

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

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

Т. 6

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2018

Ответственные за выпуск:

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

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

Доктор технических наук, директор Института нефтегазовой геологии
и геофизики СО РАН, Новосибирск
И. Н. Ельцов

Кандидат технических наук, директор Института горного дела
им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск
А. С. Кондратенко

Кандидат геолого-минералогических наук, исполнительный директор
Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики
и минерального сырья, г. Новосибирск
М. Ю. Смирнов

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу
Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», Новосибирск
А. И. Неволько

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля
2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное
дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторож-
дений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов
в 6 т. Т. 6. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 352 с.

В сборнике опубликованы материалы XIV 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» (секция
«Современные проблемы горнодобывающей промышленности»).

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПНЕВМОУДАРНОГО МЕХАНИЗМА С ЭЛАСТИЧНЫМ КЛАПАНОМ ПРИ РАБОТЕ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ В ВЫХЛОПНОМ ТРАКТЕ

Борис Борисович Данилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (383)205-30-30, доп. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Александр Аркадьевич Речкин

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. (383)205-30-30, доп. 157, e-mail: lexher68@gmail.com

Борис Николаевич Смоляницкий

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, профессор, зав. отделом горной и строительной геотехники, тел. (383)205-30-30, доп. 115, e-mail: bsmol@misd.ru

Приведено обоснование целесообразности использования пневмоударных механизмов с эластичным клапаном для работы совместно с пневмотранспортной магистралью, по которой осуществляется вынос разрушенной при бурении породы. На основе программы SimulationX, построена имитационная модель рабочего цикла пневмоударного механизма с эластичным клапаном. Проведены вычислительные опыты и определены основные динамические параметры механизма при работе в условиях избыточного давления в выхлопном тракте. По результатам сравнительного анализа полученных результатов с аналогичными характеристиками бесклапанных пневмоударных механизмов сделан вывод о целесообразности использования эластичного клапана при создании погружных пневмоударников. Для оценки достоверности результатов моделирования и адекватности построенной модели проведены экспериментальные исследования рабочего цикла реального пневмоударного механизма при работе на стенде, создающем избыточное давление в выхлопном тракте, имитирующее транспортирование разрушенной при бурении породной массы. Констатировано удовлетворительное соответствие результатов моделирования и экспериментальных данных.

Ключевые слова: бурение, транспортирование породы, пневмоударник, эластичный клапан, рабочий цикл, имитационная модель.

INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF PNEUMATIC ELASTIC VALVE MECHANISM WHEN OPERATING WITH THE EXHAUST BACK PRESSURE

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Chief Researcher, Mining and Construction GeoEquipment Department, phone: (383)205-30-30, extension 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Aleksander A. Rechkin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher of Mining and Construction GeoEquipment Department, phone: (383)205-30-30, extension 157, e-mail: lexher68@gmail.com

Boris N. Smolyanitsky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Professor, Head of Mining and Construction GeoEquipment Department, phone: (383)205-30-30, extension 115, e-mail: bsmol@misd.ru

The rationale for employment of pneumatic punch mechanisms with elastic valve to work with pneumatic transport main is provided. The rock destroyed after drilling is removed with the help of the pneumatic main. A simulation model of the operating cycle of a pneumatic impact mechanism with an elastic valve is constructed based on the SimulationX program. Computational experiments are carried out, and the main dynamic parameters of the mechanism are determined when operating under conditions of excessive pressure in the exhaust tract. Based on a comparative analysis of the obtained results with similar characteristics of valveless pneumatic impact mechanisms, it was concluded that it is advisable to use an elastic valve when creating downhole hammer. To assess the reliability of the simulation results and the validity of the constructed model, experimental studies of the operating cycle of a real air-impact mechanism have been carried out when working on a bench that creates excessive pressure in the exhaust tract, imitating the transportation of the rock mass destroyed during drilling. Satisfactory agreement between the results of modeling and experimental data is established.

Key words: drilling, transportation of rock, pneumatic punch, elastic valve, operating cycle, simulation model.

Введение

В настоящее время наиболее эффективным способом бурения в грунтовом или породном массивах является ударно-вращательный способ. Технология любого процесса бурения включает в себя две стадии – разрушение породы и ее удаление из скважины. Для удаления породы используются в том числе пневмотранспортные системы [1]. Применение в качестве ударного узла погружных пневмоударных машин позволяет использовать отработанный ими воздух для транспортирования разрушенной породы, что значительно экономит общий расход воздуха.

Разработанная в ИГД СО РАН технология «сухого» горизонтального бурения, в которой применяется пневматическое транспортирование разрушенной породы по вращающемуся трубопроводу [2], повышает эффективность и надежность пневмотранспортной системы, что особенно актуально при проходке горизонтальных и полого наклонных скважин. В тоже время, при работе пневмотранспортной системы в трубопроводе возникают значительные колебания давления воздуха. Повышенное давление в пневмотранспортной магистрали, так называемое противодавление, противодействует выхлопу отработанного воздуха из камер пневмоударной машины, что ухудшает ее динамические показатели, в частности предударную скорость и частоту ударов, и приводит к снижению ударной мощности [3], а в конечном счете, при дальнейшем росте противодействия ведет к остановке машины.

В работах [2–4] были проведены вычислительные эксперименты по определению динамических характеристик бесклапанных пневмоударных машин в условиях противодействия в выхлопном тракте. Было показано, что потеря

ударной мощности происходит в основном за счет снижения предупредной скорости бойка, частота ударов при этом снижается незначительно.

В 90-х гг. в ИГД СО РАН были разработаны пневмоударные машины с кольцевым эластичным клапаном серии «Тайфун» различных массогабаритных характеристик. Благодаря лучшей по сравнению с бесклапанными аналогами энергоэффективности [5, 6], они нашли широкое применение в строительстве, в частности при прокладке подземных коммуникаций в грунте.

Эксперименты

С целью определения динамических характеристик таких пневмоударников с эластичным клапаном при работе в условиях противодавления в выхлопном тракте, было проведено математическое моделирование с помощью программы SimulationX [7, 8], предназначенной для симуляции различных физических процессов, в том числе пневматики. Схема работы устройства составлялась из отдельных элементов, таких как компрессор, пневмоцилиндр, клапан и т. д., соединенных соответствующими связями, для которых решаются уравнения движения [7, 9]. Параметры модели соответствовали параметрам пневмоударной машины «Тайфун-4» [6, 10]. Расчетная схема задачи приведена на рис. 1.

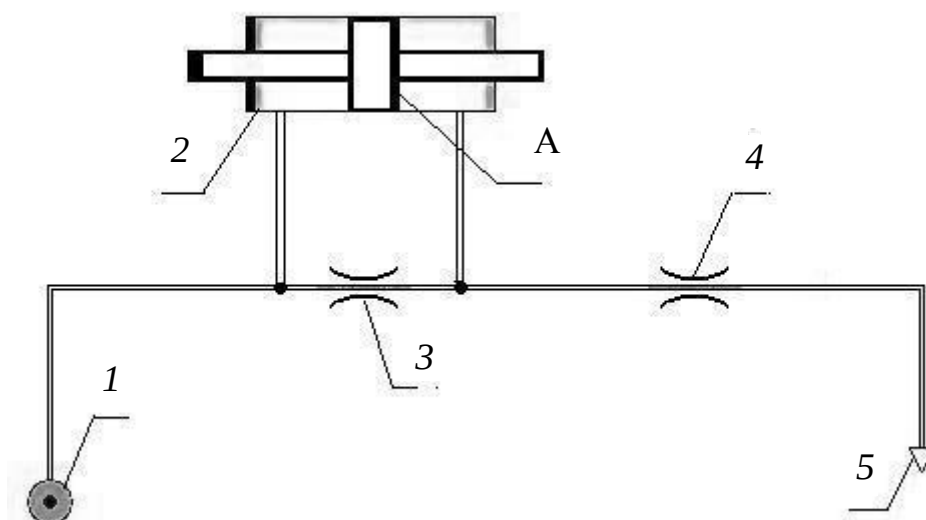


Рис. 1. Расчетная схема:

1 – компрессор; 2 – двухштоковый пневмоцилиндр; 3 – межкамерный дроссель;
4 – запирающий дроссель; 5 – выхлоп

Пневмоударный механизм моделировался с помощью двухштокового пневмоцилиндра, в котором поршень массой 4 кг имитировал боек пневмоударника. Работа кольцевого упругого клапана моделировалась запиранием дросселя 4 (рис. 1) при достижении клапаном во время прямого хода координата-

ты запираания передней камеры и увеличением площади A поршня со стороны передней камеры после удара, что имитировало растяжение кольца. При достижении клапаном координаты открытия во время обратного хода дроссель 4 открывался, а площадь поршня со стороны передней камеры принимала исходное значение. Противодействие в выхлопном канале моделировалось давлением выхлопа 5.

Результаты моделирования приведены на графиках рис. 2–5. Результаты моделирования показывают, что предударная скорость бойка (рис. 3) падает пропорционально росту противодействия со значения 4,2 м/с при отсутствии противодействия до 1,5 м/с при абсолютном давлении в выхлопном тракте 0,5 МПа, после чего боек отходит в исходное положение и останавливается (рис. 2–4). Также из графика перемещений бойка ударника (рис. 2) видно, что по мере роста противодействия в выхлопном тракте увеличивается его рабочий ход. Одновременно с ростом рабочего хода увеличивается время цикла и снижается частота ударов бойка (рис. 2, 3).

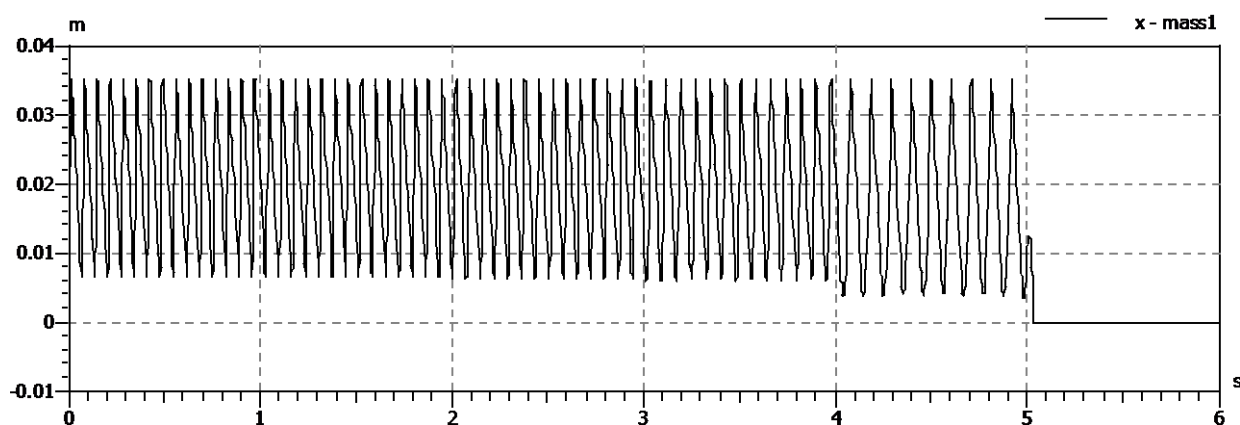


Рис. 2. График перемещений бойка пневмоударника (м)

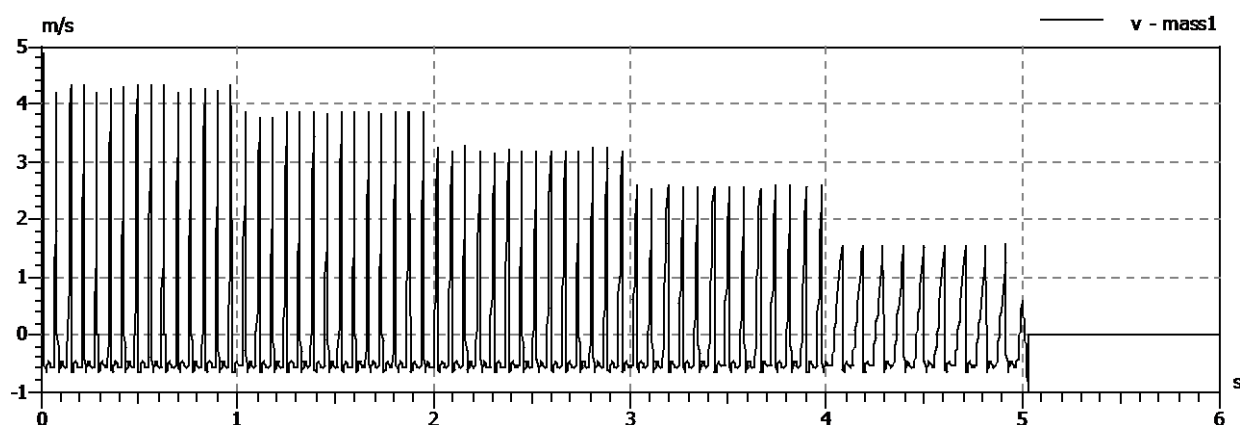


Рис. 3. График скорости бойка пневмоударника (м/с)

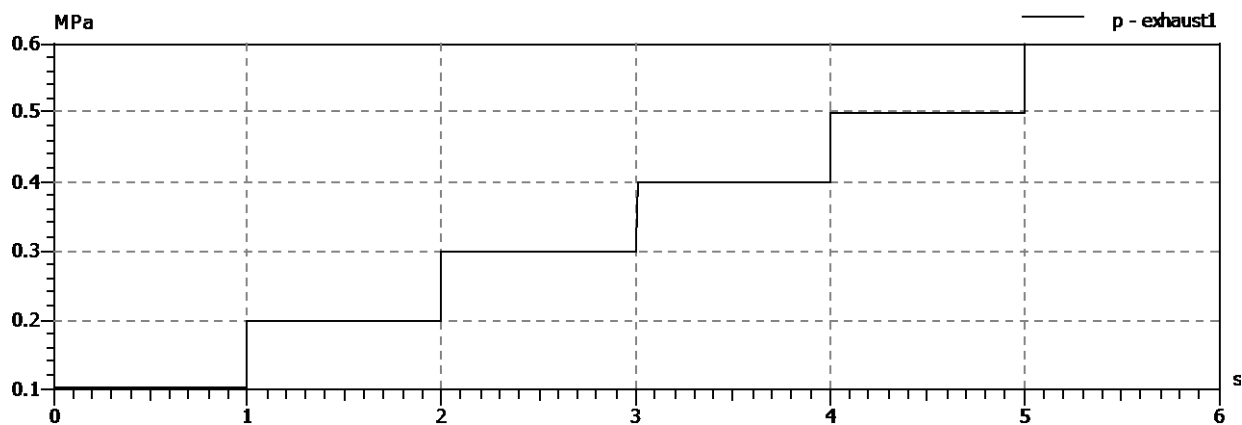


Рис. 4. График абсолютного давления в выхлопном тракте (МПа)

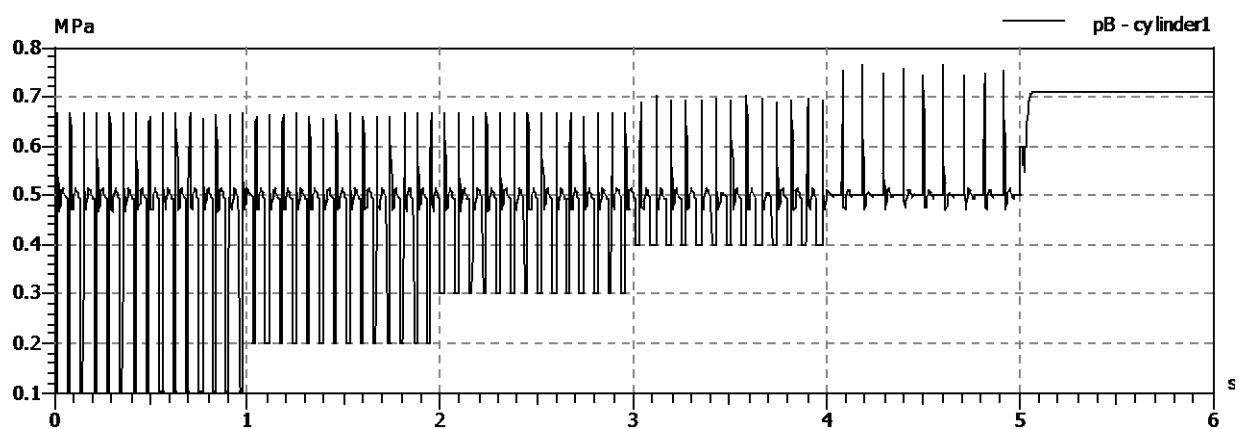


Рис. 5. График абсолютного давления в передней камере (обратного хода) (МПа)

Таким образом, математическое моделирование показывает, что с увеличением противодействия в выхлопном тракте пневмударной машины с кольцевым эластичным клапаном растет рабочий ход бойка, падает его предупредная скорость и частота ударов, и в конечном счете происходит остановка бойка.

Для оценки степени достоверности результатов моделирования и адекватности построенной модели было проведено экспериментальное исследование работы пневмударной машины «Тайфун-4» в условиях противодействия в выхлопном тракте. Цель исследования заключалась в получении индикаторных диаграмм давления воздуха в рабочих камерах машины при различных значениях противодействия. Одновременно с этим измерялась величина расхода воздуха [2, 11]. Эксперименты проводились на специальном стенде, с использованием цифровой измерительной аппаратуры (рис. 6). Для определения энергии и частоты ударов полученные индикаторные диаграммы обрабатывались по известной методике [2]. Результаты экспериментального исследования отражены на рис. 7, 8 и в таблице.

