилий государственных органов власти и горнорудных компаний с целью разработки новых концептуальных подходов к совершенствованию механизма управления «зеленой» экономикой.

В рамках вышеуказанных принципов горнодобывающим компаниям необходимо внедрять экологически ориентированные технологии. Факт существования «зеленой» экономики благоприятен для природной среды и населения горнодобывающих регионов России. Для дальнейшего развития положительного эффекта от внедрения «зеленой» экономики необходима диверсификация добывающих регионов, их переход к экономике знаний. В свете мировых природоохранных тенденций суть модернизации экономики все больше определяется как обеспечение технологического процесса для долговременного социально-экономического развития на основе снижения экологических рисков и поддержания благоприятной окружающей среды [13-19].

Заключение

Рост масштабов недропользования ведёт к усилению его отрицательного влияния на окружающую среду и угрозам частичной или полной потери ценности нарушенных земель. Высокие и постоянно возрастающие затраты на

проведение работ по рекультивации в условиях ужесточения «зелёных» требований со стороны общества предполагают объективную необходимость поиска различных резервов их снижения и оптимизации.

Учёт дополнительного рекреационно-строительного этапа рекультивации нарушенных земель позволяет более объективно дифференцировать их значимость с точки зрения последующего направления возврата и использования в хозяйственном обороте.

Моделирование процессов рекультивации нарушенных горным производством земель в рамках концепции «умное (цифровое)» месторождение способствует более точному прогнозированию характера влияния пользователей недр на окружающую среду и условий уменьшения экологического вреда от их деятельности.

Сегодня уже нельзя ограничиваться только восстановлением нарушенного массива (рельефа), плодородия земель, созданием растительного покрова, а важно восстанавливать и другие компоненты геосреды, например, подземную и наземную гидросферу, биологическое разнообразие, эндогенные и экзогенные геологические процессы, воздействующие на геологическую среду на данной территории. Необходима комплексная рекультивация, а точнее рекультивация природной среды и настоящий уровень научно-технического прогресса позволяет эффективно восстанавливать нарушенные земли и возвращать их в сельскохозяйственное и др. использование.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шинкин Р.С. К вопросу об истории развития рекультивации // Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2014. – С. 132-140.

2. Власова Е.Я., Гавриловская М. А., Бардук К.Н. Трансграничное природопользование: пространственный и экосистемный подходы к исследованию (на примере ПХК Свердловской области) // Известия Уральского государственного экономического университета. – 2006. – №3(15). С.161-169.

3. О рекультивации земель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы» и Основных положений о рекультивации земель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы. [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ от 10 июля 2018 г. N 800. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

4. Саакян Ю.З., Григорьев А.В., Васенькина Е.Ю., Кравец Е.А., Фадеев А.М. Направления совершенствования экологического законодательства Российской Федерации в угольной отрасли на основе анализа опыта ведущих угледобывающих стран // Уголь. 2020. №11. С.58-63.

5. Сонин П. В., Садырин В. А. Моделирование процесса рекультивации объектов горнодобывающей промышленности // Россия молодая: Сборник материалов XII Всерос. научно-практической конференции с международным участием, 21-24 апр. 2020 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: С. Г. Костюк (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово, 2020. – С.21190.1–21190.4.

6. Аксенова О. Ю., Овсянникова Е. А., Пачкина А. А. Использование средств трехмерной графики при планировании рекультивационных работ // Кибернетика и программирование. – 2017. – №5, С.54-63.
7. Аняннова Е.В., Воронов М.П., Кох Е.В. Системный анализ и компьютерное моделирование процесса восстановления земель при угледобыче // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Том 9, №6. – С. 1–9.
8. Руководство по проектированию бортов карьера, под редакцией: Джон Рид, Питер Стейси. Пер.с англ. – Екатеринбург: Правовед, 2015. – 544с.
9. Лютягин Д. В., Яшин В. П., Забайкин Ю. В., Якунин М. А. Особенности и тенденции цифровой трансформации российской горнодобывающей отрасли // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2019. – Том 9, № 7А. – С. 147-159.
10. Рыльников А. Г. Пыталев И. А. Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли: технические решения и технологические вызовы // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2020. – вып.1. – С. 470-481.
11. Самарина В.П., Скуфьина Т.П. «Зеленая экономика» горнодобывающих регионов России: факты и тенденции //ГИАБ (Специальный выпуск). – 2015. –С.267-272.
12. Шпинев Ю.С. Правовые основы «зеленой» экономики // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 23 (декабрь). С. 1322-1331. DOI: 10.18411/1311-1972-2020-00018
13. Наумов И.В., Савченков С.С. Моделирование пространственных особенностей развития процессов нарушения и рекультивации земель // Вестник УрФУ. Серия экономика и управление. – 2019. – Том 18, № 6. – С. 802–825.
14. Transforming Mining Pits into a Lake District // <https://www.mikepoweredbydhi.com/global/references/emea/overview/transforming-mining-pits-into-a-lake-district>
15. Янин Е.П. Особенности воздействия на окружающую среду разработки урановых месторождений // М.: ВИНТИ. Выпуск №2, 2019. С. 1537.
16. Янин Е.П. Оценка воздействия разработки месторождений нефти и газа на окружающую среду // М.: ВИНТИ. Выпуск №3, 2019. С. 33110.
17. Янин Е.П. Оценка влияния на окружающую среду разработки коренных месторождений алмазов // М.: ВИНТИ. Выпуск №4, 2019. С. 6 23.
18. Янин Е.П. Оценка воздействия разработки российских железорудных месторождений на окружающую среду. Обзор // М.: ВИНТИ. Выпуск №5, 2019. С. 22 84.
19. Янин Е.П. Особенности воздействия на окружающую среду разработки угольных месторождений // М.: ВИНТИ. Выпуск №6, 2019. С. 12 53.

© Н. А. Немова, А. В. Резник, В. Н. Карпов, 2021

О МОДЕЛИРОВАНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Наталья Анатольевна Немова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, д.54, , к.т.н., старший научный сотрудник, тел. 89628426717, e-mail: nemova-nataly@mail.ru

Александр Владиславович Резник

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, д.54, , к.т.н., научный сотрудник, тел. 89231145306, e-mail: a-reznik@mail.ru

Владимир Николаевич Карпов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, д.54, , к.т.н., старший научный сотрудник, тел. 89538784334, e-mail: karpov@misd.ru

Комплексная цифровизация добывающего предприятия способна обеспечить положительный эффект от оптимизации взаимосвязей между элементами горнотехнической системы. Цифровизация предполагает переход от фрагментарной автоматизации отдельных стадий или процессов к полностью автоматизированному производству, управляемому в режиме реального времени интеллектуальными системами. 3D модели, включающие геолого-структурный анализ и геодинамическое моделирование геологических структур месторождения, целесообразно использовать для более точного и объективного представления о состоянии массива горных пород и его изменении во времени. Создание интегрированной геомеханической модели месторождения, включающей геологическую модель, модели породного массива и свойств пород, структурную, гидрогеологическую и другие позволяет осуществлять текущий мониторинг и перспективный прогноз напряженно-деформированного состояния геосреды горных предприятий.

Ключевые слова: цифровизация, 3D модели, геологическая модель, структурная модель, напряженно-деформированного состояния

MODELING OF GEOMECHANICAL PROCESSES IN THE FIELDS IN THE CONDITIONS OF DIGITAL TRANSFORMATION OF MINING ENTERPRISES

Natalya A. Nemova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasny pr. 54, Novosibirsk, 630091, Russia, candidate of Technical Sciences, senior researcher ,phone: 89628426717, e-mail: nemova-nataly@mail.ru

Aleksander V. Reznik

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasny pr. 54, Novosibirsk, 630091, Russia, candidate of Technical Sciences, research associate, phone: 89231145306, e-mail: a-reznik@mail.ru

Vladimir N. Karpov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasny pr. 54, Novosibirsk, 630091, Russia, candidate of Technical Sciences, senior researcher, phone: 89538784334, e-mail: karpov@misd.ru

The integrated digitalization of the mining enterprise can provide a positive effect from the optimization of the relationships between the elements of the mining system. Digitalization involves the transition from fragmentary automation of individual stages or processes to fully automated production, controlled in real time by intelligent systems. 3D models, including geological and structural analysis and geodynamic modeling of the geological structures of the deposit, should be used for a more accurate and objective view of the state of the rock mass and its changes over time. The creation of an integrated geomechanical model of the field, including a geological model, models of rock mass and rock properties, structural, hydrogeological, and others, allows for current monitoring and long-term forecast of the stress-strain state of the geomedium of mining enterprises.

Keywords: digitalization, 3D models, geological model, structural model, stress-strain state

Введение

В настоящее время практически во всех отраслях экономики наблюдается динамичный рост объемов генерируемой и перерабатываемой информации с одновременным совершенствованием и развитием технологий управления ею. Горнодобывающие предприятия вынуждены адаптироваться к новым условиям, изыскивать резервы для повышения эффективности работы с большими объемами данных. Существует множество направлений использования цифровых технологий, однако, максимального эффекта можно достичь только в случае комплексного внедрения информационных систем, то есть полной цифровой трансформации компании.

Именно полномасштабная цифровизация горнодобывающего предприятия способна обеспечить синергетический эффект не столько за счет минимального повышения эффективности отдельных элементов горнотехнической системы, сколько за счет обеспечения оптимизированной взаимосвязи между ними [1,2]. Горнодобывающие компании активно включились в процессы цифровой трансформации российской экономики, они внедряют самые передовые технологии для повышения производительности, снижения издержек, повышения качества продукции, интеграции цепочек поставок.

Основной принцип цифровизации промышленности — так называемой Индустрии 4.0. — переход от фрагментарной автоматизации отдельных стадий или процессов к полностью автоматизированному цифровому производству, управляемому интеллектуальными системами в режиме реального времени. Создание умных месторождений позволяет управлять добычей и вести её непрерывную оптимизацию. Принцип работы умных месторождений заключается в объединении технологий измерения, контроля и управления в реальном времени, формировании непрерывного информационного потока, позволяющего оперативно реагировать на ситуацию и принимать оптимальные решения. Основные компоненты концепции «Индустрия 4.0» включают: 1) цифровизацию, вертикальную и горизонтальную интеграцию в цепочках поставок; 2) цифровое моделирование бизнес-процессов; 3) цифровизация продуктов и услуг [1, 3-8].

Для более полного понимания состояния рассматриваемого вопроса проанализируем реализуемые в науке и практике аспекты моделирования геомеханических процессов на карьерах и разрезах при их цифровой трансформации.

Разработка геомеханических моделей месторождения является фундаментальной основой всех проектируемых конструкций. Они состоят из нескольких компонентов (геологическая модель, структурная модель, модель породного массива (свойства пород), гидрогеологическая модель), позволяющих на горном предприятии: осуществлять текущий и перспективный прогноз напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом изменения геометрических и механических параметров во времени и в пространстве; визуализировать 3D модели совместно с расчетными данными о поле напряжений и деформаций и материалами геомеханического мониторинга; проводить комплексный анализ информации для обоснования геомеханической безопасности планируемых горных работ [9-10].

Цель исследования — улучшение качества решения горно-геометрических задач при освоении и эксплуатации сложных по строению месторождений за счет внесения изменений поступающей горно-геологической информации в геомодели и осуществления оперативного доступа к средствам редактирования геометрии месторождения в режиме реального времени.

Методы и материалы, предмет и объект исследования

Использованные при проведении исследования методы для решения поставленной цели: комплексный сравнительный и структурный анализ литературы, метод пообъектного и выборочного исследования, изучение фактических материалов, содержащихся в монографических и периодических изданиях, проектные и отчетные данные предприятий, методы количественной и качественной обработки данных, обобщение опыта использования современного программного обеспечения.

Объектом исследования являются сложные по строению горного массива месторождения, а их цифровые модели являются предметом исследования.

Результаты

Цифровизация месторождения, которая связана с созданием его 3D моделей, включающих геолого-структурный анализ и геодинамическое моделирование геологических структур залежи, необходима для объективного представления о состоянии горного массива. 3D модель представляет собой набор моделей горно-геологических и горно-технологических объектов, несущих информацию об их геометрии, физико-механических и технологических свойствах, напряженном состоянии массива. Работа с моделями осуществляется средствами геоинформационной системы, реализующей инструменты хранения и обработки пространственно-распределенной информации, ее визуализации в удобном для анализа виде. [9]

В геологической 3D модели графическими средствами описывается характер распределения типов пород и полезного ископаемого (рис. 1).

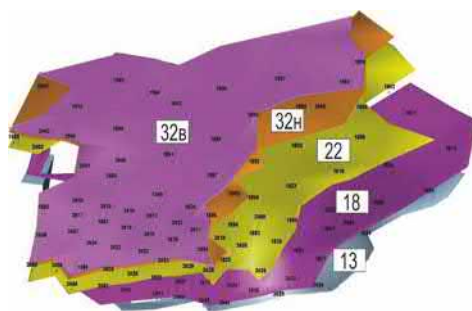


Рис. 1. Трехмерная геологическая модель пластов на угольном месторождении в Якутии [11]

Категории типов пород бывают связаны не только литологическим составом, но также со степенью и видом изменений, которые могут значительно трансформировать свойства пород. При изменении высоты откоса борта карьера необходимо учитывать влияние естественных напряжений, особенно действующих в сочетании с высокими напряжениями, создаваемыми в подошве карьера (разреза). Оценка природных напряжений в породах при естественном залегании должна быть включена в геологическую модель.

Структурная модель разрабатывается на двух уровнях: главные структуры (складки, разломы в масштабе между транспортными съездами и карьера в целом); структурное строение, определяемое трещиноватостью массива (трещины, разломы в масштабах уступов). Главные разломы будут непрерывными, как по простиранию, так и по падению, несмотря на то, что они могут относительно далеко располагаться друг от друга. Таким образом, предполагается, что они будут оказывать влияние на проектную конструкцию откоса между съездами или в пределах всего борта. С другой стороны, структурное строение обычно имеет ограниченную протяженность с близким расположением элементов и, таким образом, становится основным фактором, который необходим учитывать при проектировании в пределах уступа и, возможно, для группы уступов между съездами. (рис. 2)

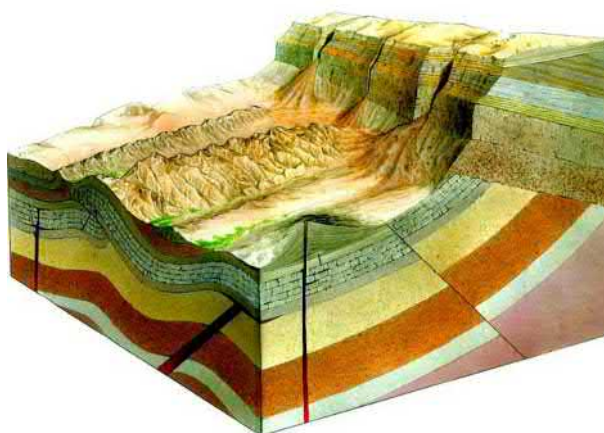
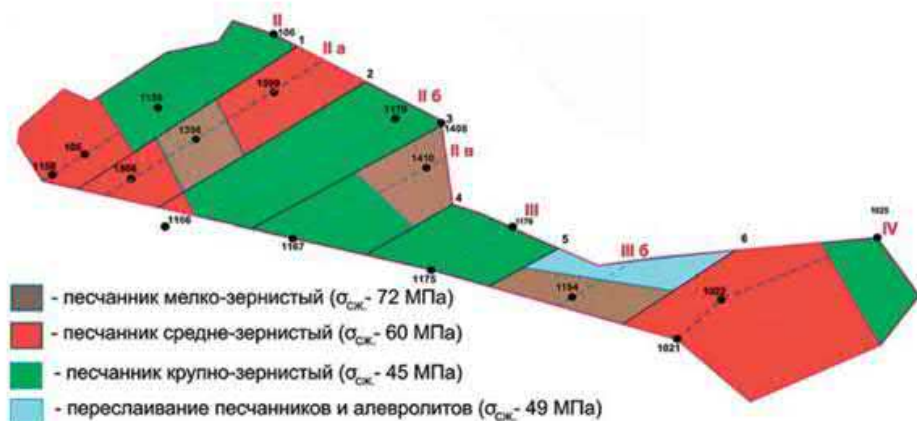


Рис. 2. Структурная модель месторождения [12]

В моделях породного массива представлены свойства пород, которые определяют возможные рабочие характеристики формируемого откоса борта карьера и его днища. В крепких породах структура массива (однородность и неоднородность среды), определяемая в том числе его трещиноватостью, будет контролирующим фактором, даже при относительно высоких откосах. В более неустойчивых породах и при очень высоких откосах, важную роль будет играть прочность породного массива сама по себе или в сочетании со структурами (рис. 3.)



Горнотехническая обстановка на месторождении вследствие непрерывного развития и ведения горных работ постоянно претерпевает как геолого-геомеханические, так и конструктивные изменения. Формирование техногенных участков в массиве пород оказывает влияние на деформационные процессы, характер распределения действующих напряжений в угле-или рудопородном массиве, а также на физико-механические свойства горных пород, их блочность, трещиноватость, нарушенность и устойчивость в целом.

Создание геомеханической модели для действующего или осваиваемого месторождения позволяет на качественно новом уровне решать вопросы оперативного выбора способа безопасного управления состоянием массива пород на стадии строительства и эксплуатации карьера (разреза).

Геомеханические модели по совокупным признакам представляют собой физико-механические системы массива горных пород. Состоит из структурной модели массива различных горных пород с соответствующими прочностными характеристиками, являющимися элементами этой модели (рис.5). При этом структурная модель отражает природные и техногенные условия залегания массива горных пород, характеризующие объект: строение всей толщи пород, условия залегания отдельных слоев, тектонические нарушения, конструктивные особенности борта, наличие внешней нагрузки [14, 15].

Для изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) природного массива горных пород необходимо иметь подробную и качественную фактическую характеристику геологического строения исследуемого объекта с описанием наличия тектонических нарушений, условий залегания пород, их трещиноватости, обводненности и проницаемости пород, типа движения подземных вод, а также иметь сведения о физико-механических свойствах пород. В зависимости от горно-геологических условий разработки месторождений выбирается геомеханическая модель, а после тщательного горно-геометрического анализа – расчетная схема, по которой производится расчет параметров предельного откоса или откоса с заданным коэффициентом запаса устойчивости, включающая сведения о его внешних и внутренних границах, данные по деформационным и прочностным свойствам горных пород, составляющих изучаемый массив. [14, 16-17]

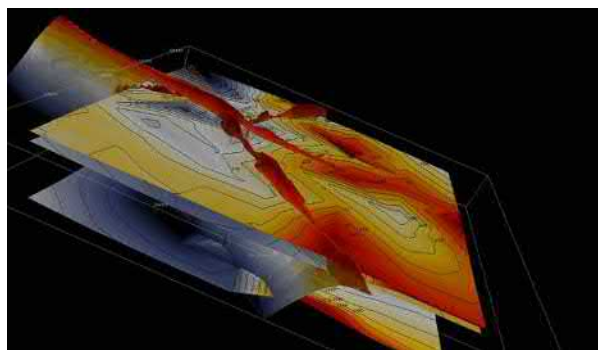


Рис. 5. Геомеханические модели рудных месторождений [18-19]

Наиболее широкое распространение получила механическая модель, основанная на достижении одновременного предельного равновесия для всей поверхности скольжения, с учетом физико-механических свойств пород, полученных как лабораторным путем, так и натурными испытаниями. [14]

Обсуждение

Функции каждой из рассмотренных моделей, возможности их взаимного влияния и дополнения, интеграции на единой цифровой платформе, заключаются в следующем:

- в геологической модели подсчет и картирование запасов, планирование и проектирование геологоразведочной сети, оценка неопределенностей и рисков, система элементов геологического строения, описывающая состав, структуру, размеры, форму исследуемого геологического объекта, подготовка основы для гидродинамического и геомеханического моделирования;

- в структурной модели визуализация и прогнозирование форм залегания горных пород и форм их дислокаций, в виде слоев, трещин, дизъюнктивов, блоков, складок;

- в гидрогеологической модели визуализация данных: о давлении подземных вод; форм, размеров взаимного расположения в выделенном гидrolитосферном пространстве водоносных, относительно водоупорных слоев и пластов или пространственное соотношение разной степени трещиноватости и водоносности локальных и региональных разломов и зон;

- в геомеханической модели, основанной на детальной структурной модели; оптимизация схем вскрытия залежи, процесса буровзрывных работ; определение механических свойств горных пород; анализ напряженно-деформированного состояния горного массива; управление состоянием горного массива; определение устойчивости откосов бортов и уступов; оценка зон напряжений; моделирование зон напряжений.

В настоящее время существует большое множество программных комплексов, основанных на аналитических и численных методах математического моделирования. Они разработаны для решения инженерно-геологических задач по изучению напряженно-деформированного состояния однородных и неоднородных природных массивов горных пород с неровными внешними и внутренними границами, подверженных действию разнообразных внешних сил и влиянию техногенного воздействия, в том числе на методах конечных элементов [17-27].

Комплексная цифровая трансформация месторождений и базирующихся на их запасах горнодобывающих предприятий является объективной необходимостью и реальностью, несмотря на достаточно длительный путь по её эффективному внедрению. Современный цифровой этап развития – это совместное развитие геотехнологий и их элементов с технологиями и средствами телекоммуникаций, высокоточной навигации, вычислительных технологий и робототехники. Самый сложный этап перехода на «цифру» – это перестройка всех процессов

организации, развитие компетенций персонала и создание доверия новым интеллектуальным производствам.

Заключение

Создание максимально точных геомеханических моделей на базе геологических данных для действующего или создаваемого предприятия позволяет на качественно более высоком уровне в режиме реального времени оценивать влияние природных и техногенных факторов на геомеханическое состояние прибортового массива горных пород и решать вопросы оперативного выбора способа управления им.

На основе проведенного анализа показано, что при освоении сложных по строению и неоднородных по свойствам горных пород месторождений необходимо комплексирование моделей, которые описывают различные аспекты состояния горного массива. По мере повышения уровня знаний о геологической структуре и процессах, происходящих в горном массиве, они могут и должны дополняться другими типами моделей. Должны учитываться и изменения, связанные с появлением новой горно-геологической информации по мере отработки залежей, для корректировки и актуализации созданных моделей месторождений с целью совершенствования технологий их отработки. Изменчивость входящих горно-геологических параметров при переходе на другой участок отработки месторождения может кардинально изменить параметры применяемой технологии.

Освоение более сложных по строению месторождений в новых регионах с экстремальными природно-климатическими и горно-геологическими условиями предполагает постановку и решения новых научно-практических исследовательских задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лютягин Д. В., Яшин В. П., Забайкин Ю. В., Якунин М. А. Особенности и тенденции цифровой трансформации российской горнодобывающей отрасли // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2019. – Том 9, № 7А. – С. 147-159.
2. Рыльников А. Г. Пыталев И. А. Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли: технические решения и технологические вызовы // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2020. – вып.1. – С. 470-481.
3. Власюк Л.И., Сиземов Д.Н., Дмитриева О.В. Стратегические приоритеты цифровой трансформации угольной отрасли Кузбасса. Экономика в промышленности. – 2020. – 13(3):328-338. – С.328–338.
4. Лукичёв С. В., Наговицын О. В. Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности: прошлое, настоящее, будущее // Горный журнал. – 2020. – №9 – С.13–18. DOI 10.17580/gzh.2020.09.01
5. Рогожин А. В., Курцев Б. В. Цифровая трансформация горнодобывающего предприятия: направления развития // URL: <https://www.vnedra.ru/novosti/czifrovaya-transformacziya-gornodobyvayushhego-predpriyatiya-napravleniya-razvitiya-8799/> Дата обращения 29.01.2021г.
6. Чехлар М., Жиронкин С.А., Жиронкина О.В. Цифровые технологии Индустрии 4.0 в Майнинге 4.0 – перспективы развития геотехнологии в XXI веке // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 3. – С. 80-90.