Энергия, частота ударов и расход воздуха при различном
противодавлении в выхлопном тракте

Противодавление P_3 , МПа	Энергия E ,		Частота F ,		Расход Q ,	
	Дж	%	Гц	%	м ³ /с	%
0,1	40	100	14,2	53,2	1,8	100
0,2	29	72,5	14,6	54,7	1,6	88,8
0,3	19	47,5	15,5	58	1,5	83,3
0,4	10,5	26,25	17,4	65,2	1,4	77,7

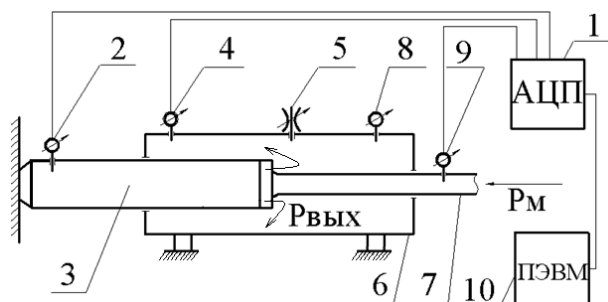


Рис. 6. Схема экспериментального стенда:

1 – АЦП (аналого-цифровой преобразователь); 2 – тензодатчик расположенный в камере обратного хода; 3 – пневмомолот «Тайфун – 4»; 4 – тензодатчик расположенный в камере противодавления; 5 – дроссель переменной сечености; 6 – камера противодавления; 7 – магистраль подачи сжатого воздуха; 8 – манометр; 9 – тензодатчик расположенный в камере прямого хода; 10 – ПЭВМ

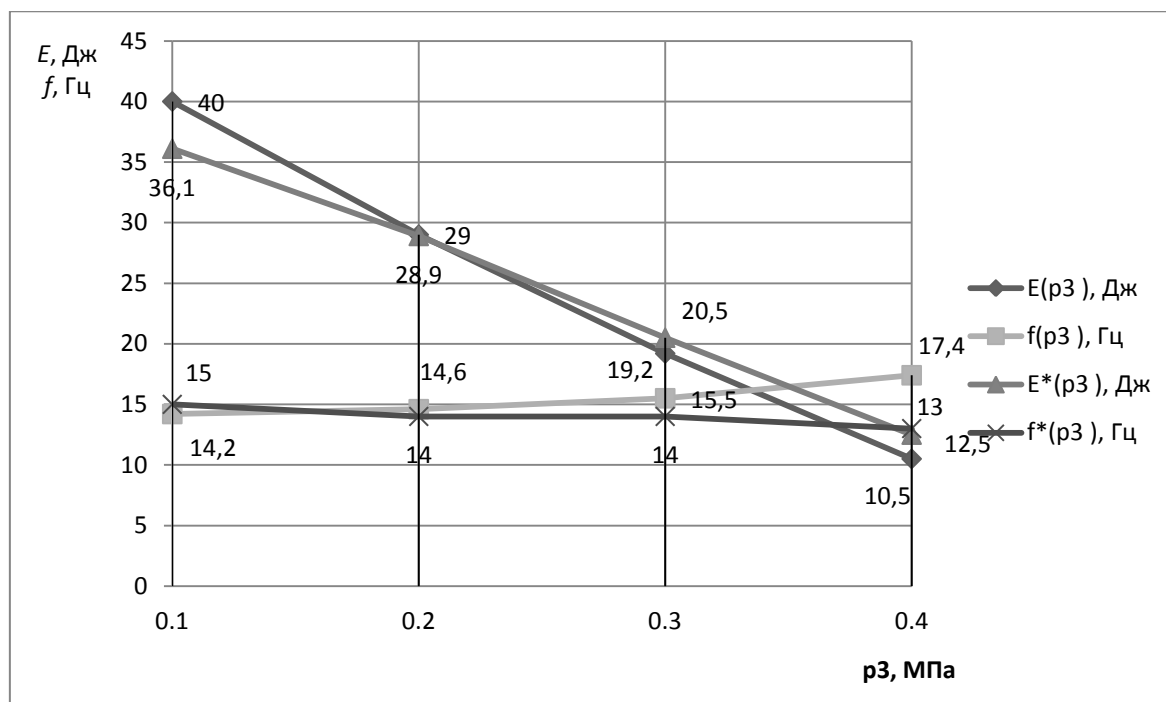


Рис. 7. Зависимость экспериментальных (E , f) и расчетных (E^* , f^*) значений энергии и частоты ударов от противодавления в выхлопном тракте

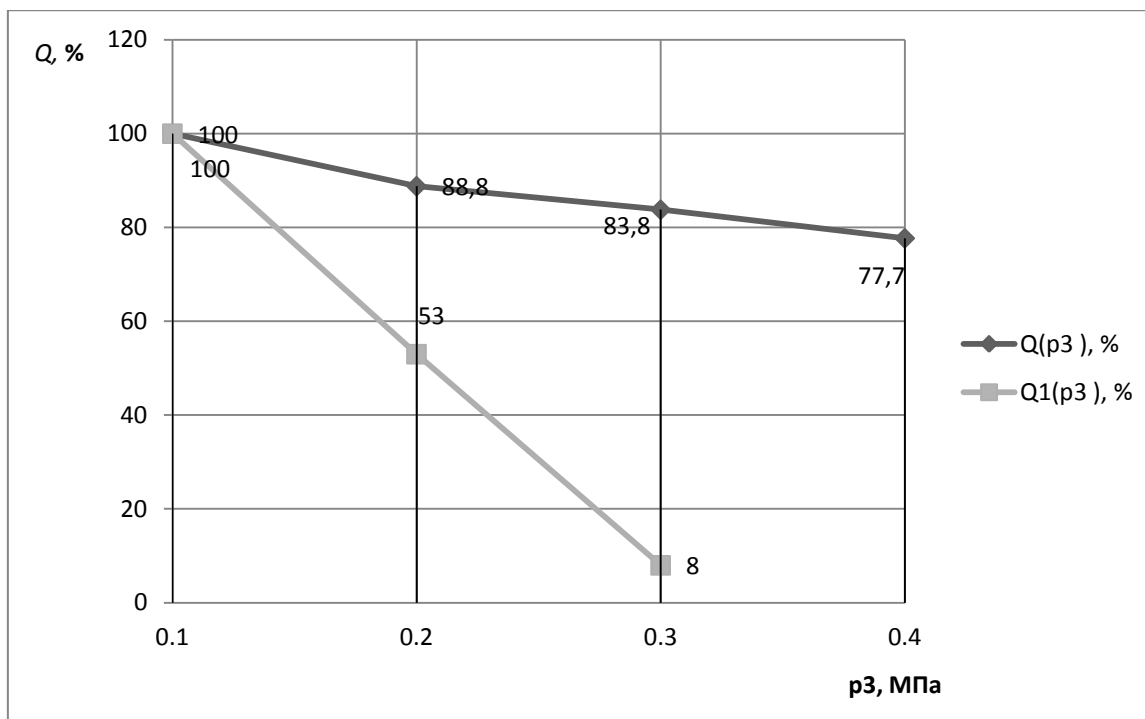


Рис. 8. Зависимость расхода воздуха (%) от противодавления для машин с эластичным клапаном (Q) и бесклапанных машин с одной управляемой камерой (Q_1)

Обсуждение

Из графиков рис. 7 видно, что результаты расчетов находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными, что позволяет в дальнейшем применять рассмотренную модель для расчета аналогичных задач.

По результатам расчетных и экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что при наличии противодавления в выхлопном тракте динамические характеристики пневмоударной машины с эластичным клапаном ухудшаются: уменьшается предупредная скорость и расход воздуха, незначительно уменьшается частота ударов, увеличивается рабочий ход бойка ударника. Но величина потери ударной мощности при этом меньше, по сравнению с бесклапанным пневмоударным механизмом при одинаковом значении противодавления. Расход воздуха при увеличении противодавления в механизме с эластичным клапаном (рис. 8) также уменьшается не столь значительно, по сравнению с бесклапанным пневмоударником при тех же условиях. Это позволяет говорить о большей стабильности работы системы «пневмоударный механизм – пневмотранспортная магистраль».

Заключение

Данная методика может быть применима для оценки возможности использования таких машин в качестве погружного генератора ударных импульсов

в различных буровых технологических процессах как более перспективных по сравнению с бесклапанными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Maidl, B. Hardrock Tunnel Boring Machines / B. Maidl, L. Schmid, W. Ritz, M. Herrenknecht. – Berlin: Ernst & Sohn, 2008. – 343 p.
2. Данилов Б. Б. Пути совершенствования технологий и технических средств для бес-траншейной прокладки коммуникаций // ФТПРПИ. – 2007. – № 2. – С. 69–75.
3. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Мюнцер Е. Г. Некоторые результаты исследова-ния противодействия в выхлопном тракте погружного геологоразведочного пневмударника на его энергетические параметры // ФТПРПИ. – 1985. – № 6.
4. Ткач Х. Б. О работе пневматического поршневого привода с выхлопом в среду с давлением большим атмосферного // ФТПРПИ. – 1996. – № 6. – С. 63–71.
5. Tishchenko I. V., Chervov V. V., Smolyanitsky B. N. Evaluation of layout of air drill hammer with smooth adjustment of impact impulse frequency // Journal of Mining Science. – 2017. – № 53 (1). – С. 109–116.
6. Tishchenko I. V., & Chervov V. V. Influence of energy parameters of shock pulse generator on the pipe penetration velocity in soil // Journal of Mining Science. – 2014. – № 50 (3). – С. 491–500.
7. David Meinel, Florian Faltus, Jörg Franke, An Introduction of Two Different Modelica System Integration Concepts // Procedia CIRP, Volume 50 – 2016. – С. 502–507.
8. Jomartov, A., Joldasbekov, S. Typical dynamic models of the cyclic mechanism on the software SimulationX. // IFToMM World Congress Proceedings, IFToMM 2015, 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS11.001.
9. Kim, D. M., Lee, J. M., Jung, W. J., Jang, J. S. A study on the efficiency of a load sensing main control valve using simulationx. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A – 2016. – № 40 (1). – С. 87–95.
10. Chervov, V. V., Chervov, A. V. Determination of operability conditions for ring-shaped elastic valve in air hammer with variable structure of impact capacity // Journal of Mining Science. – 2015. – № 51 (6). – С. 1132–1138.
11. Сметные нормы и расценки на новые технологии в строительстве. Часть IV / под общей редакцией Горячкина П. В. – М. : КИЦС, 2010. – 576 с.

REFERENCES

1. Maidl, B. Hardrock Tunnel Boring Machines (2008). / B. Maidl, L. Schmid, W. Ritz, M. Herrenknecht. Berlin: Ernst & Sohn,. – 343 p.
2. Danilov B.B. (2007). *Puti sovershenstvovaniya tekhnologiy I tekhnicheskikh sredstv dlya bestransheyroy prokladki kommunikatsiy* [Ways to improve technologies and technical means for trenchless laying of communications] *FTPRPI*, 2, 69–75 [in Russian].
3. Danilov B.B., Smolyanitsky B.N. & Muncer E.G. (1985). *Nekotorye rezultaty issledovaniya protivodavleniya v vyhlopnom trakte pogrughnogo geologorazvedochnogo pnevmoudarnika na ego energeticheskie parametry* [Some results of a study of counterpressure in the exhaust tract of a submerged geological exploration hammer on its energy parameters] *FTPRPI*, 6 [in Russian].
4. Tkach Kh. B. (1996). *O rabote phevmaticheskogo porshnevoy privoda s vyhlopom v sredu s davleniem bolshe atmosfernogo* [On the operation of a pneumatic piston drive with exhaust in a medium with a high atmospheric pressure] *FTPRPI*, 6, 63–71 [in Russian].

5. Tishchenko, I. V., Chervov, V. V., & Smolyanitsky, B. N. (2017). Evaluation of layout of air drill hammer with smooth adjustment of impact impulse frequency. *Journal of Mining Science*, 53(1), 109-116. 10.1134/S106273911701192X.
6. Tishchenko, I. V., & Chervov, V. V. (2014). Influence of energy parameters of shock pulse generator on the pipe penetration velocity in soil. *Journal of Mining Science*, 50(3), 491-500. 10.1134/S1062739114030119.
7. David Meinel, Florian Faltus & Jörg Franke, (2016) An Introduction of Two Different Modelica System Integration Concepts, *Procedia CIRP*, Volume 50, Pages 502-507, ISSN 2212-8271.
8. Jomartov, A., & Joldasbekov, S. (2015). Typical dynamic models of the cyclic mechanism on the software SimulationX. Paper presented at the 2015 IFToMM World Congress Proceedings, IFToMM 2015, 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS11.001.
9. Kim, D. M., Lee, J. M., Jung, W. J., & Jang, J. S. (2016). A study on the efficiency of a load sensing main control valve using simulationx. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*, 40(1), 87-95. 10.3795/KSME-A.2016.40.1.087.
10. Chervov, V. V., & Chervov, A. V. (2015). Determination of operability conditions for ring-shaped elastic valve in air hammer with variable structure of impact capacity. *Journal of Mining Science*, 51(6), 1132-1138. 10.1134/S1062739115060393.
11. Goryachkina P. V. (2010). *Smetnye normy i raschenki na novye technologii v stroitelstve .Chast IV. [Estimated rates and prices for new technologies in construction]*. Moscow: KCCS, 576 p. [in Russian].

© Б. Б. Данилов, А. А. Речкин, Б. Н. Смоляницкий, 2018

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ПОВОРОТА ОТКЛОНЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА КОРПУСА УПРАВЛЯЕМОГО ПНЕВМОПРОБОЙНИКА

Борис Борисович Данилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (383)205-30-30, доп. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Александр Аркадьевич Речкин

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. (383)205-30-30, доп. 157, e-mail: lexher68@gmail.com

Дмитрий Олегович Чецин

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. (383)205-30-30, доп. 157, e-mail: dimich@mail.ru

При проходке протяженных скважин в приповерхностном грунтовом слое широкое распространение получил метод прокола. Одним из наиболее эффективных технических средств, для его реализации, являются пневмопробойники. Основным фактором, сдерживающим дальнейшее развитие технологии виброударного прокола пневмопробойниками, является недостаточная точность выхода скважины в заданную точку подземного пространства. Решение этой проблемы связано с созданием управляемых пневмопробойников, изменяющих траекторию движения по команде оператора. В работе предложена принципиальная конструктивная схема механизма изменения траектории движения пневмопробойника. Описан алгоритм определения величины отклонения задней части пневмопробойника в грунтовом массиве, основанный на определении деформации слоя грунта при действии отклоняющего усилия. В соответствии с приведенным алгоритмом и прочностным расчетом установлены зависимости для определения силовых и геометрических параметров механизма изменения траектории движения пневмопробойника.

Ключевые слова: скважина, пневмопробойник, бестраншейные технологии, скважины криволинейной траекторией, корректировка траектории пневмопробойника.

DETERMINATION OF A TURNING ANGLE OF A DEFLECTING ELEMENT BELONGING TO CONTROLLED PNEUMATIC PUNCH

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Chief Researcher, Mining and Construction GeoEquipment Department, phone: (383)205-30-30, extension 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Aleksander A. Rechkin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, Mining and Construction GeoEquipment Department, phone: (383)205-30-30, extension 157, e-mail: lexher68@gmail.com

Dmitriy O. Cheshchin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, Mining and Construction GeoEquipment Department, phone: (383)205-30-30, extension 157, e-mail: dimixch@mail.ru

A puncture method is widely used in drilling of extended boreholes in the surface layer. One of the most effective technical means for its implementation is pneumatic punchers. The main factor restraining the further development of the puncture technology by pneumatic punchers is the lack of accuracy of well exit at a given point in the underground space. The creation of controlled pneumatic punchers, changing the trajectory of motion by the command of the operator, is a solution to the problem. A principal constructing scheme of a mechanism changing the trajectory of a pneumatic punch is proposed. Also, the paper proposes an algorithm used to determine the deviation of the pneumatic punch back in soil based on the determination of the soil layer deformation under the action of a steering effort. According to the algorithm and strength calculations the authors establish dependencies in order to define the force and geometric parameters of the mechanism changing the pneumatic punch trajectory.

Key words: borehole, pneumatic punch, trenchless technology, curved-path hole, adjustment of pneumatic punch path.

Введение

Сооружение протяженных скважин в породном массиве, являются важнейшей составляющей технологий разведки и разработки месторождений полезных ископаемых как подземным, так и открытым способами. Кроме того скважины используются в подземном строительстве при установке анкерров, сооружении и укреплении фундаментов, для повышения устойчивости грунтовых инженерных сооружений, прокладки подземных инженерных коммуникаций и т. п. [1–4].

Одним из наиболее эффективных технических средств, для сооружения скважин методом прокола, являются пневмопробойники [4, 5]. Актуальной проблемой, сдерживающей дальнейшее развитие этой технологии, является повышение точности выхода скважины в заданную область подземного пространства. Поиск технических решений, которые позволили бы разрешить эту проблему начался практически одновременно с использованием пневмопробойников в подземном строительстве и продолжается в настоящее время [6, 7].

Эффективным решением этой проблемы является оснащение пневмопробойников дополнительным механизмом, позволяющим изменять траекторию их движения в грунтовом массиве по команде оператора. Для этого необходимо разработать принципиальную схему такого механизма и определить его основные параметры при взаимодействии с грунтовым массивом.

Методы и материалы

В работе применен комплексный подход, включающий анализ известных исследований и научно-технических разработок по теме работы, как отече-

венных, так и зарубежных авторов, постановку и проведение теоретических исследований методами математического моделирования.

Результаты

В ИГД СО РАН разработана конструктивная схема управляемого пневмопробойника, основанная на изменении его внешней формы за счет отклонения задней части корпуса (рис. 1) [8].

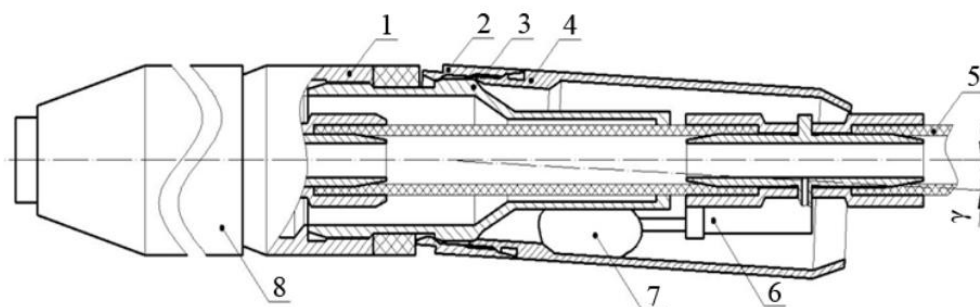


Рис. 1. Схема механизма управления траекторией пневмопробойника (при отклоненной задней части):

1 – гайка пневмопробойника; 2 – гайка; 3 – втулка; 4 – отклоняющаяся задняя часть; 5 – воздухоподводящий шланг; 6 – механизм управления; 7 – эластичная камера; 8 – пневмопробойник

Важной задачей исследования процесса движения такого пневмопробойника в породном массиве является определение необходимой величины отклонения задней части пневмопробойника, поскольку этот параметр в значительной мере определяет возможности корректировки траектории пневмопробойника.