7. Квачев В.Н., Леонтьева Е.В., Хаустов В.В., Козуб А.В., Кушнерчук В.В. Основные направления цифровизации гидрогеологических процессов на Михайловском ГОКе им. А.В. Варичева // Горная промышленность. – 2020. – №3. – С.91-97.
8. Козырев А.А., Лукичев С.В., Наговицын О.В., Семенова И.Э. Геомеханическое и горно-технологическое моделирование как средство повышения безопасности отработки месторождений твердых полезных ископаемых // ГИАБ. – 2015. – С. 73–83.
9. Конурин А.И., Неверов С.А., Неверов А.А., Щукин С.А. К проблеме численного моделирования напряженно-деформированного состояния и устойчивости трещиноватого массива // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т.6, №2. – С.144-150.
10. Руководство по проектированию бортов карьера, под редакцией: Джон Рид, Питер Стейси. Пер.санл. – Екатеринбург: Правовед, 2015. – 544с.
11. Khoiutanov E.A. and Gavrilov V.L. Modeling coal deposits in hard-to-reach regions of Yakutia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science262(2019) 012026. DOI:10.1088/1755-1315/262/1/012026
12. Хосоев Д.В. Оценка горнотехнических условий Эльгинского месторождения с позиции применения горных комбайнов // Горная промышленность. – 2016. – №6 (130). – С.81-83.
13. https://geobur.net/news/zagholovok_stat_i01
14. Волков М.Н., Половов Б.Д., Прищепа Д.В. Компьютерные технологии комплексного моделирования геомеханических ситуаций // «Известия вузов. Горный журнал». – 2020. – № 4. – С. 40-53.
15. Абдылдаев К.К., Кожоголов К.Ч. Курманбекуулу Т. Геомеханическая модель неоднородных прибортовых массивов сложноструктурных месторождений // Горная промышленность. – 2016. – №6(130). – С. 86-87.
16. Дмитриев С.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с учетом неоднородностей // Проблемы недропользования. – 2017. – №1. – С. 132-137.
17. Калинин Э.В., Панасьян Л.Л. Опыт применения геомodelей для изучения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород методами математического моделирования // 2015. – №6. – С.483-498.
18. <https://dprom.online/mtindustry/chislovoe-modelirovanie/>
19. <http://www.product.bsu.by/katalog/informacionnie-tehnologii/informacionnie-naukoemkie-tehnologii/geologija-i-gis/modelirovanie-geomexanicheskix-processov-v-massivah-gornih-porod/>
20. Каспарьян Э. В., Федотова Ю. В., Кузнецов Н. Н. Развитие представлений о естественном напряженном состоянии массивов скальных пород // Вестник Кольского научного центра РАН. – 3/2019 (11). – С.65-79.
21. Ермаков С.А, Гаврилов В.Л. Оценка разубоживания и потерь угля при валовой и селективной разработке сложноструктурных пластов Эльгинского угольного месторождения // Горная промышленность. 2012. №6 (106) С. 50-52.
22. Батугина Н.С., Гаврилов В.Л., Ткач С.М. Моделирование величины прибыли при разработке угольных месторождений // Горный журнал. 2017. №12. С. 41-45.
23. Батугина Н.С., Гаврилов В.Л., Ткач С.М. Погрешность изменения прибыли горного предприятия при разработке сложноструктурного месторождения // Горный журнал. 2018. №12. С. 26-30.
24. Gavrilov V.L., Khoiutanov E. A., Nemova N.A. and Son D. V. The role of digital simulation in assessing and reassessing the potential of complex coal deposits // VIII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources”. E3S Web of Conferences192, 03014 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019203014>
25. С.А. Ермаков, В.Л. Гаврилов, Д.В. Хосоев, Е.А. Хоютанов Улучшение качества угля за счет селективной разработки сложноструктурного Эльгинского каменноугольного месторождения // НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ. 2012. №1. С. 24-29.

26. Ермаков С.А., Иль А.П., Хосоев Д.В. Оценка эффективности применения комбайнов Wirtgen на Эльгинском каменноугольном месторождении // Горная промышленность. 2018. №6 (142) С. 77-79.

27. Немова Н.А., Гаврилов В.Л. О геомеханическом моделировании при ведении горных работ на Эльгинском месторождении // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020, т. 2, № 1, С. 117-128. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-2-117-128.

© Н. А. Немова, А. В. Резник, В. Н. Карпов, 2021

ОБОСНОВАНИЕ ПОДЗЕМНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЫЕМКИ РОССЫПНОГО ЗОЛОТА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Александр Михайлович Никольский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. лабораторией подземной разработки угольных месторождений, тел. (903)936-92-52, e-mail: nikosya@mail.ru

Сергей Анатольевич Щукин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории подземной разработки рудных месторождений, тел. (913)397-74-75, e-mail: s.shukin@ngs.ru

Антон Игоревич Конурин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-технических геотехнологий, тел. (999)463-38-13, e-mail: akonurin@yandex.ru

Значительная доля расположения россыпных залежей полезных ископаемых в арктической зоне России свидетельствует о необходимости её стратегического развития в ближайшей и среднесрочной перспективе. Применительно к подземной разработке россыпных месторождений золота рассмотрены вопросы безопасной и эффективной добычи минерального сырья шахтами в условиях крайнего севера. Предложен обоснованный выбор вскрытия и технологии отработки золотосодержащих пластов песка в разрезе рационального планирования горных работ, связанного с минимизацией материально-трудовых затрат на вскрытие и выемку части месторождения, а также полнотой погашения запасов за эксплуатационный период. Геомеханическими оценками установлены безопасные параметры конструктивных элементов камерных систем разработки. Предложены способы дополнительного поддержания кровли отработанных камер Графоаналитическим методом определены показатели потерь и разубоживания золотосодержащих песков в соответствии с источниками их образования.

Ключевые слова: россыпь, золотосодержащие пески, вскрытие, подготовка, система разработки, камера, целики, безопасность, потери, разубоживание

JUSTIFICATION OF UNDERGROUND TECHNOLOGY OF PLACER GOLD MINING IN THE FAR NORTH

Alexander M. Nikol'sky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Head of Coal Deposit Underground Mining Laboratory, office: +7 (903)936-92-52, e-mail: nikosya@mail.ru

Sergey A. Shchukin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher, Ore Deposit Underground Mining Laboratory, office: +7 (913)397-74-75, e-mail: s.shukin@ngs.ru

Anton I. Konurin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Physical and Engineering Geotechnologies, office: +7 (999)463-38-13, e-mail: akonurin@yandex.ru

A significant part of placer mineral deposits in the Arctic zone of Russia urges the need for its strategic development in the near and medium term. Applicably to underground mining of placer gold deposits, the problems of safe and efficient extraction of minerals by mines in the conditions of the Far North are considered. A substantiated choice of uncovering and mining technology for gold-bearing sand strata is proposed in the context of rational planning of mining operations associated with minimizing material and labor costs for uncovering and extracting a part of the deposit, as well as completeness of reserves depletion during the operational period. Safe parameters of structural elements of room mining systems have been determined by geomechanical assessments. Methods for additional support of the roof of mined-out rooms are proposed. The indicators of losses and dilution of gold-bearing sands in accordance with the sources of their formation were determined by the graphoanalytical method.

Keywords: placer, gold-bearing sands, uncovering, preparation, mining system, room, pillars, safety, losses, dilution

Введение

Доля разработки россыпных месторождений золота в России в общем объеме добычи за последние 5-10 лет находится на уровне 30 %, что больше, чем в других странах. В связи с чем, их роль остается более чем внушительной. Поэтому в настоящее время со стороны государственной власти всё ощутимее проявляется интерес к развитию арктической зоны РФ. В частности, в 2018 году Федеральным агентством по недропользованию было поставлено на государственный баланс 76 новых золоторудных месторождений, из которых 60 это россыпные.

Увеличение добычи золота на россыпных месторождениях криолитозоны требует развитие знаний не только прикладного технологического характера, но и специфики выемки в условиях крайнего севера [1-5].

В настоящее время существующий научно-технический потенциал в области подземной разработки россыпных месторождений полезных ископаемых обеспечивает достаточно высокую степень безопасности ведения горных работ [5-10]. Однако, ограничиваясь временным периодом производства эксплуатационных работ, основной проблемой при разработке месторождений в условиях вечной мерзлоты является сезонность добычи, что существенно влияет на организацию вскрытия и отработки залежей минерального сырья, обуславливая локальность выемки не обеспечивающей высокой интенсивности отработки. Последнее свидетельствует о необходимости разработки технических решений, обеспечивающих не только безопасность работ, но и интенсификацию добычи, чему и посвящена настоящая статья.

В статье все технические решения и обоснования параметров выемки реализованы применительно к условиям одного из россыпных месторождений золота, расположенного в криолитозоне.

Для обоснования технологии выемки пласта золотосодержащих песков с учетом горно-геологических условий к рассмотрению была принята камерная система разработки в двух вариантах [11]: с столбчатыми (рис. 1) и ленточными междуканальными целиками (рис. 2).

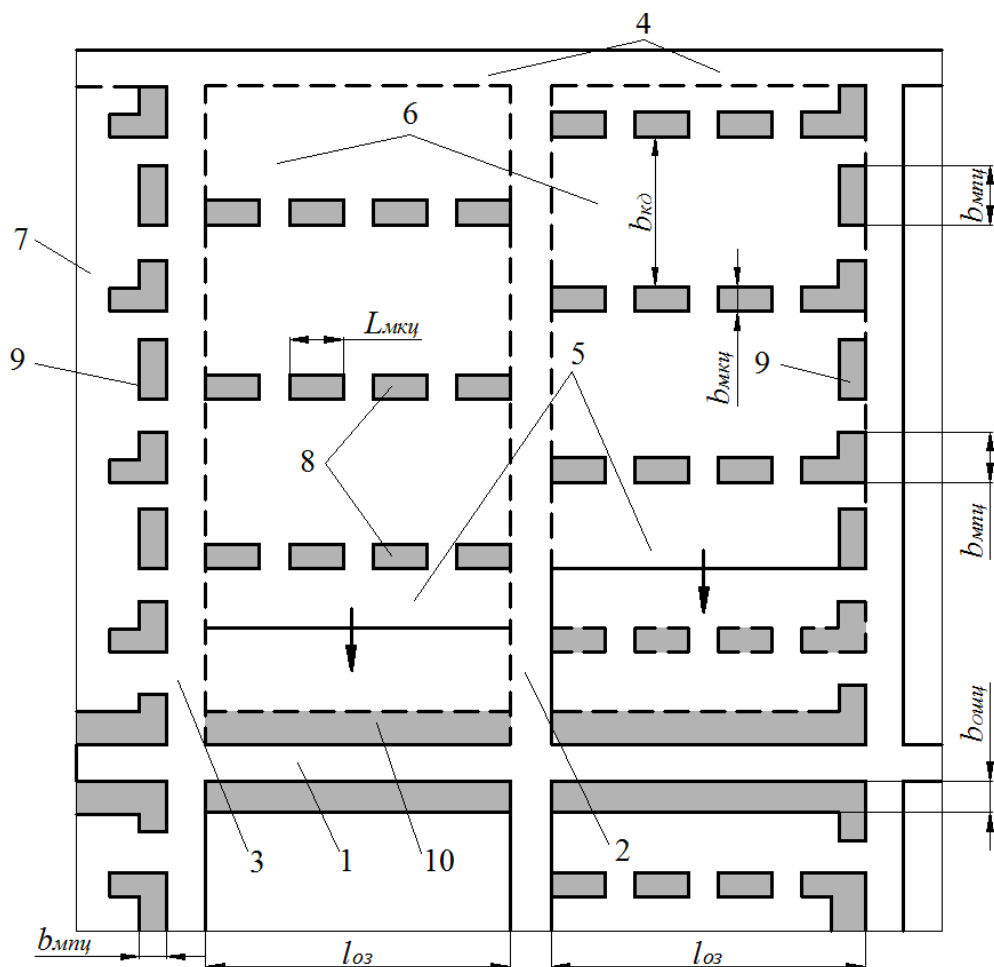


Рис. 1. Камерная система разработки с оставлением столбчатых междуканальных целиков:

1, 2, 3 – главный транспортный, панельный и вентиляционный штреки; 4 – рассечки; 5, 6 – рабочие и отработанные камеры; 7 – погашенная панель; 8 – междуканальные столбчатые целики; 9 – междупанельные столбчатые целики; 10 – окоштрековые целики

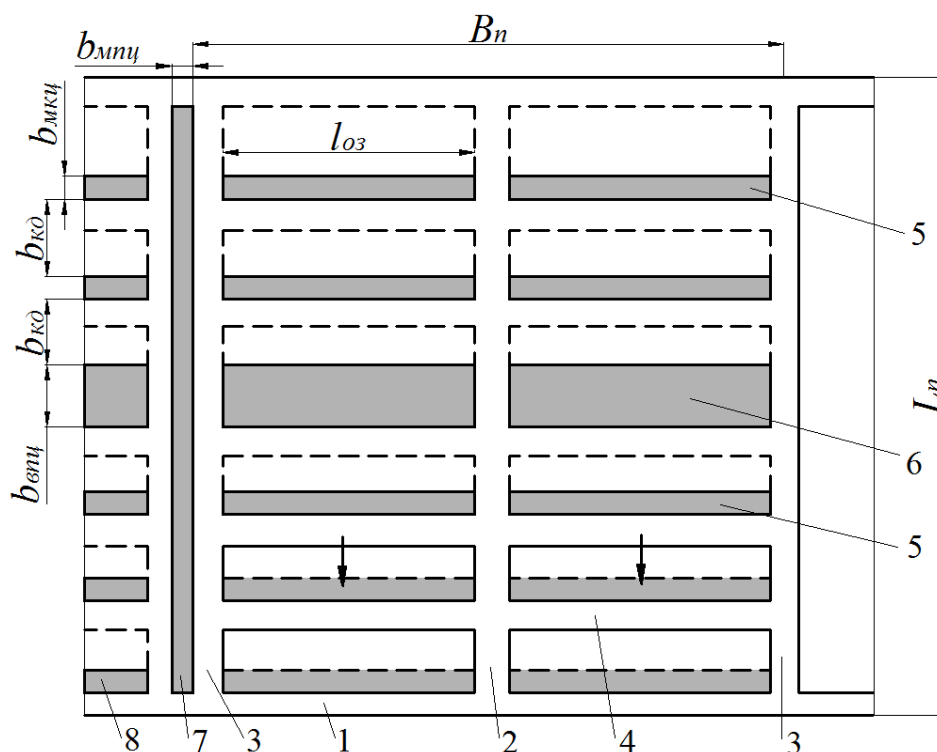


Рис. 2. Камерная система разработки с оставлением ленточных междукamerных целиков:

1, 2, 3 – главный транспортный, панельные транспортный и вентиляционный штреки; 4 – рассечки; 5, 6, 7, 8 – ленточный междукamerный, внутрипанельный, междупанельный и околоштрековый целики

Отработка панели осуществляется на всю ее ширину камерами с оставлением между ними столбчатых и ленточных целиков (МКЦ). При этом ширина камеры не должна превышать предельно допустимый пролет. Выемка камер осуществляется на полную их длину лентами, шириной равной толщине отбиваемого слоя. Оформление столбчатых МКЦ производится проходкой просечек и сбоек по достижению камерой предельно допустимого пролета. Формирование ленточных МКЦ при достижении камерой предельного пролета осуществляется путем проходки междукamerной рассечки (или предварительной раскройкой панели на камеры рассечками). То есть ленточные МКЦ формируются путем оставления части камерного запаса вдоль междукamerной рассечки. При этом МКЦ в камере могут располагаться со смещением (шахматный порядок) относительно смежных или соосно (по одной линии).

Глубина шпуров в рамках рассматриваемой технологии выемки, как показали предварительные исследования, является одним из основных показателей, оптимизирующим производительность очистных работ. Определяется она исходя из равенства добычных циклов при отбойке в смену. Например, при использовании двух очистных забоев (двух смежных камер, одна опережает другую) глубина шпуров ($L_{ш}$) устанавливается с учетом состава добычного комплекса (буровая установка + погрузочно-доставочная машина ПДМ) и их производительности в смену:

$$L_{ш} = \frac{1}{\eta} \times \frac{A_{ПДМ} \times K_A \times n_{ПДМ}}{l_{оз} \times m_э}, \text{ м} \quad (1)$$

где, η – коэффициент использования шпуров КИШ, $\eta = 0,9$; $A_{пдм}$ – производительность ПДМ, м³/смену; K_A – коэффициент корректировки на производительность ПДМ, с учетом ремонта и дополнительных трудозатрат, $K_A = 0,8-1$; $n_{пдм}$ – количество ПДМ в работе, шт; $l_{оз}$ – средняя длина очистного забоя, м; $m_э$ – высота очистного пространства (выемочная мощность), м.

Все это в комплексе ведет к уменьшению числа отрабатываемых шахт на месторождении и стало быть к снижению капитальных затрат на вскрытие.

Обоснование параметров системы разработки

Управление кровлей при ведении очистных работ в камерах обеспечивается регулярно оставляемыми столбчатыми и ленточными МКЦ.

Геомеханическая оценка безопасных параметров элементов камерной системы разработки осуществлялась с использованием аналитических расчетов [12-17], сущность которых заключалась в установлении безопасной ширины МКЦ, а также ширины (пролета) и длина очистного забоя (камеры).

Предельно допустимый пролет (ширина) камеры определяется как:

$$b_{кд} = h_{нк} \sqrt{\frac{\sigma_{сж}^{\partial} \cdot \sigma_p^{\partial l}}{2(\sigma_{сж}^{\partial} + \sigma_p^{\partial l})qK_{\phi}}}, \text{ м} \quad (2)$$

где, $h_{нк}$ – мощность несущего слоя непосредственной кровли, м.

При монолитной толще и мощности торфов меньше 30 м, $h_{нк}$ принимается равной последней. При мощности торфов более 30 м или слоистом их строении $h_{нк}$ определяется как:

для монолитной кровли – $h_{нк} = \frac{\sigma_p^{\partial l} K_o}{\gamma}$, м; для слоистой – $h_{нк} = \frac{C^{\partial l}}{\gamma}$, м

$\sigma_{сж}^{\partial}$, $\sigma_p^{\partial l}$ – пределы длительной прочности пород на одноосное сжатие и растяжение, тс/м²; $C^{\partial l}$ – предел длительного сцепления на контакте пород разных литологических слоев, тс/м²; γ – плотность мерзлых пород потолочины, т/м³; K_o – коэффициент для пород II класса устойчивости, $K_o = 0,8-0,9$; K_{ϕ} – коэффициент, учитывающий условия работы несущего слоя непосредственной кровли (при опирании на целиках $K_{\phi} = 1/8$, при защемлении всех сторон $K_{\phi} = 1/12$); q – интенсивность нагрузки на 1 м² потолочины от веса непосредственной кровли, тс/м²;

$$q = \gamma h_{нк}, \text{ тс/м}^2 \quad (3)$$

Длина камеры устанавливается по допустимой площади обнажения и производительности добычного комплекса с учетом соблюдения допустимого срока

ее погашения, который не должен превышать 20 суток [18] и ориентировочно может определяться по формуле:

$$l_{oz} = \frac{S_{od}}{b_{кд}} - \sum B_{выр}, \text{ м} \quad (4)$$

где, S_{od} – максимально допустимая площадь обнажения кровли в рабочей камере $S_{od} = 3000 \text{ м}^2$ [18]; $\sum B_{выр}$ – общий пролет выработок по ширине панели, м.

Из этого выражения следует, что максимально допустимая длина очистного забоя применительно к камерной с столбчатыми и ленточными целиками системы разработки может достигать 140 м. Однако, учитывая опыт отработки месторождений Северо-востока средняя длина очистного забоя (камеры) l_{oz} изменяется от 40 до 90 м.

Далее по установленному значению предельного пролета камеры с учетом интенсивности нагрузки от веса непосредственной кровли определяется ширина МКЦ ($b_{мкц}$) – столбчатого и ленточного:

$$b_{мкц} = \frac{K_{нф}}{K_{ц}} \cdot \frac{b_{кд} \cdot q \cdot K_n}{\sigma_{сжс}^0 \cdot K_o} + 2a, \text{ м} \quad (5)$$

где, $K_{нф}$ – коэффициент учитывающий ослабление междукammerного целика в результате неравномерного ведения горных работ ($K_{нф} = 1,2-1,4$); K_n – коэффициент перегрузки целиков ($K_n = 1,05-1,4$); K_o – коэффициент неоднородности пород ($K_o = 0,85-0,95$); a – глубина зоны разрушения стенки целика при буровзрывных работах ($a = 0,3-0,4$), м; $K_{ц}$ – коэффициент учитывающий форму целиков: для ленточных $K_{ц} = 1$; для столбчатых:

$$K_{ц} = \frac{\sum_{i=1}^n l_{мкц,i}}{l_{oz}} \quad (6)$$

Также ширину ленточного МКЦ можно определить по уравнению Бёргера:

$$b_{мкц} = \frac{b_{кд} \times l_{oz}}{\left(\frac{940}{H} - 1\right)(b_{кд} + l_{oz})} + 0,54 \times m_3, \text{ м} \quad (7)$$

где, m_3 – высота очистного пространства (выемочная мощность), м.

При наличии более трех переменных показателей для установления ширины ленточного МКЦ можно воспользоваться сетчатой номограммой (рис. 3). Из нее следует, что, например, при пролете камеры 20 м, выемочной мощности 2,88 м и глубине разработки 30-35 м, ширина ленточных МКЦ $b_{мкц}$ составляет – 2,0-2,5 м.

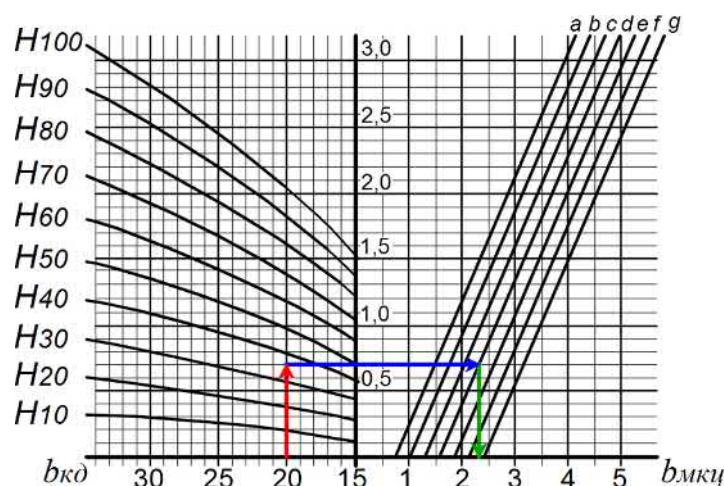


Рис. 3. Номограмма для определения ширины ленточных МКЦ ($b_{мкц}$) в зависимости от выемочной мощности (h), пролета камеры ($b_{кд}$) и глубины выемки (H): $a - h = 1,5$ м; $b - 2$ м; $c - 2,5$ м; $d - 3$ м; $e - 3,5$ м; $f - 4,0$ м; $g - 4,5$ м

Сезонность выемки шахт как уже отмечалось выше, является основным сдерживающим фактором в обеспечении не только интенсивности отработки и снижении капитальных затрат на вскрытие месторождения, а также сопровождается ростом потерь полезного ископаемого. Последнее обусловлено необходимостью в целях безопасности оставления между шахтными полями межшахтных целиков [19-23].

Ширина барьерных, межшахтных целиков в пластах мощностью до 3,5 м и углах падения $\alpha < 30^\circ$, может быть установлена по следующей зависимости:

$$d = 0,05 \times H + K_{п} \times h_{в} + \Delta l, \text{ м} \quad (8)$$

где d – ширина опасной зоны (барьерного, межшахтных целика) по пласту при отсутствии в ней тектонических нарушений, м; H – расстояние по вертикали от земной поверхности до пласта в опасной зоне (с учетом коэффициента запаса на глубину 1,3), м; $K_{п}$ – коэффициент, зависящий от крепости пород, в которых пройдена выработка; при крепости пород по Протоdjяконову $f \geq 1,5$ $K_{п} = 0$ при $f < 1,5$ $K_{п} = 5$; $h_{в}$ – вынимаемая мощность, м; Δl – погрешность положения затопленной выработки (определяется маркшейдером шахты). Для выработок, пройденных до 1950 г., значение Δl должно быть не менее 5 м.

При этом согласно [11] ширина межшахтного целика (опасной зоны) должна составлять не менее 20 м, если по формуле (8) она получилась меньше.

Выполненные расчеты позволили установить безопасные параметры камерной выемки с оставлением в выработанном пространстве столбчатых и ленточных МКЦ (табл.).

Безопасные параметры камерной систем разработки с оставлением
в выработанном пространстве столбчатых и ленточных МКЦ

Наименование параметров	Камерная система разработки	
	Столбчатые МКЦ	Ленточные МКЦ
$B_{м.ц}$ - ширина межшахтного целика, м	20	20
$B_{о.ц}$ - ширина охранных целиков для выработок, м	2,5	2,5
B_n - ширина выемочной панели, м	64,25	64,25
$l_{оз}$ - средняя длина очистного забоя, м	60	60
$b_{кд}$ - предельно допустимый пролет камеры, м	20,0	20,0
$S_{мкц}$ - площадь столбчатого МКЦ, м ²	16	—
$b_{мкц}$ - ширина столбчатого МКЦ, м	4,0	—
$b_{лмкц}$ - ширина ленточного МКЦ, м	—	2,5
$l_{лмкц}$ - длина столбчатого МКЦ, м	4,0	—
b - расстояние между столбчатыми МКЦ в ряду, м	7,0-8,0	—
$S_{од}$ - площадь обнажения кровли в камере, м ²	1340	1340
$B_{п.к}$ - ширина камерного запаса (с целиком), м	24	22,5
C_k - допускаемое опережение смежных очистных забоев при шахматном расположении МКЦ, м	соответствует допустимому пролету камеры	

На основании обоснованных, с позиции безопасности, параметров камерной системы разработки была дана оценка потерям и разубоживанию золотосодержащих песков при их извлечении данной технологией.

Общие потери песков определялись как:

$$P_{общ} = \frac{\sum_{i=1}^n V_n}{B} \times 100, \% \quad (9)$$

$\sum_{i=1}^n V_n$ – абсолютные потери по источникам их образования, м³;

B – балансовые запасы, м³;

$$\sum_{i=1}^n V_n = P_{м.жш.ц} + P_{вск.выр.ц} + P_{мкц} + P_k + P_{к.з} + P_n + P_{пнв.абс}, \text{ м}^3;$$

где, $P_{м.жш.ц}$ – потери в межшахтных постоянных целиках; $P_{вск.выр.ц}$ – тоже в охранных целиках, оставляемых под вскрывающие выработки; $P_{мкц}$ – в междукammerных (столбчатых, ленточных) целиках; P_k – в почве и кровле пласта на контактах с вмещающими породами; $P_{к.з}$ – на недоработанных площадях, заваленных или оставленных участков (несоответствие контуров добычи контурам залежей на их границах); P_n – потери в зачищенной почве после погрузки песков; $P_{пнв.абс}$ – потери при проходке выработок.

Общее разубоживание песков определялось как:

$$R_{общ} = \frac{\sum_{i=1}^n B}{B - \sum_{i=1}^n V_n + \sum_{i=1}^n B} \times 100, \% \quad (10)$$

$\sum_{i=1}^n B$ – сумма примешанных при добыче вмещающих пород по источниках их образования, м³.

При приведении к пустым породам объемы разубоживания песков от всех источников составляют:

$$\sum_{i=1}^n B = (1 - \frac{\epsilon}{C}) \times \sum_{i=1}^n R, \text{ м}^3 \quad (11)$$

$(1 - \frac{\epsilon}{C})$ – берется во внимание при установленном содержании золота во вмещающих породах (при отсутствии этих данных принимается $\sum_{i=1}^n R$);

$$\sum_{i=1}^n R = R_k + R_{n.k} + R_{к.з} + R_{ннв.абс}, \text{ м}^3 \quad (12)$$

где, R_k – разубоживание в почве и кровле пласта на контактах с вмещающими породами; $R_{n.k}$ – тоже в результате отбойки пустых пород до проектной высоты выемки (устанавливается в соответствии с габаритами самоходной техники, т.е. выемка плотика + прихват пород кровли); $R_{к.з}$ – разубоживание породой, отбитой за пределами контура балансовых запасов песков; $R_{ннв.абс}$ – разубоживание песков при проходке выработок.

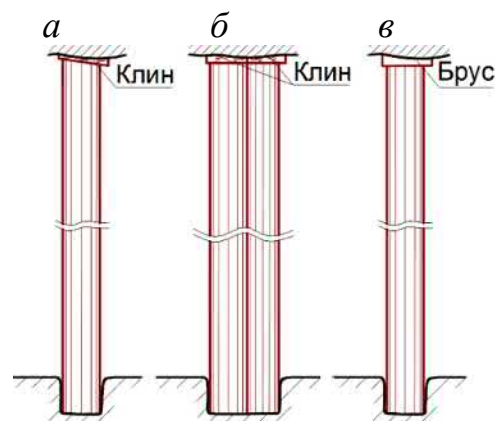
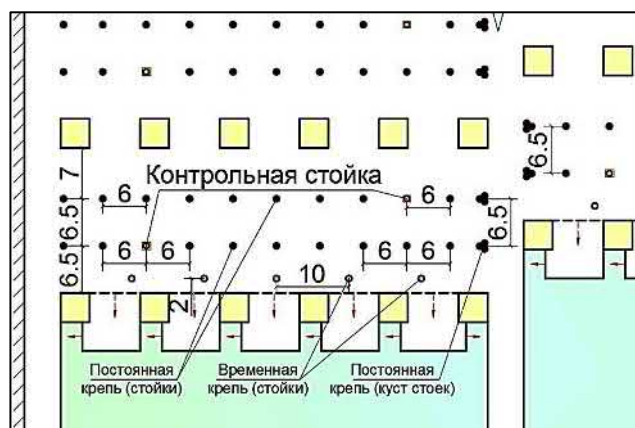
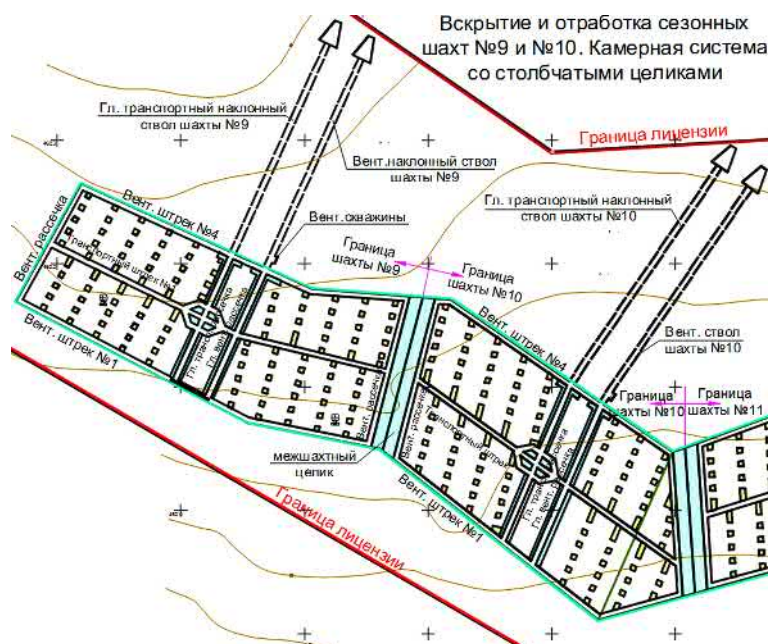
Согласно расчетов потери и разубоживание руды составили в варианте:

– с столбчатыми МКЦ – $P_{общ} = 9-12 \%$, $R_{общ} = 55-65 \%$;

– с ленточными МКЦ – $P_{общ} = 16-18 \%$, $R_{общ} = 60-70 \%$.

В качестве примера выполненных обоснований на рис. 4 приведен фрагмент выкопировки схемы вскрытия и отработки рассматриваемого месторождения россыпного золота. Следует отметить, что эти обоснования легли не только в основу проектной документации, но и реализованы в промышленных масштабах при отработке 20-ти сезонных шахт.

В целях повышения безопасности работ при высокоинтенсивной выемке рудной залежи с использованием самоходного оборудования для поддержания кровли в призабойном пространстве отработанной камеры и обеспечения гарантированной ее устойчивости была разработана, предложена и реализована в шахтных условиях дополнительная крепь в виде деревянных рудстоек, устанавливаемых по схеме (см. рис. 5) и имеющих конструкцию (см. рис. 6).



Таким образом, предварительные исследования и реализация их результатов при подземной отработке россыпного месторождения золота сезонными шахтами, показали важность их проведения и позволили разработать эффективные и безопасные технические решения по выемке минерального сырья камерной технологией с использованием самоходного оборудования в условиях Крайнего севера.