На рис. 2 представлена схема механизма отклонения задней части пневмопробойника.

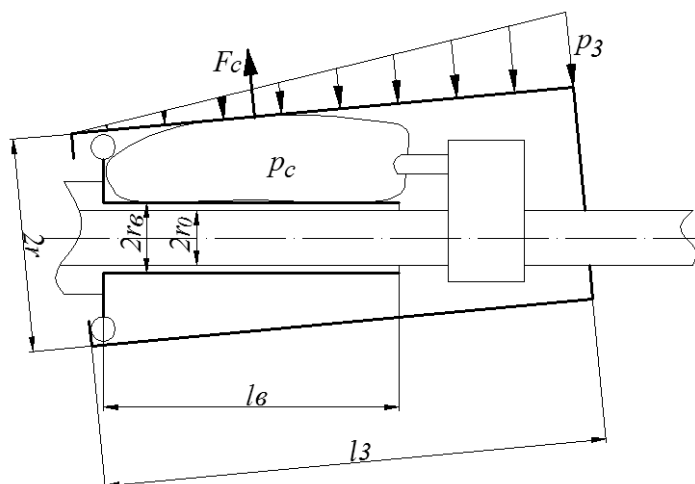


Рис. 2. Схема работы механизма отклонения управляемого пневмопробойника

При создании избыточного давления p_c в эластичной камере, последняя создает усилие F_c , действующее на заднюю часть корпуса машины в радиальном направлении. При развороте задней части вокруг шарнирной опоры создается дополнительное давление на стенку скважины, вызывающее соответствующую реакцию p_3 . Задачей исследования является количественное определение зависимости между величиной усилия F_c и углом поворота отклоняемой части с учетом свойств грунта.

При нагружении слоя грунта сплошной нагрузкой осадка грунта будет происходить за счет его уплотнения [9, 10]. Согласно [10], формула для определения осадки выглядит следующим образом:

$$S = \frac{h \cdot p \cdot \beta}{E_0}. \quad (1)$$

где h – высота уплотняемого слоя грунта, м;

p – давление на грунт, Па;

β – переходный коэффициент от компрессионного модуля деформации E_0 к модулю общей деформации E .

Критерием достаточности давления, является структурная прочность грунта. Необходимо, чтобы давление на грунт обеспечивало его деформацию (рис. 3).

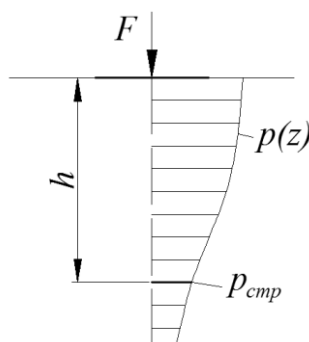


Рис. 3. Схема распределения вертикального давления в грунтовом массиве, возникающего под штампом, при действии на него сосредоточенной силы

Распределение вертикального давления в грунтовом массиве, возникающего под штампом, при действии на него сосредоточенной силы определяется из уравнения [10]:

$$p(z) = \frac{3 \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot z^2}. \quad (2)$$

На глубине $z = h$ давление уменьшается до значения структурной прочности и грунт не деформируется. Толщина уплотняемого слоя составит:

$$h = \sqrt{\frac{3 \cdot F}{2\pi \cdot p_{\text{стр}}}}. \quad (3)$$

Значение структурной прочности зависит от типа породного массива и определяется на основе известных исследований [11–13].

Для нахождения величины давления p_3 , действующего на грунтовый слой толщиной h , используется уравнение равновесия, в соответствии с рис. 2.

Усилие F_c , создаваемое эластичной камерой, создается сетевым давлением p_c , которое действует на втулку радиусом r_b и длиной l_b . Следовательно, отклоняющее усилие будет равно:

$$F_c = p_c \cdot 2 \cdot r_b \cdot l_b. \quad (4)$$

Тогда давление p_3 , создаваемое на контакте с грунтом и определяемое из условия равновесия системы вычисляется по формуле:

$$p_3 = \frac{3 \cdot p_c \cdot r_b \cdot l_b^2}{2 \cdot r \cdot l_3^2}. \quad (5)$$

Толщина слоя уплотняемого грунта определяется из уравнения (3):

$$h(l_3) = \sqrt{\frac{3 \cdot F(l_3)}{2\pi \cdot p_{\text{стр}}}}. \quad (6)$$

Значение силы, действующей на слой уплотняемого грунта (рис. 3), принимается равной силе на конце отклоненной части, которая эквивалентна результирующей силе от давления p_3 :

$$F(l_3) = \frac{2 \cdot p_c \cdot l_b^2 \cdot r_b}{l_3}. \quad (7)$$

Таким образом:

– толщина уплотняемого слоя грунта составляет:

$$h(l_3) = \sqrt{\frac{3 \cdot p_c \cdot l_b^2 \cdot r_b}{\pi \cdot l_3 \cdot p_{\text{стр}}}}; \quad (8)$$

– величина погружения конца отклоняемой части пневмопробойника в грунт на основе уравнения (1):

$$S(l_3) = \frac{3 \cdot p_c \cdot r_b \cdot l_b^2 \cdot \beta}{2 \cdot r \cdot l_3^2 \cdot E_0} \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{p_c \cdot l_b^2 \cdot r_b}{\pi \cdot l_3 \cdot p_{стр}}}; \quad (9)$$

– угол отклонения определяется через его тангенс:

$$\gamma = \arctg \left[\frac{3 \cdot p_c \cdot r_b \cdot l_b^2 \cdot \beta}{2 \cdot r \cdot l_3^3 \cdot E_0} \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{p_c \cdot l_b^2 \cdot r_b}{\pi \cdot l_3 \cdot p_{стр}}} \right]. \quad (10)$$

Для определения усилия, создаваемого эластичной камерой, необходимо установить максимально достижимую величину ее опорной поверхности на неподвижной центральной втулке. Длина этой втулки l_b определяется из условия обеспечения ее конструктивной прочности [14]:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \leq [\sigma], \quad (11)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальное нормальное напряжение во втулке;

$M_{\max}$ – изгибающий момент;

W_z – момент сопротивления сечения;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение.

Представив втулку, как консольную балку с распределенной нагрузкой, можно построить эпюру изгибающих моментов (рис. 4, а).

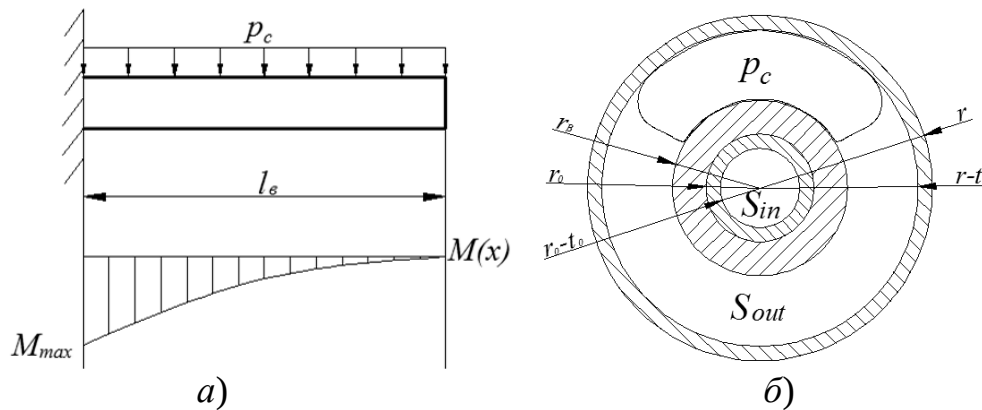


Рис. 4. Эпюра изгибающих моментов от распределенной нагрузки на опорной втулке (а) и поперечное сечение механизма отклонения пневмопробойника (б)

Как видно из рис. 4, а, максимальный изгибающий момент находится на защемленном конце балки и определяется выражением:

$$M_{\max} = p_c \cdot r_b \cdot l_b^2. \quad (12)$$

Рассматриваемая балка имеет сечение в форме кольца с внутренним радиусом r_0 и наружным $r_е$. Осевой момент сопротивления при этом равен:

$$W_z = \frac{\pi \cdot r_е^3}{4} \left(1 - \frac{r_0^4}{r_е^4} \right). \quad (13)$$

Из условия прочности, приняв в качестве допускаемого напряжения предел текучести материала втулки σ_T и с учетом формул (7), (13), можно получить формулу для определения максимальной длины опорной втулки (рис. 1):

$$l_B = \sqrt{\frac{\pi \cdot \sigma_T \cdot r_B^2 \cdot \left(1 - \frac{r_0^4}{r_B^4} \right)}{4 \cdot p_c}}. \quad (14)$$

Внешний радиус опорной втулки определяется из условия обеспечения необходимой площади сечения выхлопного канала (рис. 4, б).

В результате исследований [5] и в процессе анализа конструкций серийных пневмопробойников установлен некоторый усредненный удельный показатель, отражающий отношение площади сечения выхлопных каналов к площади сечения впускного канала, который равен:

$$\frac{S_{out}}{S_{in}} = (2,5 \div 3,5). \quad (15)$$

Приняв среднее значение этого показателя, согласно рис. 4, б, при условии, что эластичная камера перекрывает площадь сечения выхлопного канала в пределах $S_{out}/3$, внешний радиус опорной втулки определяется по формуле:

$$r_B = \sqrt{(r-t)^2 - 4.5(r_0 - t_0)^2}, \quad (16)$$

где r – внешний радиус отклоненной части, м;

t – толщина стенки отклоненной части, м;

r_0 – внешний радиус патрубка впускного канала, м;

t_0 – толщина стенки патрубка впускного канала, м.

Обсуждение

Таким образом, выражение (10) устанавливает зависимость угла поворота механизма отклонения управляемого пневмопробойника от его конструктивных и силовых параметров, а также свойств массива. Прочностной расчет определяют выражения (14), (16), характеризующие конструктивные параметры механизма отклонения в зависимости от прилагаемой нагрузки. Совместное исполь-

зование этих выражений позволяет определить параметры механизма отклонения управляемого пневмопробойника, обеспечивающие корректировку траектории его движения в грунтовом массиве.

Заключение

Установленные зависимости между величиной силового отклоняющего воздействия, прочностными характеристиками грунта и геометрическими параметрами отклоняющего механизма позволяют осуществить конструкторскую разработку пневмопробойника с механизмом управления траекторией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Seiki Takano, Kentaro Hayashi, Kouki Zen and Rouzbeh Rasouli. Controlled Curved Drilling Technique in the Permeation Grouting Method for Improvement Works of an Airport in Operation / *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 143. – С. 539–547.
2. Yao Ningpinga, Zhang Jie, Jin Xinga, Huang Hanjinga. Status and Development of Directional Drilling Technology in Coal Mine / *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 73. – С. 289–298.
3. Shadrina A., Saruev L., Vasenin S. The technology improvement and development of the new design-engineering principles of pilot bore directional drilling // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 43 (2016) 012068. doi:10.1088/1755-1315/43/1/012068.
4. Рыбаков А.П. Основы бестраншейных технологий. – М.: Пресс Бюро № 1, 2005. – 304 с.
5. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Пневмопробойники. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 1990. – 217 с.
6. Костылев А.Д., Тупицын К.К., Чередников Е.Н., Караваев А.Т. Управляемый пневмопробойник // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 1985. – № 4. – С. 59–63.
7. Danilov B.B., Smolyanitsky B.N., Cheshchin D.O. Justification of basic diagrams of horizontal drilling deflectors // *Journal of Mining Science*. – 2015. – Т. 51. – № 3. – С. 553–561.
8. Смоляницкий Б.Н., Данилов Б.Б., Сырямин Н.Д., Чещин Д.О. Пат. 156648 Российская Федерация, МПК Е 21 В 7/08, Е 02 F 5/18. Устройство для изменения направления движения пневмоударной машины; заявитель и обладатель Институт горного дела СО РАН. – № 2015115184/03; заявл. 22.04.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.
9. W Norhaliza, B Ismail, A T S Azhar and N J Nurul. Shear Strength of Remoulding Clay Samples Using Different Methods of Moulding // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 136 (2016) 012018. doi:10.1088/1757-899X/136/1/012018.
10. Дорошкевич Н.М., Клейн Г.К., Смиренин П.П. Основания и фундаменты: учебник для техникумов. 4-е изд., перераб. и доп.. – М.: Высшая школа, 1972. – 256 с.
11. Осипова М.А., Свиридов В.Л. Структурная прочность как критерий оценки деформируемости лессовых грунтов // *Ползуновский вестник*. – 2013. – № 4-1. – С. 26–28.
12. Osipova O.N., Dyba V.P., Galashev Yu.V. Depth Study of Compressible Thickness of the Base in Full-scale Experiment // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol.150. – С. 2245–2249.
13. Kramarenko V. V., Nikitenkov A. N., Molokov V. Y., Matveenko I. A. and Shramok A. V. The Relationship of Physical Property Indicators and Clay Soil Structural Strength of Tomsk Oblast Territory // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 27 (2015) 012030. doi:10.1088/1755-1315/27/1/012030.
14. Подскребко М. Д. Соппротивление материалов : учебник. – Минск: Выш. шк., 2007. – 797 с.

REFERENCES

1. Seiki Takano ,KentaroHayashi, KoukiZen and Rouzbeh Rasouli (2016). Controlled Curved Drilling Technique in the Permeation Grouting Method for Improvement Works of an Airport in Operation. *Procedia Engineering*. Vol. 143 (pp. 539–547).
2. Yao Ningpinga, Zhang Jie, Jin Xinga, Huang Hanjinga (2014). Status and Development of Directional Drilling Technology in Coal Mine. *Procedia Engineering*. Vol.73. (pp. 289–298).
3. Shadrina A., Saruev L., Vasenin S. The technology improvement and development of the new design-engineering principles of pilot bore directional drilling. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 43 (2016) 012068. doi:10.1088/1755-1315/43/1/012068.
4. Rybakov A.P. (2005) *Osnovy bestranshejnih tehnologij*[Basics of trenchless technologies]. Moscow: Press Bjuro № 1. [in Russian].
5. Gurkov K.S., Klimashko V.V., Kostylev A.D. and other. (1990) *Pnevmoпробојniki* [Pneumatic hammers]. Novosibirsk: Izd-vo IGD SO RAN/ [in Russian].
6. Kostylev A.D., Tipicin K.K., Cherednikov E.N., Karavaev A.T. (1985) *Upravlyaemij pnevmoпробојnik* [Controlled pneumatic hammer] *Journal of Mining Science*. Vol. 4. (pp. 59–63). [in Russian].
7. Danilov B.B., Smolyanitsky B.N., Cheshchin D.O. (2015) Justification of basic diagrams of horizontal drilling deflectors. *Journal of Mining Science*.T. 51. № 3. (pp. 553–561).
8. Smolyanitsky B.N., Danilov B.B., Siryamin N.D., Cheshchin D.O. (2015) Patent RF No 156648. Novosibirsk: IP Russian Federation.
9. W Norhaliza, B Ismail, A T S Azhar and N J Nurul. Shear Strength of Remoulding Clay Samples Using Different Methods of Moulding. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 136 (2016) 012018. doi:10.1088/1757-899X/136/1/012018.
10. Doroshkevich N.M., Klejn G.K., Smirenkin P.P. (1972) *Osnovaniya I fundamenti: uchebnik dlya tehnikumov* [Grounds and basements]. Moscow: Visshaya shkola.[in Russian].
11. Osipova M.A., Sviridov V.L. (2013) *Strukturnaya prochnost kak kriterij ocenki deformiruемости lessovih gruntov* [Structural strength as a criterion for assessing the deformability of loess soils]. *Polzunovskiy vestnik*. Vol.4-1. (pp. 26–28). [in Russian].
12. Osipova O.N., Dyba V.P., Galashev Yu.V. (2016) Depth Study of Compressible Thickness of the Base in Full-scale Experiment. *Procedia Engineering*. Vol.150.(pp. 2245–2249).
13. Kramarenko V. V., Nikitenkov A. N., Molokov V. Y., Matveenko I. A. and Shramok A. V. The Relationship of Physical Property Indicators and Clay Soil Structural Strength of Tomsk Oblast Territory. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 27 (2015) 012030. doi:10.1088/1755-1315/27/1/012030.
14. Podskrebko M.D.(2007) *Soprotivlenie materialov: uchebnik* [Resistance of materials: textbook]. Minsk: Visshaya shkola. [in Russian].

© Б. Б. Данилов, А. А. Речкин, Д. О. Чеуцин, 2018

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОЛЬЦЕВОГО УПРУГОГО КЛАПАНА С КИНЕМАТИЧЕСКИМ ЗАМЫКАНИЕМ В ГИДРОУДАРНЫХ МЕХАНИЗМАХ ОБЪЕМНОГО ТИПА

Борис Борисович Данилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (383)205-30-30, доп. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Борис Николаевич Смоляницкий

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, профессор, зав. отделом горной и строительной геотехники, тел. (383)205-30-30, доп. 115, e-mail: bsmol@misd.nsc.ru

Вадим Валерьевич Плохих

Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191, аспирант-стажер кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины»

Представлены подходы к обоснованию применения упругого кольцевого клапана в распределительной системе гидроударного механизма, которая предназначена для подачи команд на перемещение ударника. Анализ различных распределительных устройств показал, что применение в них эластичного клапана в виде мембранного запорно-регулирующего элемента является чрезвычайно эффективным. Этот клапан обеспечивает упрощение конструкции гидроударника, так как исключает применение золотника, и повышает технологичность изготовления. Но, несмотря на простоту конструкции по сравнению с известными, распределительное устройство на основе такого клапана не решает полностью проблему увеличения зазоров в трущихся парах гидроударных машин, что не позволяет снизить требования к точности их изготовления.