Заключение

Для условий криолитозоны, на примере россыпного месторождения золота Северо-Восточного района России показано, что безопасность и полнота извлечения при подземной технологии добычи обеспечивается комплексными геомеханическими и технологическими оценками, предусматривающими использования высокоинтенсивной камерной системы разработки и самоходной техники с возможностью планирования максимального объема погашаемых запасов в условиях сезонности производства добычных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Akinfiev, N.N., Vikentyev, I.V. Physicochemical Modeling of Ore Formation at the Gold and Volcanogenic Massive Sulfide Deposits of the Northern Urals // *Geochemistry International*, 2020, 58(13), p. 1437-1442.
2. Bondar', D.B., Chugaev, A.V., Polekhovskii, Y.S., Koshlyakova, N.N. The Ore Mineralogy of the Kedrovskoe Gold Deposit (the Muya Region, the Republic of Buryatia, Russia) // *Moscow University Geology Bulletin*, 2018, 73(4), pp. 380-389
3. Rasskazov, I., Kryukov, V., Potapchuk, M. Structural and geomechanical models of gold deposits in the Amur region (Russia) // *E3S Web of Conferences*, 2020, 192, 01001
4. Groves, D.I., Santosh, M., Goldfarb, R.J., Zhang, L. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits // *Geoscience Frontiers*, 2018, No. 9(4), pp. 1163-1177
5. Nevstruyev, V.G., Berdnikov, N.V., Didenko, A.N., Saksin, B.G., Lavrik, N.A. Fluidolites as a Source of Primary Gold–Platinum Mineralization in the Poperechnoe Deposit (Malyi Khingan Range, Russia) // *Doklady Earth Sciences*, 2018, 482(1), pp. 1203–1206
6. Lavrik, N., Stepanova, V., Lavrik, A. Platinum and platinoids in the Bolotisty gold-placer deposit (Khabarovsk Krai, Russia) // *E3S Web of Conferences*, 2020, No. 192,03012
7. Mikhailsyna, T.I., Nikitenko, E.M., Sotskaya, O.T. Prospects for degdekan gold project in the North-East of Russia // *Gornyi Zhurnal*, 2020 (12), pp. 21-25.
8. Tapsiev, A.P., Freidin, A.M., Filippov, P.A., ...Uskov, V.A., Ufatova, Z.G. Extraction of gold-bearing ore from under the open pit bottom at the Makmal deposit by room-and-pillar mining with backfill made of production waste // *Journal of Mining Science*, 2011, 47(3), pp. 324–329
9. Kohanpour, F., Occhipinti, S., Lindsay, M., Jourdan, F., Poujol, M. Mineral systems prospectivity modelling for gold and nickel in the Halls Creek Orogen, Western Australia // *Ore Geology Reviews*, 2020, No. 127,103809.
10. Eremenko, A.A., Darbinyan, T.P., Aynbinder, I.I., Konurin, A.I. Geomechanical assessment of rock mass in the talnakh and oktyabrsky deposits // *Gornyi Zhurnal*, 2020, 2020(1), стр. 82–86
11. Потемкин С.В. Разработка россыпных месторождений. - М.: Недра, 1995.
12. Справочник по разработке россыпей / Под редакцией вл. Березина, В.Г. Лешкова и С.В. Потемкина. - М.: Недра, 1973.
13. Craton Liu, J., Zhao, G., Xu, G., Guo, Q., Yu, H. Structural control and genesis of gold deposits in the Liaodong Peninsula, northeastern North China // *Ore Geology Reviews*, 2020, No. 125,103672
14. Yu, G., Xu, T., Ai, Y., Chen, L., Yang, J. Significance of crustal extension and magmatism to gold deposits beneath Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton: Seismic evidence from receiver function imaging with a dense array // *Tectonophysics*, 2020, No. 789,228532
15. Tuduri, J., Chauvet, A., Barbanson, L., (...), Ennaciri, A., Maacha, L. Structural control, magmatic-hydrothermal evolution and formation of hornfels-hosted, intrusion-related gold deposits:

Insight from the Thaghassa deposit in Eastern Anti-Atlas, Morocco // *Ore Geology Reviews*, 2018, No. 97, pp. 171-198

16. Чабан П.Д., Емлин Е.Л., Литвиниге В.С. Охрана труда при разработке россыпных месторождений. - М.: Недра, 1982.

17. Лешков В.Г. Разработка россыпных месторождений: Учебник для вузов. – М.: Издательство "Горная книга", Издательство МГГУ, 2007. – 906 с.

18. Инструкция по разработке многолетнемерзлых россыпей подземным способом (камерные и столбовые системы разработки), М., Госгортехнадзор РФ, 1999.

19. Типовые проекты шахт, отрабатывающих россыпные месторождения с глубиной залегания до 60 м. (Инструкция по составлению технических проектов шахт), Шифр-5562-Т-2, Магадан, Дальстройпроект, 1978.

20. Freidin, A.M., Neverov, S.A., Neverov, A.A. Geomechanical estimate of mining conditions at the makmal gold deposit // *Journal of Mining Science*, 2009, 45(5), pp. 475–484

21. Xu, S., Hu, X., Carranza, E.J.M., Wang, G. Multi-parameter Analysis of Local Singularity Mapping and Its Application to Identify Geochemical Anomalies in the Xishan Gold Deposit, North China // *Natural Resources Research*, 2020, 29(6), pp. 3425-3442.

22. Методическое руководство по выбору геомеханических параметров технологии разработки угольных пластов короткими забоями, ВНИМИ, С.-Петербург, 2003.

23. Ю.В. Громов, Ю.Н. Бычков, В.П. Кругликов. Управление горным давлением при разработке мощных пологих пластов угля. – М.: Недра, 1985, - 239 с.

© А. М. Никольский, С. А. Щукин, А. И. Конурин, 2021

К ПРОБЛЕМЕ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГОВЫХ ЗОН КАТАСТРОФИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В УГЛЕМЕТАНОВЫХ ПЛАСТАХ

Виктор Николаевич Опарин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, д.ф-м.н., член-корр. РАН, зав. отделом экспериментальной геомеханики, тел. 2053030 доп.113, e-mail: oparin@misd.ru

Татьяна Анатольевна Киряева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, тел: 89231703211, e-mail: coalmetan@mail.ru

В статье показано, что проблема безопасного ведения горных работ во многом связана с представлениями о механизмах взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических массо-газообменных процессов в многофазных углепородных массивах. Впервые проведенный авторами комплекс обобщающих аналитических, экспериментальных лабораторных и натурных исследований на региональном уровне позволил установить, что в современных условиях по мере освоения глубоких горизонтов всё более возрастает роль горного давления, температурного и геоструктурного факторов, а также наличия усиливающегося влияния сейсмического фона от землетрясений и технологических взрывов. Метод численного моделирования и оригинальная экспериментальная система для определения закономерности затухания данного двухфазного потока разработаны китайскими и российскими специалистами с учетом влияния энергии расширения газа на характеристики распространения смеси пылевидного угля и газа. Аналитической основой для описания установленных детерминированных связей между существующими нелинейными геомеханическими и физико-химическими процессами в напряжённых угленосных массивах явилось установление операторного соответствия между физико-химическим уравнением И. Ленгмюра и кинематическим уравнением В.Н. Опарина для волн маятникового типа.

Ключевые слова: углеметановые пласты, нелинейные геомеханические и физико-химические процессы, волны маятникового типа, метаноемкость, пористость, сейсмический фон, выбороопасность

TO THE PROBLEM OF DEVELOPING NEW METHODS FOR ESTIMATING THE MECHANISM OF FORMATION OF FOCAL ZONES OF CATASTROPHIC EVENTS IN CARBON BEDS

Viktor N. Oparin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Doctor of Physics and Mathematics, Corresponding Member RAS, head. Department of Experimental Geomechanics, 54 Krasny Pr., Novosibirsk, 630091, Russia. Tel: (383) 217-05-36; e-mail: oparin@misd.ru

Tatiana A. Kiryaeva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., tel. (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

The article shows that the problem of safe mining is largely related to ideas about the mechanisms of interaction of nonlinear geomechanical and physicochemical mass-gas exchange processes in multiphase coal-rock massifs. For the first time, a complex of generalizing analytical, experimental laboratory and field studies at the regional level, carried out by the authors, made it possible to establish that in modern conditions, with the development of deep horizons, the role of rock pressure, temperature and geostructural factors, as well as the presence of an increasing influence of the seismic background from earthquakes and technological explosions. A numerical simulation method and an original experimental system for determining the regularity of the decay of this two-phase flow were developed by Chinese and Russian specialists taking into account the influence of the gas expansion energy on the propagation characteristics of a mixture of pulverized coal and gas. The analytical basis for describing the established deterministic relationships between the existing nonlinear geomechanical and physicochemical processes in stressed coal-bearing massifs was the establishment of an operator correspondence between the physicochemical equation of I. Langmuir and the kinematic equation of V.N. Oparin for pendulum waves.

Key words: coal-methane seams, nonlinear geomechanical and physicochemical processes, pendulum waves, methane capacity, porosity, seismic background, outburst hazard

Введение

Фундаментальная научная значимость обозначенной в названии настоящей статьи проблемы обусловлена современными научными достижениями и открытиями в нелинейной геомеханике и геофизике, связанными с исследованиями процессов формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных геосистемах. В таких условиях особую актуальность приобретает необходимость решения комплексной проблемы по разработке основ теории взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических процессов в многофазных напряженных углепородных массивах при нарушении их равновесного термодинамического состояния от ведения горных работ. Такая теория одинаково важна и как фундаментальная, в решении задач безопасного недропользования в угледобывающих бассейнах нашей страны, так и для создания новых энергоэффективных геотехнологий отработки месторождений твердых полезных ископаемых Сибири в усложняющихся горно-геологических, природно-климатических условиях, роста глубины залегания продуктивных горизонтов.

Проблема во многом связана с представлениями о механизмах взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических массо-газообменных процессов в многофазных углепородных массивах, вмещающих отрабатываемые продуктивные пласты, и наличием аналитического аппарата для их корректного описания. По существу, это составляет методологическую основу для принятия решений как в направлении построения специализированного вида мониторинговых систем, так и выделения «критериальных показателей», а на их базе – комплексной оценки геомеханического и экологического состояний контролируемых объектов и/или геосистем в целом с позиции возможного их перехода в новые «фазовые состояния», в том числе и катастрофического вида.

Феноменологические основы для установления механизма формирования внезапных выбросов угля и газа

Значимость результатов экспериментально-аналитических исследований в построении теории взаимодействия между нелинейными геомеханическими и физико-химическими процессами при безопасной и энергоэффективной отработке угольных месторождений Кузбасса, например, с позиций их выбросо- и пожароопасности, трудно переоценить. В современных условиях по мере освоения глубоких горизонтов всё более возрастает роль горного давления, температурного и геоструктурного факторов, а также наличия усиливающегося влияния сейсмического фона от землетрясений и технологических взрывов достаточно большой зарядовой мощности и их общей энергии [1]. Современные достижения в данном направлении с открытиями принципиальной значимости отражены в [2], а также в монографиях [3, 4]. Отметим важнейшие из них, поскольку ими, по существу, заложены экспериментально-аналитические основы теории взаимодействия между нелинейными геомеханическими и физико-химическими процессами при отработке угольных месторождений Кузбасса с учетом недавно открытого «поршневого механизма» [2] протекания массо-газообменных процессов в напряженных углепородных массивах и обусловленного им существенного влияния волн маятникового типа от природно-техногенных землетрясений и мощных технологических взрывов на газодинамическую активность угольных шахт [5].

Здесь доказано важное для построения нового уровня геомониторинговых систем научное положение о наличии взаимного геомеханико-термодинамического, газо-флюидодинамического и тектонофизического влияния территориально сопряженных областей с локализованными в их пределах месторождениями органической и неорганической природы на примере комплексного анализа структурно-геологических, тектоно-магматических, геомеханико-геодинамических и иных физико-механических, а также физико-химических характеристик Кузнецкого угольного бассейна и железорудного района Горной Шории и Хакасии юга Западной Сибири [6]. Феноменологическую основу для данного научного положения составили результаты выполненных лабораторных и натурных экспериментов, а также с применением современных облачных и BIG DATA геоинформационных технологий по соответствующим объектам недропользования Кузбасса по специально сформированным и запатентованным информационным банкам данных – каталогам, относящимся к стратиграфическому ресурсу угля и метана, метанодности углей, внезапных выбросов, а также метаноемкости углей Кузбасса за длительный период времени.

Так, впервые проведенный авторами комплекс обобщающих аналитических, экспериментальных лабораторных и натурных исследований на региональном уровне позволил заключить следующее:

- Существует тесная связь между метаноемкостью и стадиями метаморфизма углей. В качестве показателя стадии метаморфизма углей может быть использован выход летучих веществ. В процессе метаморфизма каменных углей

происходит их активация как сорбентов, которая выражается в усилении способности к поглощению газов, возрастающей как правило, со степенью метаморфизма – в направлении от газовых углей к антрацитам. Для бурых и длиннопламенных углей зависимость сорбционной способности по отношению к газам имеет несколько иной характер: по мере метаморфизации ископаемых углей жесткость скелета угольного вещества возрастает и, следовательно, способность углей к абсорбции уменьшается.