В настоящей статье применительно к созданию гидравлических устройств ударного действия объемного типа для проходки скважин в породных массивах обоснована принципиальная конструктивная схема с упругим кольцевым распределительным клапаном, деформируемым в радиальном направлении. Экспериментально определены условия срабатывания эластичного клапана, с учетом которых разработана конструкция, создан и экспериментально проверен действующий образец гидроударного устройства с таким клапаном. Подтверждена принципиальная возможность создания на основе этой схемы действующего экспериментального образца гидроударника.

Ключевые слова: скважина, породный массив, гидроударник, упругий клапан, условия срабатывания.

JUSTIFICATION OF EMPLOYMENT OF ELASTIC RING VALVE WITH KINEMATIC CLOSING IN HYDRAULIC IMPACT DEVICES

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Chief Researcher, Mining and Construction GeoEquipment Department, phone: (383)205-30-30, extension 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Boris N. Smolyanitsky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Professor, Head of Mining and Construction GeoEquipment Department, phone: (383)205-30-30, extension 115, e-mail: bsmol@misd.nsc.ru

Vadim V. Plokhikh

Siberian Transport University, 191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia, Ph. D. Student, Intern, Lifting, Hoisting, Construction and Road-Building Machines Department

The paper presents several approaches to the use justification of an elastic annular valve in the distribution system of a hydraulic impact mechanism. The distribution system is intended to provide instructions for the movement of the hammer. The analysis of various switchgears has showed that the use of an elastic valve as a membrane shut-off and control element is highly effective. The valve simplifies the hydraulic hammer design, since it excludes the use of a slide valve, and improves the manufacturability. However, despite the simplicity of the design in comparison with the known ones, the switchgear based on this type of valve does not completely solve the problem of increasing clearances in friction of hydraulic impact machines. Therefore, it is impossible to reduce the requirements for the accuracy of their manufacture.

The authors of the article justify the use of a basic structural design with an elastic annular distributing valve which is radially deformable. The design is used in relation to the development of hydraulic impact tools of volumetric type used for drilling boreholes in rock mass, The operating conditions of the elastic valve have been experimentally determined and verified, inclusive of which a design has been developed, as well as an operating sample of a hydraulic impact tool with this type of valve. On the basis of this scheme the possibility of creating an operating experimental sample of a hydraulic hammer has been confirmed.

Key words: borehole, rock mass, hydraulic hammer, elastic valve, trigger conditions.

Введение

Гидравлические ударные машины находят все большее применение в горном деле для дробления негабаритов, в рабочих органах проходческих машин, в бурильных машинах погружного и выносного типа [1–3]. В строительстве они применяются для разрушения мерзлых грунтов и строительных конструкций, трамбования грунтов, забивки шпунта, свай, труб и выполнения других операций. Этому во многом способствовало повышение эксплуатационной надежности машин за счет упрощения их конструкции, внедрения новых технологий изготовления деталей.

Гидроударная машина – это устройство для преобразования кинетической или потенциальной энергии жидкости в энергию удара. Соответственно этому существуют гидроударные машины динамического и объемного типов. Гидрообъемные машины обладают более высокими энергетическими показателями и технологическими возможностями, но существенно сложнее по конструкции и в эксплуатации [4–6]. Устранение этих недостатков машин объемного типа позволит расширить область их применения. Главными задачами, требующими первоочередного решения при совершенствовании таких машин, являются увеличение допустимых зазоров в трущихся парах и создание простых гидрораспределительных устройств, свободных от большинства недостатков золотниковых распределителей.

Эксперименты

В этом направлении наиболее значимыми, на наш взгляд, являются работы сотрудников СибАДИ (г. Омск), направленные на разработку упругих запорно-регулирующих элементов [7–9] взамен золотников.

Схема, поясняющая принцип действия распределительного узла с упругим запорно-регулирующим элементом, приведена на рис. 1. В закрытом положении упругий элемент 4 (рис. 1, а) под действием давления жидкости в управляющей полости 2 перекрывает гидролинии 5 и 6. При этом происходит холостой ход (взвод) бойка гидравлического ударного устройства.

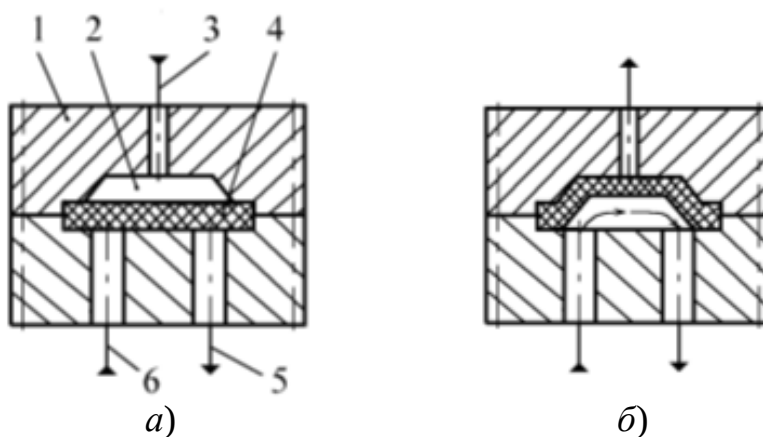


Рис. 1. Распределительный узел с плоским упругим запорно-регулирующим элементом:

1 – корпус; 2 – управляющая полость; 3 – гидролиния управляющей полости; 4 – упругий запорно-регулирующий элемент; 5 – отводящая гидролиния; 6 – подводящая гидролиния

В открытом положении упругого элемента 4 (рис. 1, б) происходит соединение управляющей полости 2 через гидролинию 3 со сливом. При этом давление в управляющей полости 2 падает, упругий элемент 4 деформируется, а гидролинии 5 и 6 соединяются между собой. Этому состоянию упругого элемента 4 в распределительном узле гидроударника соответствует рабочий ход бойка.

Этот же принцип положен в основу распределительного узла с кольцевым упругим элементом (рис. 2), в котором при открытом кольцевом проходном сечении 13 происходит перетекание рабочей жидкости при разгоне бойка гидроударника [8].

Распределительные узлы беззолотниковых гидроударников обладают малой инерционностью, хорошо komponуются в конструкцию гидроударника. При этом появляется возможность использования блочно-модульного принципа проектирования гидроударников.

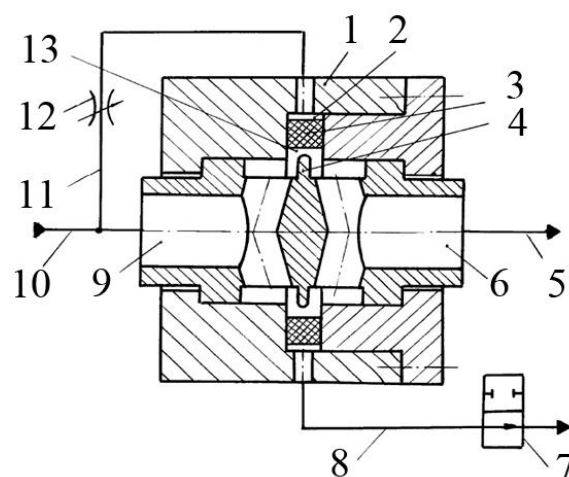


Рис. 2. Кольцевой распределительный узел беззолотникового гидроударника (проходное сечение открыто):

1 – корпус; 2 – управляющая полость; 3 – упругий элемент (прямоугольного сечения); 4 – разделитель; 5 – сливная гидролиния; 6 – канал отвода жидкости; 7 – распределитель; 8 – гидролиния; 9 – канал подвода жидкости; 10 – напорная гидролиния; 11 – гидролиния; 12 – дроссель; 13 – кольцевое проходное сечение

Но наличие в конструкции гидроударника распределительного элемента такого типа не позволяет уменьшить зазоры между ударником и ответными деталями и снизить требования к точности изготовления этих деталей.

Эта проблема решена в пневмомолотах «Тайфун» (рис. 3) [10] за счет применения упругого клапана, выполненного в виде кольца, с механическим замыканием при движении ударника для подачи команды на изменение его направления.

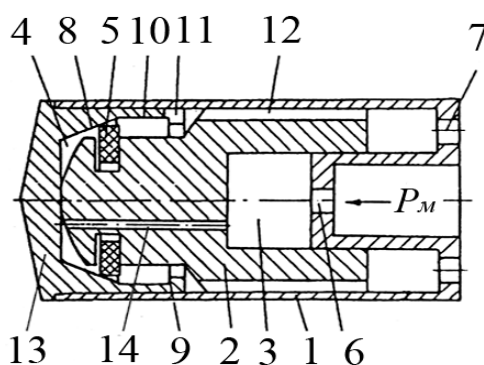


Рис. 3. Конструкция пневмомолота «Тайфун»:

1 – корпус; 2 – ударник; 3 – камера прямого хода; 4 – камера обратного хода; 5 – упругое кольцо; 6 – впускной канал подвода сжатого воздуха; 7 – выпускной канал; 8 – передний кольцевой выступ; 9 – ограничитель обратного хода; 10 – цилиндрическая поверхность; 11 – пазы; 12 – продольные направляющие выступы; 13 – наковальня; 14 – дроссельный канал.

Успешная работа в пневмомолотах такого клапана свидетельствует о целесообразности анализа возможности его применения в гидроударных машинах. Она обусловлена необходимостью создания гидравлической ударной машины, отличающейся от известных простой конструкции, технологичностью изготовления и повышенной надежностью работы.

Для оценки такой возможности в ИГД СО РАН проведены экспериментальные исследования, цель которых состояла в определении начальных условий срабатывания упругого клапана кольцевого типа [11].

Для этого был создан стенд, схема которого представлена на рис. 4. Ударник 2 и наковальня 1, изготовленная из органического стекла, размещены между двумя упорами 5. С помощью регулировочного винта 6, установленного в левом упоре, осуществлялось перемещение наковальни относительно ударника для обеспечения контакта с ней клапана. Необходимое рабочее давление жидкости на клапан создавалось ручным насосом 3. Для сглаживания колебаний давления в системе применялся гидропневмоаккумулятор 4.

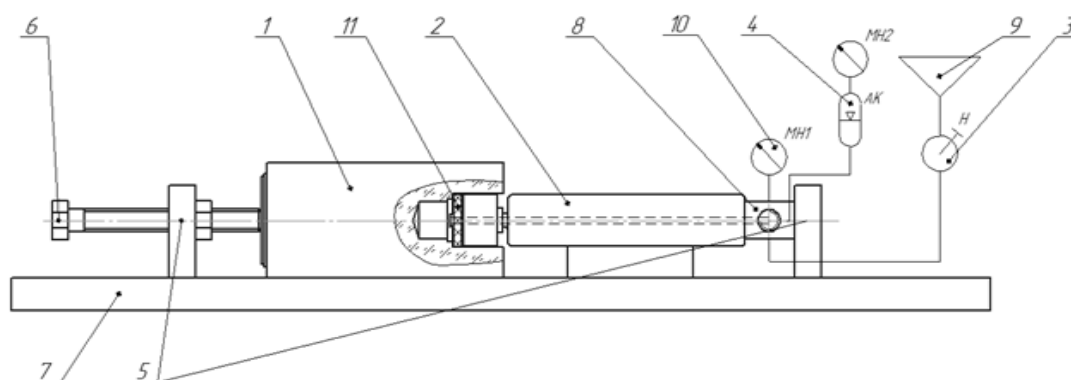


Рис. 4. Схема стенда:

1 – наковальня; 2 – ударник; 3 – насос высокого давления (домкрат); 4 – гидропневмоаккумулятор (25 МПа); 5 – упоры; 6 – регулировочный болт; 7 – швеллер; 8 – тройник; 9 – горловина; 10 – манометр (10 МПа); 11 – эластичный клапан

Задача экспериментального исследования на первом этапе заключалась в определении необходимой величины деформации упругого клапана, при которой обеспечивается герметизация камеры обратного хода. Упругий клапан диаметром 0,037 м, был установлен на ударнике с возможностью фиксируемого осевого перемещения для обеспечения механического контакта наружной поверхности клапана с наковальней при некотором зазоре Δ между ней и ударником (рис. 5). Это обеспечивало при касании торцов этих деталей деформацию клапана, необходимую для герметизации камеры обратного хода.

Надежность герметизации проверялась по давлению в камере в процессе движения ударника относительно наковальни при помощи регулировочного винта. При этом клапан под действием давления жидкости находился в растянутом состоянии. После перемещения на величину, соответствующую габаритному ходу

ударника в реальном ударном механизме, производилось плавное стравливание давления в камере обратного хода до наступления разгерметизации.

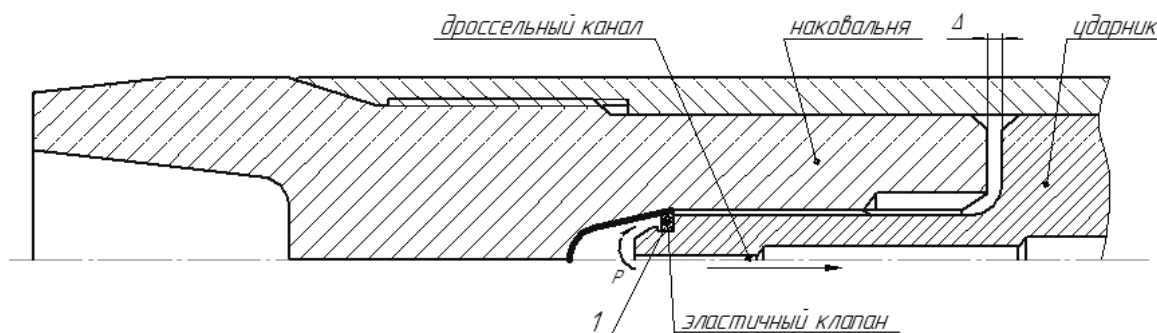


Рис. 5. Схемы работы эластичного клапана:

1 – упругий клапан в закрытом состоянии; Δ – величина перемещения клапана при закрытии; p – давление закрытия эластичного клапана

Обсуждение

Таким образом, в ходе опытов с клапанами из резины и полиуретана производилось определение деформации Δ клапана при закрытии, проверка его герметичности в рабочем диапазоне перемещений при изменении давления от 2 до 5 МПа и определение давления открытия эластичного клапана.

В результате экспериментально установлено, что:

1. При рабочем давлении 2 МПа линейная деформация резинового клапана, необходимая для обеспечения герметизации камеры составила 0,85 мм. В процессе перемещении клапана с поддержанием давления 2 МПа он обеспечивал герметичность рабочей камеры. Открытие клапана происходило при снижении давления до 0,8 МПа.

2. Эксперимент, проведенный при рабочем давлении 1,2 МПа, показал, что давление открытия клапана не изменилось и составило 0,8 МПа.

3. При давлении 4 МПа предварительное поджатие резинового клапана составило 1,9 мм. При перемещении резинового клапана вдоль оси камеры с поддержанием давления 4 МПа клапан оставался полностью закрытым. Давление открытия составляло 0,75–0,8 МПа.

4. При создании давления 5 МПа с полиуретановым клапаном потребовалась величина предварительного линейного деформирования 2 мм. При перемещении полиуретанового клапана с поддержанием давления 5 МПа на всем протяжении клапан оставался закрытым и обеспечивал герметичность камеры. Давление открытия составило 0,5 МПа.

Таким образом, максимальная герметичность рабочей камеры обеспечивалась полиуретановым клапаном с минимальным диаметром $\varnothing$ 37 мм, работающим при максимальном давлении 5 МПа в рабочей камере конусного типа

с величиной предварительного линейного деформирования 2 мм и минимальном давлении открытия 0,5 МПа.

После экспериментальной оценки условий срабатывания эластичного клапана был создан и опробован на стенде действующий макет гидроударного механизма с клапаном (рис. 6).

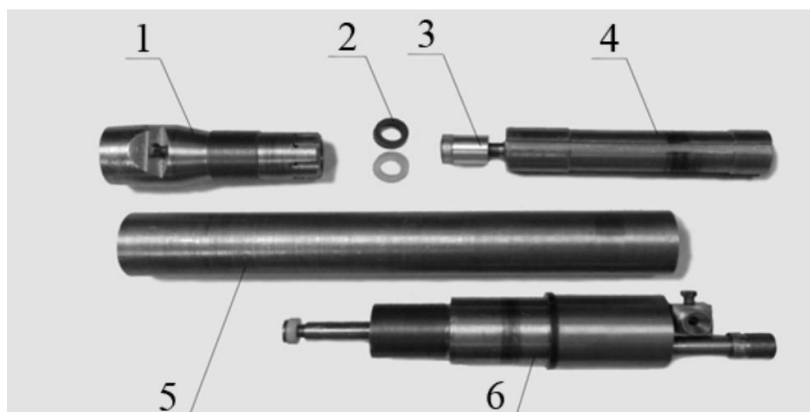


Рис. 6. Действующий макет гидроударного механизма с упругим клапаном:

1 – наковальня; 2 – упругие кольца; 3 – распределительный элемент; 4 – ударник;
5 – корпус; 6 – хвостовик

Заключение

Для создания гидравлических устройств ударного действия объемного типа для проходки скважин в породных массивах обосновано применение упругого кольцевого распределительного клапана, деформируемого в радиальном направлении.