- Пористость природных углей достаточно слабо зависит от выхода летучих веществ (стадий метаморфизма): средние значения (при сравнительно высокой дисперсии данных) описываются слабо «выпуклой» функцией зависимости пористости от выхода летучих веществ. Поэтому ее влияние на выход летучих веществ (стадии метаморфизма) практически можно не учитывать.

- В результате увлажнения пласта в угле усиливается проявление его пластических свойств, понижаются соответственно прочность и скорость газовыделения. Молекулы воды обладают бóльшим «сродством» к поверхности угля, чем молекулы метана, и присутствие воды в угле значительно снижает его сорбционную метаноемкость. Установлено, что увеличение влажности угольного пласта даже на 2 % практически вдвое снижает энергию его газовой компоненты. Меняя давление и длительность воздействия воды на угольный пласт можно получить различные эффекты: добиваться «торможения» газовыделения или дегазировать угольный пласт.

- Изменение метаморфизма природных углей зависит от глубины их залегания. Трендовый анализ экспериментальных данных выхода летучих веществ показал преимущественно возрастание стадий метаморфизма природных углей с глубиной залегания угольных пластов. Известные отклонения связаны с особенностями проявления регионального метаморфизма углей и геологического возраста угольных пластов.

- Влияния петрографических характеристик угля на его метаноемкость установлено не было.

- Показано, что современные геоинформационные технологии, рассчитанные на обработку больших объемов и потоков данных качественно меняют подходы к получению новых закономерностей и, чаще всего, меняют и уже ставшие привычными представления о взаимодействии вещественных и структурных компонент горного массива. Проведенные расчеты по различным моделям data mining подтверждают друг друга и позволяют получать новые сведения о характеристиках процессов, происходящих в угольном пласте, заранее не опираясь на физические представления о них.

Таким образом, метаноемкость углей тесно связана с их физико-химическими свойствами и физико-механической структурой угольного вещества: пористостью, влажностью и выходом летучих веществ. При этом адсорбционная способность ископаемых углей существенно меняется с изменением горно-геологических условий их залегания, зависит от их степени метаморфизма и химического состава. Способность угля поглощать и удерживать в себе газ

повышается с ростом степени метаморфизма и газового давления и понижается с увеличением температуры, влажности и зольности углей.

Отмеченные результаты весьма важны для понимания механизма формирования очаговых зон таких катастрофических событий, как внезапные выбросы угля и газа в подземных выработках и их возможных последствий. С этой целью проведен комплекс механико-математического моделирования распространения двухфазного потока из газа и пылевидного угля с учетом расширения газа на стадии развития внезапного выброса в угольной шахте, который позволил сделать заключение об адекватности предложенного метода численного моделирования [7]. Здесь установлено, что упругая энергия угля составляет несколько тысячных от суммарной энергии внезапного выброса, поэтому на стадии его развития данный показатель можно не учитывать, а энергия переноса угля полностью генерируется за счет энергии расширения газа.

Метод численного моделирования и оригинальная экспериментальная система для определения закономерности затухания данного двухфазного потока [7] разработаны китайскими и российскими специалистами с учетом влияния энергии расширения газа на характеристики распространения смеси пылевидного угля и газа. Численное моделирование выполнено с учетом экспериментальных данных, позволивших установить динамико-кинематические характеристики распространения ударной волны внезапного выброса. В частности, доказано, что пылевидный уголь и газ под высоким давлением практически мгновенно выталкиваются из полости от внезапного выброса, расширяются и сжимают воздух в выработке, создавая ударные волны выброса. Ударная волна, генерируемая потоком пылевидного угля и газа во время внезапного выброса, затухает в осевом направлении выработки, а объемная доля содержания пылевидного угля при этом играет весьма важную роль.

Отмеченные выше сведения свидетельствуют о принципиальной значимости газовой компоненты и структурного строения углей и углепородных массивов в определении и прогнозировании их геомеханической реакции на различного вида «внешние» воздействия (источники природного или техногенного характера), где учет их термодинамического и напряженно-деформированного состояния, многофазности, блочно-иерархического строения и энергетических параметров источников развития нелинейных деформационно-волновых процессов приобретает фундаментальную значимость [8]. Этот аспект, по существу, изучался авторами настоящей статьи на примере «последствия» крупных землетрясений на газодинамическую активность шахт Кузбасса с позиций теории нелинейных упругих волн маятникового типа, лежащей также в основе динамического взаимодействия между геомеханическими (деформационно-волновыми) и физико-химическими процессами в угольных пластах [2, 5].

Аналитической основой для описания установленных детерминированных связей между существующими нелинейными геомеханическими и физико-химическими процессами в напряжённых угленосных массивах под влиянием изменяющегося термодинамического их состояния, а также природно-техногенных землетрясений, взрывов и других динамических источников явилось

установление операторного соответствия между физико-химическим уравнением И.Ленгмюра и кинематическим уравнением В.Н. Опарина для волн маятникового типа в [2].

Выводы

Таким образом, для решения обозначенной выше проблемы ныне имеются достаточные предпосылки для решения связанного с ней круга задач. Они связаны, в первую очередь, с анализом достигнутых результатов научных исследований и разработок в таких основных направлениях, как: теоретические основы для описания взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических, а также массо-газообменных процессов в многофазных угленосных массивах горных пород и геоматериалах; оценка роли сейсмичности и природно-климатических факторов в медленно протекающих механо-эрозионных процессах в прибортовых зонах карьерных пространств и их породных обнажениях на основе количественного анализа экспериментальных данных инструментальных измерений: «уровней значимости» влияния землетрясений и мощных технологических взрывов в наземных и подземных условиях на интенсивность газодинамической активности угольных шахт и механо-эрозионных процессов в прибортовых зонах карьеров (угольных разрезов) с учетом энергетических характеристик и удаленности от очаговых зон соответствующих динамических событий природного и/или техногенного характера; и, наконец, современные возможности облачных геоинформационных систем (Big Data) в решении сложных задач обеспечения геомеханико-геодинамической и геоэкологической безопасности ведения крупномасштабного горного производства в областях активного недропользования юга Западной Сибири с ее богатейшими запасами полезных ископаемых железорудных и угольных месторождений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00051.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Adushkin V. V., Oparin V. N. From the Alternating-Sign Explosion Response of Rocks to the Pendulum Waves in Stressed Media // J. Min. Sci., P. I: 2012, Vol. 48, No. 2, pp. 203–222; P. II: 2013, Vol. 49, No. 2, pp. 175–209; P. III: 2014, Vol. 50, No. 4, pp. 623–645; P. IV: 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 1–35.
2. Oparin V.N. Theoretical fundamentals to describe interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams // J. of Mining Sci. – 2017. – Vol. 53, No. 2. – P. 201 – 215.
3. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах / [В.Н. Опарин, В.В. Адушкин, А.А. Барях]; под ред. Н.Н. Мельникова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. – Т. 1. – 549 с.; 2019. – Т. 2. – 546 с.
4. Киряева Т. А. Разработка методов энергетического анализа и прогнозирования газодинамической активности углеметановых пластов Кузбасса. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 332 с.

5. Adushkin V.V., Tyukhrin V.G., Glumov A.V. et al. Effect of Pendulum Waves from Earthquakes on Gas-Dynamic Behavior of Coal Seams in Kuzbass // Journal of Mining Science – 2018. – No. 1, pp. 3–14.

6. Опарин В. Н. Адушкин В.В., Киряева Т.А., Потапов В.П. Региональная кластеризация угольных месторождений Кузбасса по газодинамической активности // ГИАБ. — ч. I – 2018. – № 9. – С. 5–24; ч. II– 2018. – № 10. – С. 5–29.

7. Zhou A. T., Wang K., Kiryaeva T. A., Oparin V. N. Regularities of two-phase gas flow under coal and gas outbursts in mines // J. of Mining Sci. – 2017. – Vol. 53, No. 3. – P. 533 – 543.

8. Wang K.X., Aleksandrova N.I., Pan Y.S., Oparin V.N., Dou L.M. et al. // Effect of block medium parameters on energy dissipation // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics – 2019, – vol. 60 – № 5. – pp. 926-934.

© В. Н. Опарин, Т. А. Киряева, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>Е. Ю. Темникова, С. И. Грубась, А. А. Федосеев.</i> Литологическая интерпретация данных ГИС в интервалах баженовской свиты с использованием искусственных нейронных сетей	3
2. <i>К. Ю. Тулисова, Т. А. Кулешова, А. М. Янников, Н. В. Юркевич.</i> Моделирование процесса растворения грунтов основания дамбы гидротехнического сооружения атмосферными водами	10
3. <i>Д. И. Фадеев.</i> Разработка и опыт применения компактной малоглубинной аппаратуры индукционных электромагнитных исследований	16
4. <i>К. В. Федин, Е. Э. Косякина.</i> Влияние постоянного динамического воздействия и температурных изменений верхней части разреза на сейсмобезопасность сооружений	24
5. <i>К. В. Федин, А. А. Гриценко.</i> Определение потери устойчивости колонны газовой скважины по акустическим шумам	32
6. <i>К. В. Федин, А. А. Гриценко, Е. Э. Косякина.</i> Диагностика состояния устойчивости Бугринского моста методом выделения стоячих волн из микросейсм	39
7. <i>Т. С. Хачкова, В. В. Лисица.</i> Численное моделирование химического взаимодействия флюида с породой на масштабе пор	46
8. <i>Е. Е. Хогоева, Е. А. Хогоев.</i> Возможность интеграции микросейсмического анализа с другими геофизическими методами на примере газоконденсатного месторождения	55
9. <i>А. Н. Шеин, С. Ю. Артамонова, В. В. Потапов, Н. О. Кожевников, В. Е. Ушницкий.</i> Применение метода электротомографии в сложных геотехногенных условиях на примере объекта мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Якутия)	61
10. <i>А. Н. Шеин, Я. К. Камнев.</i> Геофизические исследования на площадке CALM R53	69
11. <i>Г. Г. Шемин, П. А. Глазырин.</i> Количественный прогноз нефтегазоносности батского регионального резервуара среднеюрских отложений Енисей-Хатангской и смежной территории Гыданской областей сибирского сектора Арктики	75
12. <i>А. В. Яблоков, А. С. Сердюков.</i> Исследование неоднозначности обращения дисперсионных кривых поверхностных волн при помощи искусственных нейронных сетей	82
13. <i>С. В. Яскевич, П. А. Дергач, Г. С. Чернышов, В. И. Карпухин, А. А. Дучков.</i> Изучение анизотропии ВЧР на полигоне ключи методом преломленных волн	90