Экспериментально определены условия срабатывания клапана, создан и экспериментально проверен действующий образец гидроударного устройства с таким клапаном. Подтверждена принципиальная возможность создания на основе этой схемы действующего экспериментального образца гидроударника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архипенко А. П., Федулов А. И. Гидравлические ударные машины. – Новосибирск: Ин-т горного дела СО АН СССР, 1991. – 106 с.
2. Ушаков Л. С., Котылев Ю. Е., Кравченко В. А. Гидравлические машины ударного действия. – М.: Машиностроение, 2000. – 415 с.
3. Lazutkin S. L., Lazutkina N. A. (2015) Perspective construction of hydraulic impact device // Procedia Engineering. – Vol. 129. – 2015. – С. 403–407.
4. Kiyama A., Tagawa Y., Ando K. and Kameda M. Effects of water hammer and cavitation on jet formation in a test tube, Journal of Fluid Mechanics 787. – 2016. – С. 224–236.
5. D Pepa, C Ursoniu, G R Gillich and C V Campian. Water hammer effect in the spiral case and penstock of Francis turbines, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 163 (2017) 012010 doi:10.1088/1757-899X/163/1/012010.
6. Kamil Urbanowicz.) Modern modeling of water hammer, Polish Maritime Research 3 (95). – Vol. 24. – 2017. – С. 68–77.

7. Галдин Н. С. Многоцелевые гидроударные рабочие органы дорожно-строительных машин. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2005. – 223 с.
8. 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.
9. Galdin N. S. Regression equations for basis parameters of hydraulic impact pulse systems, *Stroitel'nye i Dorozhnye Mashiny*. – 2002. – № 3. – С. 15–17.
10. Смоляницкий Б. Н., Червов В. В. Повышение эффективности использования энергоносителя в пневмомолотах для подземного строительства // ФТПРПИ. – 2014. – № 5. – С. 143–157.
11. Tishchenko I. V., & Chervov V. V. Influence of energy parameters of shock pulse generator on the pipe penetration velocity in soil. // *Journal of Mining Science*. – 2014. – № 50 (3). – С. 491–500.

REFERENCES

1. Arhipenko A.P., Fedulov A.I. (1991) *Gidravlicheskie udarnye mashiny [Hydraulic impact machines]*. Novosibirsk: IGD SO AN SSSR. [in Russian].
2. Ushakov L.S., Kotylev U.E., Kravchenko V.A. (2000) *Gidravlicheskie mashiny udarnogo dejstviya [Impact hydraulic machines]*. Moscow: Mashinostroenie. [in Russian].
3. Lazutkin S.L., Lazutkina N.A. (2015) Perspective construction of hydraulic impact device, *Procedia Engineering*, Vol.129, (pp. 403–407).
4. Kiyama A., Tagawa Y., Ando K. and Kameda M. (2016) Effects of water hammer and cavitation on jet formation in a test tube, *Journal of Fluid Mechanics* 787, 224–236.
5. D Pepa, C Ursoniu, G R Gillich and C V Campian. Water hammer effect in the spiral case and penstock of Francis turbines, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 163 (2017) 012010 doi:10.1088/1757-899X/163/1/012010.
6. Kamil Urbanowicz. (2017) Modern modeling of water hammer, *Polish Maritime Research* 3 (95) Vol. 24, (pp. 68–77).
7. Galdin N.C. (2005) *Mnogocелеvye gidroudarnye rabochie organi dorogno-stroitel'nyh mashin [Multi-purpose hydrostatic working bodies of road-building machines]*. Омск : Изд-во СибАДИ. [in Russian].
8. Galdin N.C., Bedrina E.A. (2003) *Kovshi aktivnogo dejstviya na osnove gidroudarnikov dlya ekskavatorov: Uchebnoe posobie [Buckets of active action on the basis of hammers for excavators: A manual]* Омск : Изд-во СибАДИ. [in Russian].
9. Galdin, N.S. (2002) Regression equations for basis parameters of hydraulic impact pulse systems, *Stroitel'nye i Dorozhnye Mashiny*, (3). (pp. 15–17).
10. Smolyanitsky B.N., Chervov V.V. (2014) *Povishenie effektivnosti ispolzovaniya energonositelya v pnevmomolotah dlya podzemnogo stroitelstva [Increasing the efficiency of energy carrier use in pneumatic hammers for underground construction]*. *Journal of Mining Science*. Vol.5. (pp. 143–157). [in Russian].
11. Tishchenko, I. V., & Chervov, V. V. (2014) Influence of energy parameters of shock pulse generator on the pipe penetration velocity in soil. *Journal of Mining Science*, 50(3). (pp. 491–500).

© Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий, В. В. Плохих, 2018

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ С УЧЕТОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Дмитрий Сергеевич Евстигнеев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник научно-инженерного центра горных машин и геотехнологий, тел. (983)127-88-52, e-mail: rdx0503@gmail.com

Андрей Владимирович Савченко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, научно-инженерный центр горных машин и геотехнологий, тел. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

Проведен анализ математических моделей, описывающих движение флюидов в пористых средах. Сформулированы критерии, которым должна удовлетворять модель фильтрации, учитывающая гармоническое волновое воздействие на флюидонасыщенную пористую среду. На основе количественного критерия капиллярности описан механизм образования капиллярно-защемленной остаточной нефти в связанных порах. Из решения уравнения изменения импульса жидкости в единичном капилляре найдена зависимость времени, требуемого для его пропитки от геометрических размеров и свойств движущегося флюида.

Ключевые слова: модель фильтрации, виброволновое воздействие, остаточная нефть.

ANALYSIS OF FILTRATION MODELS IN POROUS MEDIA INCLUSIVE OF HARMONIC WAVE IMPACT

Dmitry S. Evstigneev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, Mining Machinery and Geotechniques Research Center, phone: (983)127-88-52, e-mail: rdx0503@gmail.com

Andrey V. Savchenko

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Mining Machinery and Geotechniques Research Center, phone: (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

An analysis of mathematical models describing the motion of fluids in porous media is carried out. The criteria which the filtration model should meet are formulated. The filtration model has to take into account the harmonic wave action on the fluid-saturated porous medium. The mechanism of formation of capillary-trapped residual oil in connected pores is described on the basis of the quantitative criterion of capillarity. The dependence of the time required for the capillary saturation on the geometric dimensions and properties of the moving fluid is found from the equation solution of the change in the momentum of the liquid in a single capillary.

Key words: filtration model, vibrowave impact, residual oil.

Введение

В процессе разработки нефтяной залежи методом заводнения до 60 % нефти остается в пласте. Средний коэффициент извлечения нефти для активных запасов в России составляет 0,38–0,45 [1]. В процессе сейсмического мониторинга было замечено увеличение нефтеотдачи на ряде месторождений с удаленными землетрясениями [2], при этом обнаружена связь сейсмической активности с химическим составом флюидов, и увеличение газо-химических аномалий от роста сейсмического воздействия [3–6]. В Институте физики Земли АН СССР и Кубанском государственном университете в 70–80-е гг. были систематизированы многолетние наблюдения за сейсмической активностью различных участков Земли с целью теоретического обоснования возможности направленного сейсмического воздействия с поверхности на нефтяные пласты. Этому способствовало создание относительно мощных невзрывных поверхностных регулярных виброисточников, виброплатформ, предназначенных для вибрационного «прозвучивания» Земли [7]. Начиная с 60-х гг. на нефтяных месторождениях СССР начали применять воздействие упругими колебаниями на призабойную зону пласта с помощью спускаемых в скважины различных забойных устройств [8, 9]. Однако, несмотря на значительное число успешно проведенных экспериментов по стимуляции выхода нефти из продуктивных пластов методами виброволнового воздействия, все еще не разработана модель фильтрации несмешивающихся флюидов в пористой среде, обосновывающая выбор доминантных частот и амплитуд в зависимости от свойств флюидов и скелета породы. Для того, чтобы математически описать механизм увеличения нефтеотдачи при волновом воздействии на пласт необходимо выделить критерии подвижности капиллярно-защемленной нефти и увязать их с параметрами упругих волн и свойствами флюидов.

Влияние землетрясений на нефтеотдачу

Шмонов В. М. с соавторами [10] провели серию экспериментов, которые позволяют качественно объяснить процессы, проходящие в флюидо-вещающем природном резервуаре при прохождении в нем сейсмических волн.

На рис. 1 приведены результаты физического моделирования влияния сейсмической вибрации на проницаемость водонасыщенных образцов базальтов, габбро и известняков [10]. В эксперименте регистрировались обжимающее давление, моделирующее сейсмическую волну ($P_{ТВ}$), поровое давление в образце ($P_{ФЛ}$) и эффективное давление в скелете породы ($P_{ЭФФ}$). Частота осцилляций составляла 0,065 Гц, длительность воздействия – 0,25÷22 ч. Было обнаружено, что при величине давления обжима ниже порового давления, после сейсмического воздействия, проницаемость образцов резко возросла в 1,2–3,7 раза, что объясняется нарушением его структуры. В фазе понижения давления обжима происходило запаздывание в падении порового давления $P_{ФЛ}$. Это вы-

зывало резкий рост эффективного давления $P_{эфф}$ в скелете породы с превышением его предела прочности (фаза 3 на рис. 1). В результате происходил гидроразрыв и нарушение исходной структуры образца. В работах [11–14] отмечается резкое увеличение выноса шлама в скважины, особенно для карбонатных пород, после землетрясений.

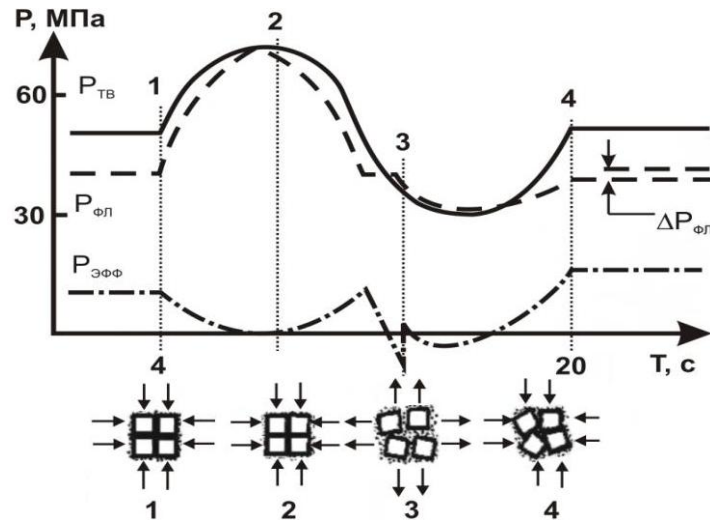


Рис. 1. Изменение обжимающего (P_{TB}), порового ($P_{ФЛ}$) и эффективного ($P_{эфф}$) давлений при прохождении сейсмической волны через горную породу [10, 15]:

1 – исходное состояние системы вода-порода; 2 – фаза повышения обжимающего и порового давлений и сжатия образца; 3 – фаза падения давления обжима, разрушение образца под действием порового давления; 4 – фаза сжатия, механическая дилатансия образца; $\Delta P_{ФЛ}$ – падение порового давления в результате нарушения структуры образца после сейсмической вибрации

Изменение порового давления $\Delta P_{ФЛ}$ в замкнутом резервуаре, в пренебрежении течением жидкости, определяется из уравнения [16, 17]:

$$\Delta P_{ФЛ} = -(2 \cdot G \cdot B / 3) \cdot [(1 + \nu_u) / (1 - 2 \cdot \nu_u)] \cdot \Delta \epsilon,$$

где G – модуль сдвига, ν_u – коэффициент Пуассона, $\nu_u \leq 0,5$ (при отсутствии движения жидкости), $\Delta \epsilon$ – изменение объемной деформации водовмещающих пород, B – коэффициент Скемптона, $0 \leq B \leq 1$, который связан с поровым давлением p и суммой главных напряжений $\sigma_{kk} = 1/3(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ выражением:

$$P_{ФЛ} = -B \cdot \sigma_{kk} / 3.$$

Вариации уровня жидкости в скважине Δh зависят от изменения порового давления $\Delta P_{ФЛ}$ по гидростатическому закону:

$$\Delta h = \Delta P_{\phi L} / (\rho \cdot g),$$

где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения.

По приведенным зависимостям можно, осуществляя мониторинг за изменением уровня жидкости в скважине, судить о изменении напряженно-деформированного состояния резервуара. Модель описывает эффект разуплотнения пород, слагающих резервуар и рост динамических уровней в скважинах после прохождения сейсмического события.

Одномерное течение в капилляре

Рассмотрим процесс самопроизвольного проникновения смачивающей жидкости в капилляр. На жидкость в капилляре действуют разность давлений, обусловленная капиллярными силами и равная P_k , и сила трения $F_{тр}$. Уравнение изменения импульса жидкости в капилляре имеет вид [18]:

$$\frac{d(\gamma_{жс} \pi \rho^2 z_f u)}{dt} = -\pi \rho^2 \cdot P_k - F_{тр}$$

где $\gamma_{жс}$ – удельный вес жидкости, ρ – радиус капилляра, t – время, z_f – координата мениска. Средняя скорость движения жидкости v совпадает со скоростью движения мениска $u = dz_f / dt$.

Предполагая, что в жидкости реализуется параболический пуазейлевский профиль скорости:

$$v(r) = \frac{2(\rho^2 - r^2)}{\rho^2} u,$$

для силы трения $F_{тр}$, согласно закону Ньютона получим:

$$F_{тр} = -2\pi \rho z_f \mu \frac{\partial v}{\partial r} = 8\pi \mu z_f u = 8\pi \mu z_f \frac{dz_f}{dt}$$

Подставляя $F_{тр}$ в выражение для изменения импульса получим обыкновенное дифференциальное уравнение для определения z_f :

$$\frac{d}{dt} \left(z_f \frac{dz_f}{dt} \right) = \left(\frac{dz_f}{dt} \right)^2 + z_f \frac{d^2 z_f}{dt^2} = -\frac{P_k}{\gamma_{жс}} - \frac{8\mu}{\gamma_{жс} \rho^2} z_f \frac{dz_f}{dt}$$

Его решением является

$$z_f(t) = \sqrt{\left(-\frac{\rho^2}{4\mu} P_k\right)} t = \sqrt{\left(\frac{\rho \cdot \sigma \cos \alpha}{2\mu}\right)} t.$$

Возведя в квадрат и введя обозначение для высоты поднятия жидкости в капилляре l , получим:

$$t(l) = \frac{\mu}{\sigma \cos \alpha} \cdot \frac{2 \cdot l^2}{\rho}.$$

Из полученного соотношения следует, что ускорение времени пропитки образцов керна вызвано изменением отношения гидродинамических сил к капиллярным, т. е. вязкости и смачиваемости капилляра.

Для описания количественных характеристик капиллярного защемления остаточной нефти необходимы детальные сведения о структуре порового пространства, сообщаемости пор, изменчивости геометрии пор, характере их смачиваемости и т.д. Комплексным параметром, характеризующим отношение гидродинамических сил к капиллярным, является число капиллярности, выражающее отношение вязкости к капиллярным силам [19]:

$$N_C = \frac{\mu \cdot u}{\sigma \cdot \cos \alpha}.$$

где μ – динамическая вязкость ганглии, u – ее средняя скорость, σ – межфазное натяжение, α – краевой угол смачивания.

Механизмы образования и вытеснения капиллярно защемленных фаз

Обобщив имеющиеся экспериментальные данные Н. Н. Михайлов [20–23] обосновал механизм капиллярного защемления нефти водой. При вытеснении нефти с низкими значениями капиллярного числа ($N_C \sim 10^{-7}$), соответствующими условиям процесса капиллярной пропитки в образцах, формируется капиллярно-защемленная остаточная нефть (ОН). При дальнейшем росте значений N_C ($10^{-7} - 10^{-5}$) показатели коэффициента остаточной нефтенасыщенности остаются постоянными. Однако, после достижения порога мобилизации он резко уменьшается. При дальнейшем росте значений N_C величина коэффициента остаточной нефтенасыщенности стремится к нулю. На рис. 2 приведены механизмы образования и вытеснения остаточной нефти в зависимости от характера проявления капиллярных и гидродинамических сил.

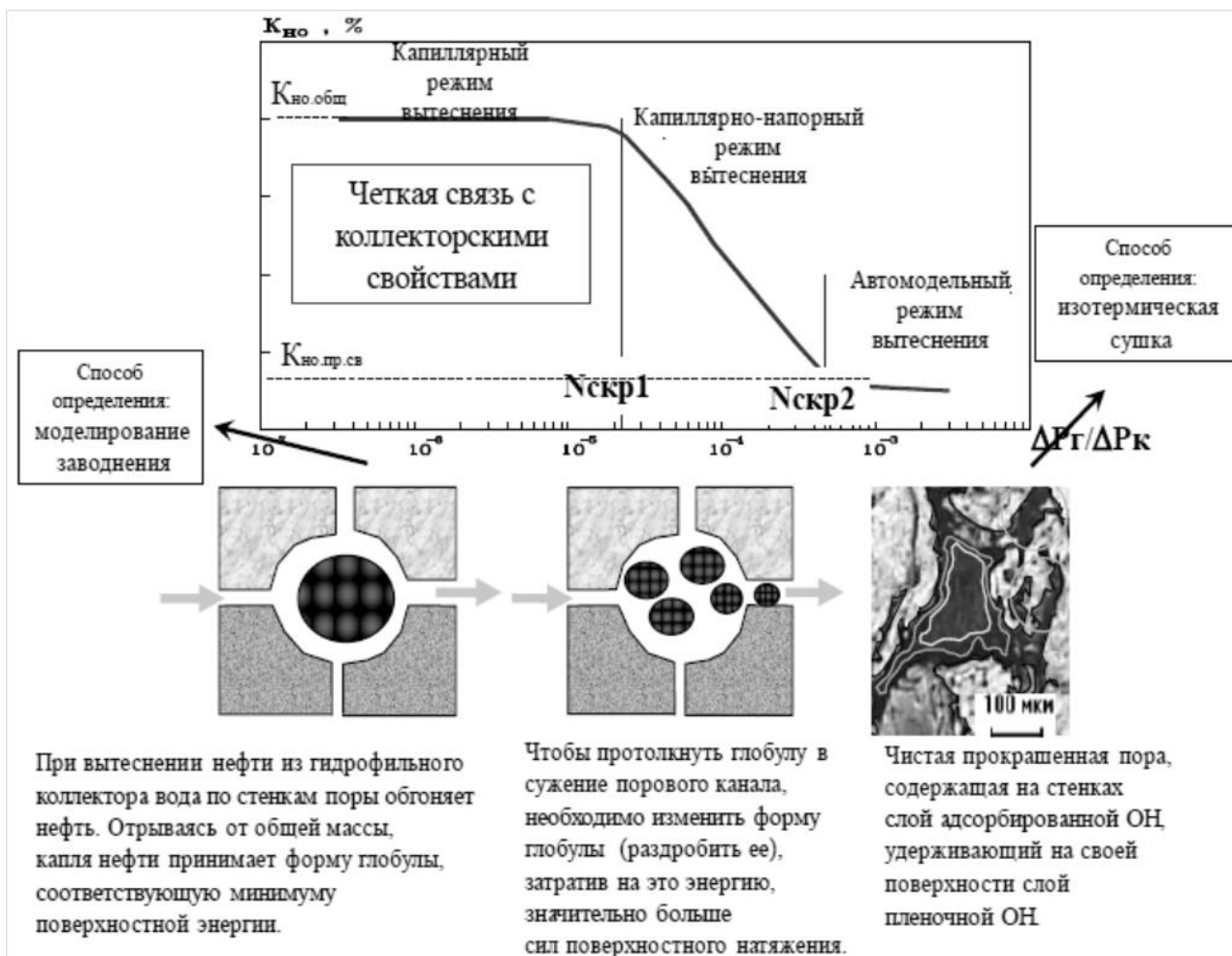


Рис. 2. Механизмы образования и вытеснения остаточной нефти в зависимости от характера проявления капиллярных и гидродинамических сил [21–24].

В качестве критерия мобилизации остаточной нефтенасыщенности в горной породе Н.Н. Михайлов предложил зависимость [23]:

$$K_{HO} = 1 - K_{BO} - C\Pi^f,$$

где Π – отношение напорных и капиллярных сил, C и f – коэффициенты, зависящие от структуры порового пространства, K_{BO} – коэффициент остаточного водонасыщения. Без учета эффектов структуры порового пространства и смачиваемости, параметр Π трансформируется в стандартную форму капиллярного числа N_C . Порогу мобилизации соответствует критическое значение капиллярного числа $N_{скр1}$, порогу вытеснения $N_{скр2}$, рис. 2.

На рис. 3 показан механизм образования остаточной нефти при вытеснении ее из пористого скелета.

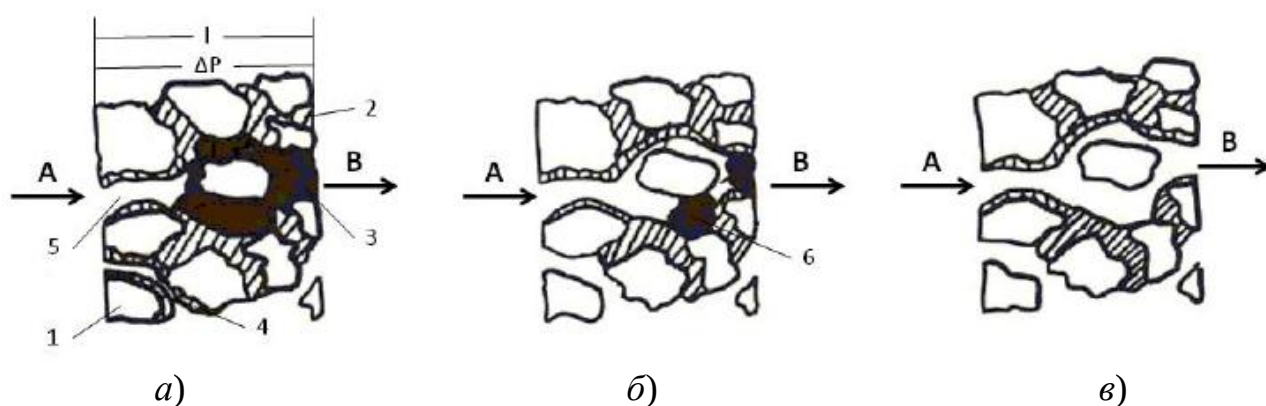


Рис. 3. Режимы образования капиллярно-защемленной остаточной нефтенасыщенности [24]:

а) начальная стадия вытеснения, б) капиллярно-напорный, в) автомодельный; направление фильтрации А-В; 1 – скелет; 2 – цемент; 3 – подвижная нефть; 4 – сорбированная нефть; 5 – вытесняющий агент; 6 – капиллярно защемленная нефть

Защемленная нефтяная капля в поре радиусом r_n приобретает подвижность в случае, если зональный гидродинамический перепад ΔP_Γ , превысит локальный капиллярный перепад [24]:

$$\Delta P_\Gamma > \frac{2\sigma}{r_n} D, \quad D = r_n \left(\frac{1}{2r} - \frac{1}{r_e} \right).$$

где D – показатель структурной сложности, коэффициент, зависящий от значений наступающего и отступающего контактного угла; σ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз; r_n – радиус поры, r_e – радиус входа в пору.

С ростом числа капиллярности, происходит уменьшение числа больших нефтяных капель и увеличение объема меньших капель. В то же время, большие капли, распадаясь, образуют меньшие дочерние капли, которые снова заземляются и теряют мобильность. Этот процесс идет до тех пор, пока большинство нефтяных капель не превратится в синглеты, что происходит при некотором критическом значении числа капиллярности; затем раздробленные капли защемленной нефти, приобретают подвижность и начинают выходить из системы [24].

Рассмотрим результаты эксперимента по воздействию акустическими волнами на флюид, приведенные в работе [25]. В испытательном стенде пористая среда моделировалась упаковкой стеклянных шаров одинакового диаметра (3 мм), уложенных в монослой. Пространство пор было заполнено минеральной водой, часть пор занята тетрахлорэтиленом (ТХЭ), не смешивающимся с водой. Начальное положение ганглии приведено на рис. 4, а). Перистальтическим насосом создавался поток воды в направлении слева на право, рис. 4, б). Расход плавно увеличивался и фиксировалась подвижность ганглии. При постоянном

расходе рассчитывалось капиллярное число $N_c = 0,94 \cdot 10^{-2}$, соответствующее началу движения ганглии. В последствии к общему потоку было приложено акустическое давление на флюид $P_s = 7,35$ кПа. Объемный расход плавно уменьшался. При $N_c = 0,7 \cdot 10^{-2}$ произошел динамический распад и прекращение подвижности ганглии, рис. 4, c), после чего акустическое воздействие на поток было прекращено. Оказавшись раздробленной на две части, ганглия потеряла свою мобильность, оставаясь неподвижной даже при большом значении капиллярного числа $N_c = 1,16 \cdot 10^{-2}$, рис. 4, d). Затем расход был уменьшен и при значении капиллярного числа $N_c = 0,73 \cdot 10^{-2}$ потребовалось приложить большее акустическое давление $P_s = 11,03$ кПа, чтобы раздробленные части ганглии снова пришли в движение. Объединившись в синглеты, рис. 4, e), в присутствии акустического давления $P_s = 11,03$ кПа, части ганглии продолжили свое движение вплоть до выхода из системы, рис. 4, f).

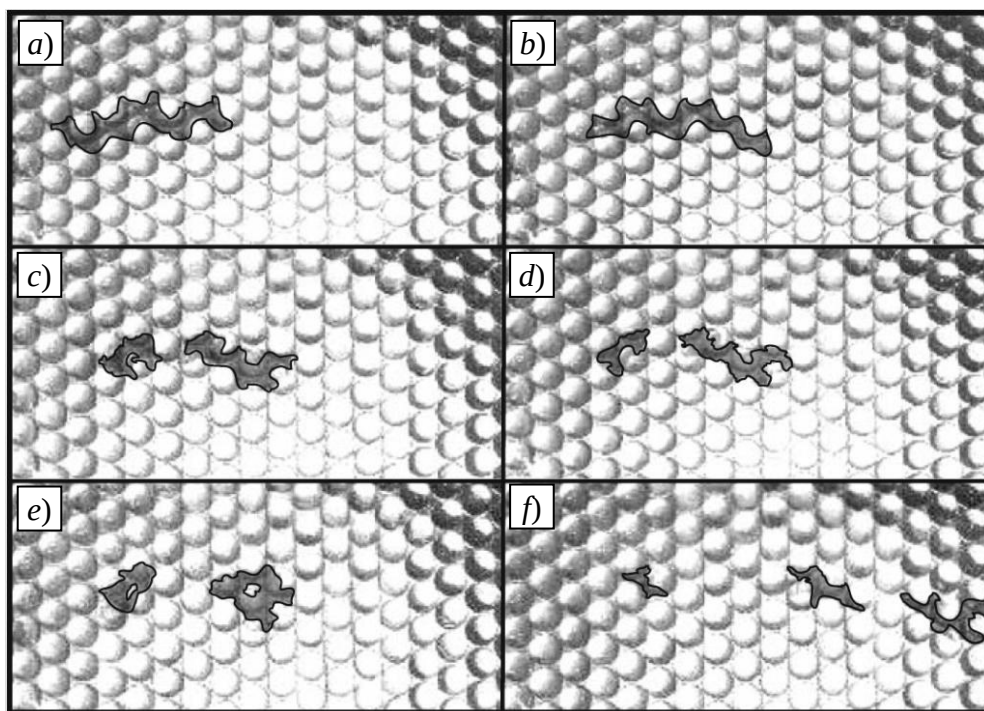


Рис. 4. Эволюция подвижности ганглии ТХЭ (тетрахлорэтилена) в 12 порах в отсутствии и присутствии акустических волн [25]:

a) начальная конфигурация ганглии $P_s = 0$ кПа, $N_c = 0$; b) подвижность в отсутствии акустических волн $P_s = 0$ кПа, $N_c = 0,94 \cdot 10^{-2}$; c) динамический распад в присутствии акустических волн $P_s = 7,35$ кПа, $N_c = 0,7 \cdot 10^{-2}$; d) застой ганглии после воздействия акустическими волнами $P_s = 0$ кПа, $N_c = 1,16 \cdot 10^{-2}$; e) сокращение ганглии после повторного воздействия акустическими волнами $P_s = 11,03$ кПа, $N_c = 0,73 \cdot 10^{-2}$; f) последующее динамическое разрушение и подвижность при тех же значениях $P_s = 11,03$ кПа

Описанный механизм в целом схож с механизмом образования капиллярно-защемленной нефти в процессе ее вытеснения из пористой среды без вибровоздействия. Отличительной особенностью, проявляющейся при вибровоздействии, является наличие дополнительного локального градиента давления, вызванного прохождением волны сжатия и растяжения. Распад ганглии на части происходит при меньшем значении капиллярного числа, чем ее подвижность в отсутствии акустических волн. Образовавшиеся синглеты, также теряют мобильность и остаются неподвижными при капиллярном числе большем, чем до воздействия. Привести их в движение можно только если повысить амплитуду вибровоздействия при заданном значении числа капиллярности.

Были проведены серии экспериментов по вытеснению ганглии из пористой среды при акустическом воздействии на флюид в диапазоне частот 75–225 Гц с постоянной амплитудой акустического давления $P_s = 3,68$ кПа. Во всех экспериментах расход был постоянным, равный 4,96 мл/мин.

На рис. 5 приведены усредненные значения концентрации тетрахлорэтилена на выходе из камеры в отсутствии и в присутствии акустического воздействия. При частоте 75 Гц концентрация тетрахлорэтилена в четыре раза выше чем в отсутствии акустического воздействия. С увеличением частоты это отношение уменьшается. Кружками обозначены усредненные значения концентрации тетрахлорэтилена на выходе из камеры при отсутствии воздействия (незакрашенные кружки) и при акустическом воздействии (закрашенные кружки). Акустическое давление $P_s = 3,68$ кПа, расход 4,96 мл/мин.

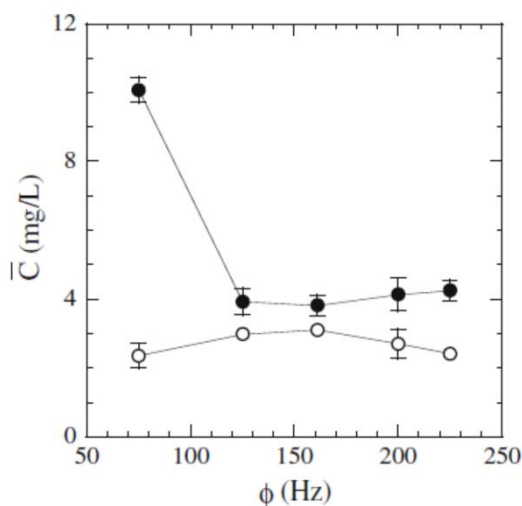


Рис. 5. Эффект от воздействия акустическими волнами на разных частотах [25]

Обсуждение

Уменьшение времени пропитки смачивающей жидкостью капилляра обусловлено изменением свойств самой жидкости. Обычно рассматривают изменение скорости релаксации жидкости [18], под которой понимают отношение поверхно-

стного натяжения к динамической вязкости $\nu_{relax} = \sigma / \mu$. Релаксацией жидкости называют способность поверхностного натяжения принимать наименьшую возможную площадь поверхности, сопротивляясь молекулярной вязкости. Число капиллярности будет равно отношению скорости Дарси к скорости релаксации жидкости. Скорость распространения сейсмических волн в многофазной флюидонасыщенной породе много больше (на 5 порядков) скорости Дарси каждой из фаз. Поэтому прохождение сейсмических волн в пористой среде вызывает изменение свойств флюидов, находящихся в ней. Проходя через толщу горных пород энергия сейсмической волны расходуется на деформацию скелета пористой среды, подвижность флюида и часть энергии идет на изменение энергии поверхностного натяжения флюида, т. е. изменение его смачиваемости [26].

Увеличение концентрации при выходе тетрахлорэтилена из пористой среды в результате акустического воздействия на флюид можно объяснить, анализируя экспериментальные зависимости глубины проникновения вибрации в сыпучую среду от амплитуды и частоты воздействия, приведенные в работе [27]. Филдиным А.Я. были получены теоретические зависимости затухания пульсационной составляющей скорости частиц среды, которые носят экспоненциальный характер и согласуются с результатами экспериментов [27]:

$$A = A_0 e^{-\beta_* x}, \quad \beta_* = \sqrt{\omega / 2\nu_*}$$

где x – расстояние от виброисточника, A_0 – амплитуда вибрации вблизи источника, ω – частота, ν_* – эффективный коэффициент кинематической вязкости.

Для отношения амплитуд $A / A_0 = 0,05$, глубина проникновения вибрации в среду определяется по формуле [27]: $\delta_* \approx 3 / \beta_*$, т. е. обратно пропорционально $\sqrt{\omega}$. Следовательно, чем ниже частота воздействия, тем больше глубина проникновения вибрации в среду, при одинаковой амплитуде A_0 , что наглядно подтверждают результаты экспериментов, приведенные на рис. 6 [25].

Заключение

Влияние вибрации на пористую среду и находящийся в ней флюид заключается в изменении свойств флюида. Время насыщения единичного капилляра зависит от его геометрических размеров и свойств флюида.

Количественным показателем подвижности ганглий в пористой среде служит число капиллярности, зависящее от отношения гидродинамических сил к капиллярным. Выделяют три режима образования капиллярно-защемленной остаточной нефтенасыщенности: в начальной стадии вытеснения, капиллярно-напорный и автомодельный. Каждому из которых соответствует свое число капиллярности. Вибровоздействие разбивает ганглии больших размеров на мелкие капли, которые, при непрерывной вибрации, приобретают подвижность при меньшем числе капиллярности, чем этого требуется в отсутствии воздействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хавкин А.Я. Гидродинамические основы разработки залежей нефти с низкопроницаемыми коллекторами. – Москва: МО МАНПО, 2000. – 525 с.
2. Елизаров Г.Ш. Влияние землетрясений на режим нефтяных месторождений. Грозный: Сев.-Кавк. н.-и. и проект. ин-т нефт. пром-ти. 1977. – 18 с.
3. Малышева В.В. Землетрясения 1950-1955 гг. в районе нефтяного месторождения Гудермес. / В.В. Малышева, М.Н. Смирнова, В.М. Браженик // Сейсмол.бюлл. Кавказа. Тбилиси: Мецниереба. 1979. – с. 50.
4. Осика Д.Г. Гидрогеохимические аномалии, предшествующие тектоническим землетрясениям, - отражение условий формирования их очаговых зон. / Д.Г. Осика, А.Б. Мегаев, Т.С. Янковская, О.А. Саидов // ДАН СССР. 1977. Т. 233. №1. – С. 74–77.
5. Spail H. Water-level changes and earthquakes prediction. // Earthquake Inform. Bull. 1978. V. 10. № 2. – Pp. 55–59.
6. Грин В.П. Некоторые результаты исследований по поискам предвестников землетрясений в Чуйской впадине и ее горном обрамлении. / В.П. Грин, Б. Ильясов, Н.И. Ким и др. // В кн.: Поиски предвестников землетрясений. Ташкент: ФАН. 1976. – С. 145–150.
7. Дыбленко В.П. Волновые методы воздействия на нефтяные пласты с трудноизвлекаемыми запасами. Обзор и классификация. – Москва: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2008. – 80 с.
8. Гадиев С.М. Использование вибрации в добыче нефти. – М. : Недра, 1977. – 159 с.
9. Интенсификация нефтедобычи методом вибросейсмического воздействия заглубленными источниками упругих волн: монография. / Ю.А. Бурьян и др., – Омск: ОмГТУ, 2014. – 212 с.
10. Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В. Влияние сейсмической вибрации на проницаемость пород в связи с проблемой захоронения радиоактивных отходов. // Флюидная проницаемость пород земной коры. – Москва: Научный мир, 2002. – С. 155–161.
11. Денк С.О. Геотехнология межблоково-проницаемых коллекторов нефти и газа. – Пермь: Электронные издательские системы, 2001. Т. 2. – 231 с.
12. Киссин И.Г. Землетрясения и подземные воды. – Москва: Наука, 1982. – 176 с.
13. Смирнова М.Н. Возбужденные землетрясения в связи с разработкой нефтяных месторождений (на примере Старогрозненского землетрясения) // Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. – Москва: Наука, 1977. – С. 128–141.
14. Боярка В.И. Изменение добычи нефти в связи с афтершоками Старогрозненского землетрясения // Геология, поиски и разведка месторождений горючих полезных ископаемых. 1975. № 1. – С. 141–144.
15. Болдина С.В. Гидрогеодинамические эффекты землетрясений в системе «скважина-водоёмещающая порода»: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10 / Болдина Светлана Васильевна. Петропавловск-Камчатский, 2015. 136 с.
16. Rice J.R., Cleary M.P. Some basic stress-diffusion solutions for fluid saturated elastic porous media with compressible constituents // Rev. Geophys. Sp. Phys. 1976. V. 14. – pp. 227–241.
17. Roeloffs E.A. Hydrologic precursors to earthquakes: A review. // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. – pp. 177–209.
18. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. – Москва: Химия, 1982. – 320 с.
19. Крейг Ф.Ф. Разработка нефтяных месторождений при заводнении. – Москва: Недра, 1974. – 192 с.
20. Михайлов Н.Н., Глазова В.И., Высоковская Е.С. Прогноз остаточного нефтенасыщения при проектировании методов воздействия на пласт и призабойную зону. В сб.: Науч.-техн. обзор. Сер. Нефте-промышленное дело. 1983. № 22. – 71 с.
21. Михайлов Н.Н. Структура и подвижность остаточной нефти как критерий обоснования технологий повышения нефтеотдачи пластов. – Недропользование XXI, № 1(32), 2012. – С. 14–19.