14. С. Е. Алексеев, Б. Кубанычбек, А. Ю. Примычкин. Создание малогабаритных погружных пневмоударников для вращательно-ударного бурения скважин.....	98
15. С. Е. Алексеев, Е. М. Черниенков. Бурение скважин с одновременной обсадкой	107
16. Е. Л. Алфорова. Вычислительное моделирование процесса адиабатического охлаждения воздуха в тоннеле метрополитена	115
17. С. Ю. Васичев, А. А. Неверов. Оценка устойчивости временного целика при выемке пологой рудной залежи с закладкой и обрушением.....	123
18. С. Д. Викторов, В. М. Закалинский, А. А. Еременко, И. Е. Шиповский, Р. Я. Мингазов. Разработка механизма действия деконцентрированных зарядов различной формы для разнообразных условий горного производства	135
19. В. Л. Гаврилов. Угледобывающий комплекс в зоне БАМ: состояние и перспективы развития	144
20. В. Л. Гаврилов, Е. А. Хоютанов. О геотехнологическом моделировании показателей спекаемости коксующегося угля	153
21. Т. Г. Гаврилова, Д. М. Цицилина. Исследование осадков реагентов-собирателей в элементарном акте флотации	162
22. Л. В. Городилов, А. Н. Коровин. Анализ конструкций ковшей активного действия карьерных и строительных экскаваторов	171
23. Л. В. Городилов, В. Г. Кудрявцев, А. И. Першин. Разработка и стендовые испытания физической модели реверсивного гидроударного устройства	180
24. Б. Б. Данилов, А. А. Речкин. Оценка применимости в пневмоударных машинах и оптимизация формы стационарно установленного упругого клапана.....	189
25. Е. В. Денисова, А. П. Хмелинин, А. И. Конурин. Моделирование процессов отражения плоской электромагнитной волны в многослойной среде: нефтенасыщенный пласт, вмещающий трещину гидроразрыва.....	195
26. В. П. Ефимов. Поведение нехрупких горных пород при изгибе	206
27. Д. В. Зедгенизов. К расчету коэффициентов автоматического регулятора производительности тоннельного вентилятора	213
28. Л. А. Кияница, И. В. Лугин, А. М. Красюк. О структуре воздушного потока в пристанционных вентиляционных сбоях метрополитенов	219
29. С. А. Кондратьев, К. А. Коваленко. Определение зависимости крупности флотируемых частиц от их свойств и гидродинамики флотационной камеры	230
30. И. А. Коновалов. Флотация свинцово-цинковой руды с использованием смеси дитиокарбамата и ксантогената	239
31. А. О. Кордубайло, Б. Ф. Симонов. Математическое моделирование электромагнитного ударного узла скважинного виброисточника.....	248

32. <i>П. В. Косых.</i> К определению аэродинамической характеристики шахтного осевого вентилятора при работе в реверсивном режиме.....	257
33. <i>А. А. Красновский.</i> Особенности напряженно-деформированного состояния крепи горных выработок при заполнении вывалов пород фенольными смолами	266
34. <i>Е. Г. Куликова, В. М. Усольцев.</i> К вопросу создания большегрузных самосвалов с кузовом активного действия	274
35. <i>А. В. Леонтьев, Е. В. Рубцова.</i> Устройство для создания щелей-концентраторов напряжений в приконтурной зоне скважин в крепких породах	283
36. <i>Н. А. Мирошниченко, Л. А. Назарова, А. В. Панов.</i> Развитие техногенной сейсмичности при отработке Таштагольского железорудного месторождения: ретроспективный анализ и прогноз	288
37. <i>А. В. Морозов, С. Я. Левенсон.</i> Пути повышения эффективности технологических процессов при формировании высокоплотных массивов дисперсных материалов	295
38. <i>Л. А. Назарова, Г. В. Нестерова, Л. А. Назаров.</i> Теоретическое и экспериментальное исследование анизотропии фильтрационно-емкостных свойств с использованием искусственных геоматериалов	304
39. <i>С. А. Неверов, А. И. Конурин, Ю. Н. Шапошник.</i> Безопасность очистных работ при поэтажной выемке с обрушением в тектонически напряженных массивах	311
40. <i>Н. А. Немова, А. В. Резник, В. Н. Карпов.</i> Моделирование процесса восстановления земель как часть цифровизации месторождений	322
41. <i>Н. А. Немова, А. В. Резник, В. Н. Карпов.</i> О моделировании геомеханических процессов на месторождениях в условиях цифровой трансформации горнодобывающих предприятий	332
42. <i>А. М. Никольский, С. А. Щукин, А. И. Конурин.</i> Обоснование подземной технологии выемки россыпного золота в условиях Крайнего Севера	342
43. <i>В. Н. Опарин, Т. А. Киряева.</i> К проблеме разработки новых методов оценки механизма формирования очаговых зон катастрофических событий в углеметановых пластах	354

CONTENTS

1. <i>E. U. Temnikova, S. I. Grubas, A. A. Fedoseev.</i> Lithological Interpretation According to Well-Logging Data for the Bazhenov Formation with Usage of Artificial Neural Networks	3
2. <i>K. Y. Tulisova, T. A. Kuleshova, A. M. Yannikov, N. V. Yurkevich.</i> Modelind of the Process of Dissolution of Soils in the Base of a Hydraulic Structure by Atmospheric Water	10
3. <i>D. I. Fadeev.</i> Development and Experience of Application of Compact Near Surface Equipment for Induction Electromagnetic Research	16
4. <i>K. V. Fedin, E. E. Kosyakina.</i> Assessment of the Seismic Safety of Engineering Structures Based on Acoustic Noise	24
5. <i>K. V. Fedin, A. A. Gritsenko.</i> Determination of the Stability Losing of a Gas Well Casing by Acoustic Noise	32
6. <i>K. V. Fedin, A. A. Gritsenko, E. E. Kosyakina.</i> Stability Diagnostics of the Bugrinsky Bridge by the Method of Standing Waves Determination From Microseism	39
7. <i>T. S. Khachkova, V. V. Lisitsa.</i> Numerical Simulating the Chemical Interaction of Fluid with Rock at the Pore Scale	46
8. <i>E. E. Khogoeva, E. A. Khogoev.</i> Integration Potential of Microseismic Analysis and Geophysical Methods. Gas Condensate Field Case Study	55
9. <i>A. N. Shein, S. Yu. Artamonova, V. V. Potapov, N. O. Kozhevnikov, V. E. Ushnitskii.</i> The Electrotomography Survey in Difficult Geotechnogenic Conditions at the Peaceful Underground Nuclear Explosion "Crystal" Site	61
10. <i>A. N. Shein, Y. K. Kamnev.</i> Geophysical Surveys at the Calm R53 Site	69
11. <i>G. G. Shemin, P. A. Glazyrin.</i> Quantitative Forecast of Oil and Gas Potential in the Bathian Regional Reservoir of the Middle Jursian Sediments of the Yenisei-Khatang and Adjacent Territory of Gydan Regions of the Siberian Arctic Sector	75
12. <i>A. V. Yablokov, A. S. Serdyukov.</i> Study of Uncertainty of the Inversion of Dispersion Curves of Surface Waves Using Artificial Neural Networks	82
13. <i>S. V. Yaskevich, P. A. Dergach, G. S. Chernyshov, V. I. Karpukhin, A. A. Duchkov.</i> Study of Near-Surface Anisotropy for the Kluchi Cite by Refracted Waves Sutveying	90
14. <i>S. E. Alexeev, B. Kubanychbek, A. Yu. Primychkin.</i> Creation of Portable Downhole Hammers for Rotary-Percussive Drilling of Boreholes	98
15. <i>S. E. Alexeev, E. M. Chernienkov.</i> Drilling Boreholes with Simultaneous Casing	107

16. <i>E. L. Alferova</i> . Computational Simulation of the Evaporative Air Cooling Process in a Subway Tunnel	115
17. <i>S. Yu. Vasichev, A. A. Neverov</i> . Evaluation of the Stability of a Temporary Pillar when Miining Ore Horizons with Backfilling and Caving	123
18. <i>S. D. Viktorov, V. M. Zakalinsky, A. A. Eremenko, I. E. Shipovskii, R. Ya. Mingazov</i> . Development of The Mechanism of Action of Deconcentrated Charges of Various Shapes for Various Mining Conditions	135
19. <i>V. L. Gavrilov</i> . Coal Mining Complex in the Baikal-Amur Railway Area: State and Prospects for Development.....	144
20. <i>V. L. Gavrilov, E. A. Khoiutanov</i> . On Geotechnological Modeling of Coking Coal Sinterability Indices	153
21. <i>T. G. Gavrilova, D. M. Tsitsilina</i> . Study of Sediments of Collecting Agents in Elementary Flotation Act	162
22. <i>L. V. Gorodilov, A. N. Korovin</i> . Analysis of Active Bucket Designs of Open-Pit and Construction Excavators	171
23. <i>L. V. Gorodilov, V. G. Kudryavtsev, A. I. Pershin</i> . Development and Bench Tests of a Physical Model of Reversible Hydraulic Impact Device	180
24. <i>B. B. Danilov, A. A. Rechkin</i> . Applicability Evaluation and Shape Optimization of the Elastic Valve Stationarily Installed in Pneumatic Impact Machines	189
25. <i>E. V. Denisova, A. P. Khmelinin, A. I. Konurin</i> . Simulation of Reflection of a Plane Electromagnetic Wave in a Multilayer Medium: Oil-Saturated Formation Enclosing a Hydraulic Fracture	195
26. <i>V. P. Efimov</i> . Behavior of Non-Brittle Rocks under Bending Condition.....	206
27. <i>D. V. Zedgenizov</i> . To Calculation of the Coefficients of Automatic Regulator of Tunnel Fan Capacity.....	213
28. <i>L. A. Kiyantsa, I. V. Lugin, A. M. Krasnyuk</i> . On Air Flow Structure in Station Ventilation Connections of Subways.....	219
29. <i>S. A. Kondratyev, K. A. Kovalenko</i> . Determination of the Dependence of the Size of the Floated Particles on their Properties and the Hydrodynamics of the Flotation Chamber.....	230
30. <i>I. A. Konovalov</i> . Flotation of Lead-Zinc Ore Using a Mixture of Dithiocarbamate and Xanthate	239
31. <i>A. O. Kordubailo, B. F. Simonov</i> . Mathematical Modeling of Electromagnetic Impact Unit of Downhole Vibration Source.....	248
32. <i>P. V. Kosykh</i> . Determining The Aerodynamic Characteristic of a Mine Axial Fan When Operating in Reversible Mode.....	257
33. <i>A. A. Krasnovsky</i> . Features of Stress-Strain State of Mine Support when Filling Rock Falls with Phenolic Resins.....	266
34. <i>E. M. Kulikova, V. M. Usol'tsev</i> . To the Problem of Creating Large Dump Trucks with Active Bodies	274
35. <i>A. V. Leont'ev, E. V. Rubtsova</i> . Device for Creating Slots-Voltage Concentrators in the Boundary Area of Wells in Fine Rocks.....	283

36. <i>N. A. Miroshnichenko, L. A. Nazarova, A. V. Panov.</i> Development of Induced Seismicity in Mining Tashtagol Iron Ore Deposit: Retrospective Analysis and Forecast	288
37. <i>A. V. Morozov, S. Y. Levenson.</i> Ways to Increase the Efficiency of Engineering Processes when Forming High-Density Arrays of Disperse Materials	295
38. <i>L. A. Nazarova, G. V. Nesterova, L. A. Nazarov.</i> Theoretical and experimental study of poroperm properties anisotropy using artificial geomaterials	304
39. <i>S. A. Neverov, A. I. Konurin, Y. N. Shaposhnik.</i> Safety in Substopping-And-Caving in Tectonically Stressed Rock Masses	311
40. <i>N. A. Nemova, A. V. Reznik, V. N. Kapov.</i> Modeling The Process of Land Restoration as Part of the Digitalization of Deposits	322
41. <i>N. A. Nemova, A. V. Reznik, V. N. Kapov.</i> Modeling of Geomechanical Processes in the Fields in the Conditions of Digital Transformation of Mining Enterprises	332
42. <i>A. M. Nikol'sky, S. A. Shchukin, A. I. Konurin.</i> Justification of Underground Technology of Placer Gold Mining in the Far North.....	342
43. <i>V. N. Oparin, T. A. Kiryaeva.</i> To the Problem of Developing New Methods for Estimating the Mechanism of Formation of Focal Zones of Catastrophic Events in Carbon Beds	354

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XVII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 8 т.

Т. 2

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА.
ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

№ 3

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *О. И. Голиков*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 15.09.2021. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 21,33. Тираж 34 экз. Заказ 123.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.

- 
- Т. 1. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия
- Т. 2. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология
- Т. 3. Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью
- Т. 4. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология
- Т. 5. Геопространственные аспекты исторических, правовых и социокультурных процессов
- Т. 6. Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке»
- Т. 7. Молодежь. Инновации. Технологии
- Т. 8. СибОптика-2021
- 