22. Мелехин С.В., Михайлов Н.Н. Экспериментальное исследование мобилизации остаточной нефти при заводнении карбонатных коллекторов // Нефтяное хоз-во. 2015. № 8. – С. 72–76.
23. Михалов Н.Н., Ермилов О.М., Гурбатова И.П., Мелехин С.В. Влияние масштабного фактора на мобилизацию остаточной нефти в лабораторном эксперименте. // Доклады Академии наук, Т: 470, № 2, 2016. – С. 189–193. DOI: 10.7868/S0869565216260182.
24. Ахметова З.Р. Структуризация остаточной нефтенасыщенности для обоснования технологии доизвлечения нефти: дис. ...канд. техн. наук: 25.00.17 / Ахметова Зилия Рашитовна. Москва, 2016. – 153 с.
25. Constantinos V.Ch., Eric T.V. Acoustically enhanced ganglia dissolution and mobilization in a monolayer of glass beads. // Transport in Porous Media 64, 2006. –pp. 103–121. DOI: 10.1007/s11242-005-1525-8.
26. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. – Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. – 301 с.
27. Блехман И.И. Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения). – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 865 с.

REFERENCES

1. Havkin, A.Ja. (2000). *Gidrodinamicheskie osnovy razrabotki zalezhej nefti s nizkopronicaemymi kollektorami*. [Hydrodynamic foundations for the development of oil deposits with low-permeability reservoirs]. Moscow: MO MANPO, P. 525. [in Russian].
2. Elizarov, G.Sh. (1977). *Vlijanie zemletrjasenij na rezhim neftjanyh mestorozhdenij*. [The impact of earthquakes on the regime of oil deposits]. Groznyj: Sev.-Kavk. n.-i. i proekt. in-t neft. prom-ti. P. 18. [in Russian].
3. Malysheva, V.V., Smirnova, M.N., Brazhenik, V.M. (1979). *Zemletrjasenija 1950-1955 gg. v rajone neftjanogo mestorozhdenija Gudermes*. [Earthquakes of 1950-1955s in the Gudermes oil field]. Seismological Bulletin of the Caucasus. Tbilisi: Metsniereba. P. 50. [in Russian].
4. Osika, D.G., Megaev, A.B., Jankovskaja, T.S., Saidov, O.A. (1977). *Gidrogeohimicheskie anomalii, predshestvujushhie tektonicheskim zemletrjasenijam, – otrazhenie uslovij formirovanija ih ochagovyh zon*. [Hydrogeochemical anomalies preceding tectonic earthquakes are reflection of conditions for the formation of their focal zones]. DAN USSR. V. 233. No1. PP. 74-77. [in Russian].
5. Spail, H. (1978). Water-levelchanges and earthquakes prediction. Earthquake Inform. Bull. V.10. No 2. PP. 55–59.
6. Grin, V.P., Il'jasov, B., Kim N.I. et al. (1976). *Nekotorye rezul'taty issledovanij po poiskam predvestnikov zemletrjasenij v Chujskoj vpadine i ee gornom obramlenii. V kn.: Poiski predvestnikov zemletrjasenij*. [Some results of research on searches of precursors of earthquakes in the Chui basin and its mountainous frame. In book: Search for a foreshocks.] Tashkent: FAN. PP. 145–150. [in Russian].
7. Dyblenko, V.P. (2008). *Volnovye metody vozdejstvija na neftjanye plasty s trudnoizvlekaemymi zapasami. Obzor i klassifikacija*. [Wave methods of impact on oil reservoirs with hard-to-recover reserves. Overview and classification]. Moscow: OAO «VNIIOJeNG», P. 80. [in Russian].
8. Gadiev, S.M. (1977). *Ispol'zovanie vibracii v dobyche nefti*. [Use of a vibration in oil production]. Moscow: Nedra, P. 159. [in Russian].
9. Bur'jan, Ju.A. et al. (2014). *Intensifikacija neftedobychi metodom vibrosejsmicheskogo vozdejstvija zaglublennymi istochnikami uprugih voln*. [Intensification of oil production to the method of vibroseismic action to buried sources of elastic waves]. Omsk: OmGTU. p. 212. [in Russian].

10. Shmonov, V.M., Vitovtova, V.M., Zharikov, A.V. (2002). *Vlijanie sejsmicheskoy vibracii na pronicaemost' porod v svyazi s problemoj zahoronenija radioaktivnyh othodov. Fljuidnaja pronicaemost' porod zemnoj kory*. [Effect of seismic vibration on the permeability of rocks in connection with the problem of disposal of radioactive waste. Fluid permeability of rocks of the earth's crust.]. Moscow: Nauchnyj mir. PP. 155–161. [in Russian].
11. Denk, S.O. (2001). *Geotekhnologija mezhhblokovo-pronicaemykh kollektorov nefiti i gaza*. [Geotechnology of interblock-permeable oil and gas reservoirs]. Perm: Electronic publishing systems. V. 2. p. 231. [in Russian].
12. Kissin, I.G. (1982). *Zemletrjasenija i podzemnye vody*. [Earthquakes and groundwater]. Moscow: Nauka. p. 176. [in Russian].
13. Smirnova, M.N. (1977). *Vozbuzhdennye zemletrjasenija v svyazi s razrabotkoj nefitynykh mestorozhdenij (na primere Starogroznenskogo zemletrjasenija). Vlijanie inzhenernoj dejatel'nosti na sejsmicheskij rezhim*. [Excited earthquakes in connection with the development of oil fields (the example of the Starogroznensky earthquake). The influence of engineering activity on the seismic regime]. Moscow: Nauka. PP. 128–141. [in Russian].
14. Bojarka, V.I. (1975). *Izmenenie dobychi nefiti v svyazi s aftershokami Starogroznenskogo zemletrjasenija. Geologija, poiski i razvedka mestorozhdenij gorjuchih poleznykh iskopaemykh*. [Change in oil production due to aftershocks of the Starogroznensky earthquake. Geology, prospecting and exploration of deposits of combustible minerals]. No 1. PP. 141–144. [in Russian].
15. Boldina, S.V. (2015). *Gidrogeodinamicheskie jeffekty zemletrjasenij v sisteme «skvazhina-vodovmeshhajushhaja poroda»*. [Hydrogeodynamic effects of earthquakes in the «borehole-water-bearing rock» system]. *Candidate's thesis*. Petropavlovsk-Kamchatsky. p. 136. [in Russian].
16. Rice, J.R., Cleary, M.P. (1976). Some basic stressdiffusion solutions for fluid saturated elastic porous media with compressible constituents. *Rev. Geophys. Sp. Phys.* V. 14. pp. 227–241.
17. Roeloffs, E.A. (1988). Hydrologic precursors to earthquakes: A review. *Pure Appl. Geophys.* V. 126. pp. 177–209.
18. Hejfec, L.I., Nejmark, A.V. (1982). *Mnogofaznye processy v poristyh sredah*. [Multi-phase processes in porous media]. Moscow: Chemistry. p. 320. [in Russian].
19. Krejg, F.F. (1974). *Razrabotka nefitynykh mestorozhdenij pri zavodnenii*. [Development of oil fields in water flooding]. Moscow: Nedra. p. 192. [in Russian].
20. Mihajlov, N.N., Glazova, V.I., Vysokovskaja, E.S. (1983). *Prognoz ostatochnogo neftenasyshhenija pri proektirovanii metodov vozdejstvija na plast i prizabojnuju zonu. V sbornike: Nauchno-tehnicheskij obzor. Serija Nefte-promyslovoe delo*. [Forecast of residual oil saturation while designing methods of impact on the formation and bottomhole zone. In the collection: Scientific and technical review. Series Oil-field business]. No 22. p. 71. [in Russian].
21. Mihajlov, N.N. (2012). *Struktura i podvizhnost' ostatochnoj nefiti kak kriterij obosnovanija tehnologij povyshenija nefteotdachi plastov*. [Structure and mobility of residual oil as a criterion for the justification of enhanced oil recovery technologies]. *Nedropol'zovanie XXI*, No 1(32). PP. 14–19. [in Russian].
22. Melehin, S.V., Mihajlov, N.N. (2015). *Jeksperimental'noe issledovanie mobilizacii ostatochnoj nefiti pri zavodnenii karbonatnykh kollektorov. Nefityanoe hozjajstvo*. [Experimental study of the mobilization of residual oil in flooded carbonate reservoirs. Oil industry]. No 8. PP. 72–76. [in Russian].
23. Mihalov, N.N., Ermilov, O.M., Gurbatova, I.P., Melehin, S.V. (2016). *Vlijanie masshtabnogo faktora na mobilizaciju ostatochnoj nefiti v laboratornom jeksperimente*. [Effect of the scale factor on the mobilization of residual oil in a laboratory experiment]. *Reports of the Academy of Sciences*, V. 470. No 2. PP. 189–193. DOI: 10.7868/S0869565216260182.
24. Ahmetova, Z.R. (2016). *Strukturizacija ostatochnoj neftenasyshhennosti dlja obosnovanija tehnologij doizvlechenija nefiti*. [Structuring the residual oil saturation to justify the oil recovery technology]. *Candidate's thesis*. Moscow. p. 153. [in Russian].

25. Constantinos, V.Ch., Eric, T.V. (2006). Acoustically enhanced ganglia dissolution and mobilization in a monolayer of glass beads. *Transport in Porous Media*. V. 64. pp. 103–121. DOI: 10.1007/s11242-005-1525-8.
26. Puzyrev, N.N. (1997). *Metody i ob'ekty sejsmicheskikh issledovanij. Vvedenie v obshhuyu seismologiju*. [Methods and objects of seismic research. Introduction to general seismology]. Novosibirsk: Publ. SB RAS, NIC OIGGM, P. 301. [in Russian].
27. Blehman, I.I. (2017). *Vibracionnaja mehanika i vibracionnaja reologija (teorija i prilozhenija)*. [Vibration mechanics and vibrational rheology (theory and applications)]. Moscow: FIZMATLIT. p. 865. [in Russian].

© Д. С. Евстигнеев, А. В. Савченко, 2018

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ НОРМИРОВАНИЯ БУРОВЫХ РАБОТ ПРИ ПНЕВМОУДАРНОЙ ПРОХОДКЕ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РОССИИ

Владимир Николаевич Карпов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 153, e-mail: karpov@misd.ru

Владимир Владимирович Тимонин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, зам. директора по научной работе, тел. (383)205-30-30, доп. 199, e-mail: timonin@misd.ru

Антон Игоревич Конурин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 316, e-mail: akonurin@yandex.ru

Андрей Константинович Ткачук

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 153, e-mail: tkachuk.184@yandex.ru

Приведен анализ проблем нормирования буровых работ при пневмоударном бурении взрывных скважин на отечественных горных предприятиях. Рассмотрены ключевые недостатки отечественной системы нормирования буровых работ с позиции несовершенства действующей нормативной базы, основанной на классификации горных пород по буримости. Предложены варианты определения местных норм выработки и времени для буровых бригад. Представлена схема спада производительности буровых работ при проходке каждой последующей скважины в малоабразивных, но прочных горных породах. На конкретных примерах обозначены проблемы, связанные с недостаточной продолжительностью мероприятий по нормированию буровых работ на горных предприятиях. Рассмотрены экономические аспекты спада производительности буровых работ на горных предприятиях. Приведен расчет себестоимости прямых затрат при бурении нескольких глубоких взрывных скважин одним пневмоударником и одним долотом. Рассмотрено изменение удельных затрат при проходке глубокой взрывной скважины за один и три рейса. Установлена необходимость учета и оценки технико-экономической целесообразности использования машин и инструмента при техническом нормировании на горных предприятиях после проходки как первой, так и последующих скважин с учетом потребления энергоносителей.

Ключевые слова: бурение, нормирование, документы, взрывные скважины, пневмоударник, долото, износ, себестоимость.

ANALYSIS OF THE STANDARDIZATION PROBLEMS OF DRILLING IN CASE OF PNEUMATIC BORING OF BLASTBOREHOLES AT RUSSIAN MINING ENTERPRISES

Vladimir N. Karpov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 153, e-mail: karpov@misd.ru

Vladimir V. Timonin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Deputy Director for Science, phone: (383)205-30-30, extension 199, e-mail: timonin@misd.ru

Anton I. Konurin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 316, e-mail: akonurin@yandex.ru

Andrey K. Tkachuk

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 153, e-mail: tkachuk.184@yandex.ru

The paper shows an analysis of the problems concerning standardization of drilling operations in case of pneumatic drilling of blast boreholes at national mining enterprises. The key drawbacks of the national standardization system of drilling are considered from the position of the current imperfect regulatory system based on the classification of rocks by drillability. Variants of definition of local norms of development and time for drilling crews are offered. A scheme of the decline in the productivity of drilling operations is presented for the penetration of each subsequent well in low-abrasive, but stable rocks. Specific examples indicate the problems associated with the insufficient duration of measures used to normalize drilling operations at mining enterprises. Economic aspects of the decline in productivity of drilling operations at mining enterprises are considered. The calculation of the direct costs when drilling several deep blast holes with one hammer and one chisel is given. The change in unit costs for drilling a deep blast hole for one and three rounds is considered. The need to take into account and assess the feasibility of using machines and tools in technical regulation at mining enterprises after drilling both the first and subsequent wells, taking into account the consumption of energy carriers, is established.

Key words: drilling, standardization, documents, blast boreholes, DTH-hammer, chisel, wear, productioncost.

Введение

На современном этапе развития техники большое внимание уделяется диагностике, оценке технического состояния и повышению надежной работы машин и агрегатов. При бурении скважин наиболее сложным объектом для диагностирования и повышения надежности является глубинное оборудование – в частности буровое долото [1–3]. Выбор оптимальных режимных параметров бурения позволяет увеличить надежность работы долота и энергоэффективность бурения в целом за счет уменьшения энергоемкости разрушения породы [4–5].

Нормирование буровых работ на горно-добывающих предприятиях является весьма трудоемким процессом, однако его автоматизация позволяет систематизировать электронную базу данных нормативов времени и, соответственно, повысить качество и оперативность процесса нормирования [6–7]. В основу системы нормирования буровых работ при пневмоударной проходке взрывных скважин на отечественных горных предприятиях заложена буримость горных пород, основанная на одноименной классификации.

Методы и материалы, результаты

Буримость измеряют затратой времени t (мин) на «чистое» бурение единицы длины (1 п. м.) скважины конкретной моделью погружного пневмоударника и долота не имеющих предварительной наработки при установленном режиме бурения. В табл. 1 представлен фрагментиз действующего российского документа [8],предназначенный для нормирования буровых работ в рудниках.

Таблица 1

Основное (чистое) время бурения скважины пневмоударником
при давлении сжатого воздуха 0,5 МПа

Категория пород по буримости	Предел времени	Тип пневмоударника														
		1			2			3			4			5		
		М-48			П-1-75			М-1900, МП-3			М-125			М-32К		
		Диаметр долота, мм														
		100–110						125						155		
		Угол наклона скважины к горизонтали, град														
		от 0 до ±60	от +60 до +90	от –60 до –90	от 0 до ±60	от +60 до +90	от –60 до –90	от 0 до ±60	от +60 до +90	от –60 до –90	от 0 до ±60	от +60 до +90	от –60 до –90	от 0 до ±60	от +60 до +90	от –60 до –90
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Х	От До Расчет- ное	5,56	6,71	7,31	6,11	7,31	7,91	5,51	9,01	9,71	7,96	9,55	10,34	8,6	10,32	11,18
		6,80	8,1	8,9	7,3	8,9	9,5	9,1	11	11,9	9,65	11,58	12,54	10,44	12,53	13,57
		6,20	7,4	8,1	6,7	8,1	8,7	8,3	10	10,8	8,8	10,7	11,4	9,52	11,4	12,4

По сути буримость является механической скоростью бурения 1 п. м. скважины (шпура) определенной категории горных пород. При этом, каждая категория вмещает в себя обширный список геологических наименований руд и пород. В табл. 2 приведен пример горных пород Х категории согласно Единой классификации горных пород по буримости [9].

Таблица 2

Горные породы Х категории

Категория горных пород	Горные породы
Х	Апатитовая сахаровидная руда. Брекчии рудные. Граниты сильно выветрелые. Гипсо-ангидрид. Дуниты сильно выветрелые. Руды бурожелезняковые облитовые. Змеевики сильно выветрелые. Известняки мергелистые средней крепости. Конгломераты с глинистым цементом. Сланцы глинистые, кристаллические, слюдяные, серицитовые и талькохлоритовые, углистые и горючие. Сульфидные брекчевидные и сульфидно-медно-никелевые руды. Фосфориты слабо сцементированные желваковые. Церусситовые руды. Перидотиты сильно выветрелые. Песчаники с глинистым цементом

Важно отметить, что вещественное содержание горных пород, отраженное в названиях (табл. 2), характеризует скорее качественное, а не количественное представление о физико-механических свойствах. Например, гранит карьера Борок г. Новосибирск, имеющий прочность 125 МПа и «шведский» гранит испытательного полигона AtlasCorso имеющий прочность 220 МПа будут иметь разную буримость при использовании одной модели пневмоударника и соответственно не могут располагаться в одной категории горных пород по буримости [10, 11].

Отсутствие количественных показателей физико-механических свойств горных пород является одним из главных недостатков классификации горных пород по буримости и, соответственно, отечественной системы нормирования буровых работ в целом. Данное утверждение не ново, так в работе [12] на основании проведенных исследований установлено, что использование «длительности основного времени на бурение скважины» нецелесообразно применять в виде классификации горных пород, оставляя вариант практической реализации буримости лишь для нормирования буровых бригад. Ранее освещались как коренная проблема использования предложенной классификации, так и пути ее решения, которые заключаются в использовании смешанных классификаций горных пород, основанных на физико-механических свойствах горных пород и их буримости [13]. В России разработка и применение смешанных классификаций тесно связана с добычной проходкой глубоких нефтяных и газовых скважин вращательным способом бурения, где показатели физико-механических свойств горных пород используются для выбора типа породоразрушающего инструмента и режимов бурения, а показатели буримости для нормирования труда буровых бригад [14].

В документах [8, 9, 15, 16], отображена существующая система нормирования буровых работ для пневмоударной проходки взрывных скважин на отечественных горных предприятиях. Важно отметить, что единственный документ где полностью отображались вопросы определения норм выработки и времени при пневмоударной проходке скважин на открытых горных работах буровым станком «Урал-64», прекратил свое действие [9]. В действующем документе для нормирования буровых работ на карьерах отображены лишь алгоритмы проведения нормировочных работ при проходке скважин на станках шнекового и шарошечного бурения [15], однако это не означает что документ абсолютно не пригоден для пневмоударного бурения. Порядок проведения технического нормирования и требования к нему, а также расчетные формулы для определения сменных норм выработки и времени затрачиваемых на проходку взрывных скважин могут использоваться и при других способах бурения.

Анализ действующей нормативной базы в области нормирования буровых работ для пневмоударного бурения взрывных скважин и анализ ее практического использования на карьерах и в рудниках обозначил пассивный характер ее применения и отсутствие в ней адаптивных механизмов повышения производительности буровых работ. Таблицы с буримостью горных пород по их категориям (рис. 1), составляющие основной объем нормативных документов,

не используются ввиду ранее приведенных причин, а так же несоответствия их содержания применяемой технике (например, погружных пневмоударников). Так, из шести моделей пневмоударников, пять из которых разработаны в ИГД СО РАН (исключение П1-75, разработка Криворожского НИГРИ), три модели серийно практически не выпускаются. Из действующих моделей машин в серийном выпуске находятся М-32К и М-48, получившие на отечественных предприятиях новые обозначения и технические характеристики, уступающие ранним серийным образцам машин по энергетическим и ресурсным параметрам [17].

В современных условиях рыночной экономики отечественный рынок бурового оборудования насыщен десятками моделей погружных машин и инструмента, как отечественного, так и зарубежного производства. Месторождения полезных ископаемых России имеют уникальные составы физико-механических свойств вмещающих руд и пород. Поэтому разработка, модернизация и использование таблиц буримости по категориям горных пород определенными образцами буровых машин и инструмента для общего пользования лишено практического смысла. Это объясняется тем, что на механическую скорость бурения, при пневмоударной проходке скважин, влияет совокупность природных, технических и технологических факторов, имеющих свою конкретную оригинальную специфику для каждого из месторождений полезных ископаемых [18]. Так, высокую производительность буровых машин и инструмента в условиях одного бурового участка месторождения далеко не всегда удастся перенести на близлежащий [10], не говоря уже о переносе передового опыта эксплуатации средств бурения на другие месторождения. Поэтому на карьерах и в рудниках повсеместно проводится техническое нормирование буровых работ, возможность использования которого прописана в действующей нормативной базе. Так, при внедрении на предприятиях более совершенной организации производства труда, технологии работы, оборудования, машин, повышающих производительность буровых бригад (выше чем это предусмотрено в единых нормах) путем технического нормирования предлагается вводить местные нормы [8]. При этом в документе отсутствуют какие-либо технико-технологические рекомендации по выбору рациональных режимов бурения, определению параметров, влияющих на качество очистки ствола скважины, периодичности заточки породоразрушающего инструмента, приработке погружных машин и др.

Выбор и учет технико-технологических параметров при проведении мероприятий по техническому нормированию буровых работ практически не производится, а время мероприятий не превышает 2-х рабочих смен для рудников и 3-х пробуренных скважин в течение рабочей смены для карьеров. Однако известно, что увеличение количества измерений ведет к повышению точности результатов, это в полной мере относится и к нормированию буровых работ. Для рудников при проходке глубоких взрывных скважин глубиной 50–60 метров мероприятия по нормированию целесообразно проводить до полного выполнения технологической задачи – пробуренной скважины, с учетом полного количества рейсов, пройденных в течение оперативного времени всех рабочих смен. В случае проходки скважины за один рейс должна проводиться оценка состоя-

ния породоразрушающего инструмента на предмет его абразивного износа и экономической целесообразности его повторного использования, к примеру, после заточки. Экономия горно-добывающих предприятий на заточке породоразрушающих вставок буровых долот, а также на самих долотах (бурение до полного износа твердого сплава), напротив, приводит к повышению затрат, так как прохождение последующих рейсов глубоких взрывных скважин с не заточенным инструментом ведет к заметному спаду производительности буровых работ и, соответственно, повышению затрат на их выполнение [19–21]. В связи с этим, выполнение местной нормы выработки и времени, полученного по результатам технического нормирования первой скважины при бурении второй скважины с тем же пневмоударником и буровым долотом, имеющим износ инденторов порядка 30 %, в условиях однородного породного массива не представляется возможным. В этом случае определение местных норм выработки и времени для буровых бригад будет иметь следующие варианты: снижение сменной производительности буровых работ по результатам бурения двух скважин и бурение пневмоударником без замены и заточки инструмента двух скважин; применение прежней сменной нормы с использованием на каждую скважину одного долота; закупка заточного оборудования и использование одного долота на две скважины при минимальной потере производительности.

Нормирование буровых работ в рудниках не осуществляется с учетом полных затрат оперативного бурения на проходку всей скважины, в связи с чем результаты местного нормирования часто необъективны и нередко ведут к завышению норм выработки. Это происходит по следующим причинам: изменение средних показателей сетевого давления сжатого воздуха в тех сменах где нормирование не производилось; смена горно-геологических и горнотехнических условий; отсутствие учета времени вспомогательных операций (спускоподъемные операции при разборе буровой колонны после окончания проходки скважины, проходка скважины за несколько рейсов); спад производительности буровых работ (буримости), при их проведении на глубинах свыше 50 % от технологической длины.

В технической литературе нередко встречается утверждение, что при пневмоударной проходке взрывных скважин механическая скорость бурения практически не зависит от глубины буримой скважины. Данное утверждение в большей степени следует относить к карьерам, где при незначительной глубине буримых скважин (до 20 м) и увеличенных по длине, размерах буровых штанг (6–8 м), утечки в межштанговых соединениях минимальны. Исследования, проводимые в рудниках как на заре внедрения пневмоударного бурения в РФ [22], так и в настоящее время имеет немало обратных примеров. Так, практика экспедиционной работы ИГД СО РАН в Таштагольском руднике АО Евразруда в 2016 г. обозначила, что при проходке первой скважины на буровом станке БП100 новым пневмоударником П-160-5,5Ш (МХ) и долотом КНШ-160ШS по малоабразивному породному массиву прочностью 140 МПа в интервале глубин 30–56 м спад механической скорости бурения может достигать более 50 % при номинальном давлении воздуха 0,48 МПа [10]. Учитывая

то, что долото без заточки породоразрушающих элементов использовалось на буровом участке для проходки трех скважин, а погружной пневмоударник при бурении третьей скважины терял мощностные характеристики ввиду износа ответственных деталей системы воздухораспределения, его дальнейшая эксплуатация продолжалась максимум в течение первой смены для забурки ствола скважины, т. е. первые 1–2 метра. В период проведения экспедиционных работ норма выработки на предприятии составляла 7 п. м., что объясняется рассмотренными выше факторами.

На рис. 1 представлена схема спада производительности буровых работ при проходке каждой последующей скважины в малоабразивных, но прочных горных породах в случаях близких с приведенным примером.

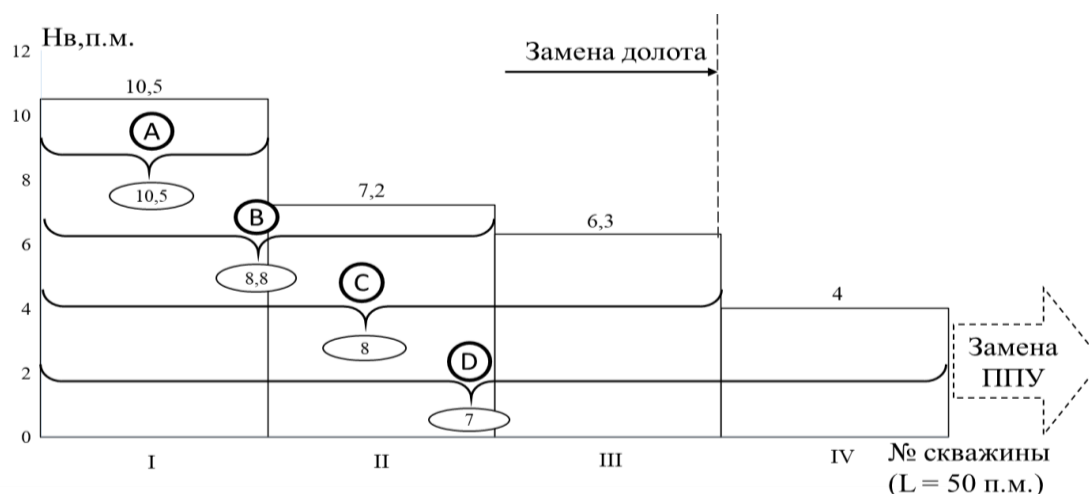


Рис. 1. Местные нормы выработки для проходки глубокой взрывной скважины диаметром 160 мм, на буровом участке месторождения «N» по результатам бурения:

A – первой скважины; B – двух скважин; C – трех скважин; D – четырех скважин

Из приведенного следует, что при техническом нормировании на горных предприятиях важно учитывать и оценивать технико-экономическую целесообразность использования машин и инструмента после проходки как первой, так и последующих скважин с учетом потребления энергоносителей. В табл. 3 приведены исходные данные для расчета себестоимости прямых затрат на проходку глубокой взрывной скважины диаметром 160 мм на станке БП100. В примечаниях (табл. 3) указаны источники исходных расчетных данных: ДП – данные предприятия; ДИ – фактические данные результатов исследований; ТХЗИ – технические характеристики завода изготовителя. Затраты на инструмент из расчета один пневмоударник и долото на три скважины в ценах 2016 г., показатели по амортизации станка БП100, воздуху взяты за более ранний период. Значительный расход воздуха при чистом бурении $26,9 \text{ м}^3$, обусловлен высокими расходными характеристиками пневмоударника – $14,9 \text{ м}^3/\text{мин}$ при 0,5МПа, что

с расходом энергоносителей бурового станка на вращение и подачу става в $12 \text{ м}^3/\text{мин}$, определяет общий расход на чистое бурение.

Таблица 3

Исходные данные для расчета себестоимости прямых затрат на проходку буримой скважины диаметром 160 мм на станке БП100

№	Показатели	Стоимость расходов, руб./п.м.	Примечание
1	БП-100 (амортизация)	57	ДП
2	Пневмоударник П-160-5,5 Ш	255,4	ДИ
3	Коронки КНШ-160	123,3	ДИ
4	Штанга БП	33,5	ДП
5	Масло	3,2	ДП
Итого		472,4	–
Стоимость расхода энергоносителей с учетом технических характеристик станка БП100 и пневмоударника П-160-5,5 Ш			
6	Воздух, руб./1000 м^3	600	ДП
7	Техническая вода, руб./т	16,3	ДП
8	Затраты на воздух при бурении скважин с расходом – $26,9 \text{ м}^3/\text{мин}$, руб./ч	968,4	ТХЗИ
9	Затраты на воздух при спускоподъемных операциях (без работы ППУ) с расходом – $12 \text{ м}^3/\text{мин}$, руб./ч	504	ТХЗИ
10	Затраты на техническую воду при расходе 20 л/мин, руб./ч	19,5	
11	Дизельное топливо	–	–
12	Электричество	–	–
Дополнительно			
13	Зарплата бурильщика, руб./ч	620	ДП

В табл. 4 приведены результаты расчета технико-экономических показателей проходки одной взрывной скважины глубиной 56 п. м. в руднике Таштагол в 2016 г. Этот пример характеризует вторичную эксплуатацию пневмоударника и бурового долота (без заточки), т. е. проходка второй скважины.

Таблица 4

Результаты расчета технико-экономических показателей прохождения скважины пневмоударником П-160-5,5 Ш на станке БП100

L	V_m	V_p	t_1	t_2	t_3	$C_{в1}$	$C_{в2}$	C_v	$C_{ж}$	$C_э$	$C_{зп}$	$C_б$	C
1	107	36	0,23	0,12	0,35	99,3	116,2	215,5	6,8	222,3	217	472,4	911,7
5	57	52	0,02	0,22	0,24	8,6	213	221,6	4,6	226,2	148,8		847,4
10	50	47	0,015	0,25	0,26	6,4	242,1	248,5	5,1	253,6	164,3		890,3
15	47	37	0,07	0,26	0,33	30,2	251,7	282	6,4	288,4	204,6		965,4

L	V_M	V_p	t_1	t_2	t_3	C_{B1}	C_{B2}	C_B	$C_{Ж}$	$C_э$	$C_{3п}$		C
20	42	36	0,048	0,29	0,33	20,7	280,8	301,5	6,5	308	209,5		989,9
25	38	34	0,038	0,32	0,35	16,4	309,8	326,3	6,9	333,2	221,9		1027,5
30	27	9,6	0,83	0,46	1,29	358,5	445,4	804	25,1	829,1	799,8		2101,3
35	35	32	0,03	0,35	0,38	12,9	338,9	351,9	7,4	359,3	235,6	472,4	1067,3
40	31	27	0,058	0,4	0,45	25	387,3	412,4	8,9	421,3	283,9		1177,6
45	29	24	0,088	0,43	0,51	38	416,4	454,4	10,1	464,5	321,1		1258
50	25	20	0,125	0,5	0,62	54	484,2	538,2	12,1	550,3	387,5		1410,2
56	23	5	1,95	0,54	2,49	842,4	522,9	1365,3	48,5	1413,8	1543,8		3430
Средние показатели основных затрат на бурение								460,1	12,3	472,4	394,8	472,4	1339,7

Примечания: L – контрольный участок пути, м; V_M – механическая скорость бурения, мм/мин; V_p – рейсовая скорость бурения, мм/мин; t_1 – время вспомогательных операций, ч; t_2 – время чистого бурения, ч; t_3 – оперативное время бурения контрольного участка ($t_1 + t_2$). Данные расчета себестоимости затрат на контрольных участках буримой скважины, руб./п.м.: C_{B1} – затраты на воздух без работы ППУ; C_{B2} – затраты на воздух при чистом бурении; C_B – общие затраты на воздух ($C_{B1} + C_{B2}$); $C_{Ж}$ – затраты на техническую воду; $C_э$ – общие затраты на энергоносители ($C_B + C_{Ж}$); $C_{3п}$ – затраты на заработную плату бурильщика; $C_б$ – затраты на буровое оборудование и смазочные материалы; C – себестоимость прямых затрат на проходку скважины $L = 56$ п. м.

Обсуждение

На рис. 2 приведена технико-экономическая диаграмма проходки скважины глубиной 56 п. м. рассмотренным комплектом бурового оборудования (табл. 3, 4). Резкий спад механической скорости бурения на участке А вызван спадом номинального давления сжатого воздуха на 0,1 МПа (до 0,48 МПа), что привело к аварийной ситуации (зашламовывание скважины) вызвавшей рост вспомогательных операций и перерасход энергоносителей при проведении спасательных работ. Нестабильность сетевого давления в течение рабочих смен – характерная проблема для многих рудников [10, 17]. Рост себестоимости затрат на бурение на последнем участке (56 п. м.) вызван операциями по разбору буровой колонны.

На рис. 3 представлены средние показатели основных затрат на бурение для трехвзрывных скважин, пробуренных одним пневмоударником П-160-5,5Ш (МХ) и одним долотом.

Из рис. 4 видно, что удельные показатели затрат на энергоносители – $C_э$, при проходке второй скважины сравнивались с затратами на буровое оборудование и смазочные материалы – $C_б$. При проходке третьей скважины ввиду износа инденторов долота, утечек в межштанговых соединениях и износа ответственных деталей системы воздухораспределения погружной машины происходит катастрофический спад производительности буровых работ и перерасход энергоносителей, где наибольшие затраты приходятся на сжатый воздух.

Рассмотрим пример экономических потерь при бурении глубоких взрывных скважин в прочных и абразивных породах при проходке скважины за несколько рейсов, вызвавший спад производительности на 27,5 %. На рис. 3 обозначены изменения средней себестоимости прямых затрат на проходку одной взрывной скважины за один и три рейса (в ценах 2015 г.), т. е. до спада производительности буровых работ и после. Пример основан на результатах проведенных исследований, полученных в ходе экспедиционных работ ИГД СО РАН на одном из отечественных рудников [10, 23]. На каждые 20 тыс. п. м. при проходке глубоких взрывных скважин за три рейса вместо одного, предприятие «S» несет экономические потери в размере 5 млн 100 тыс. руб.

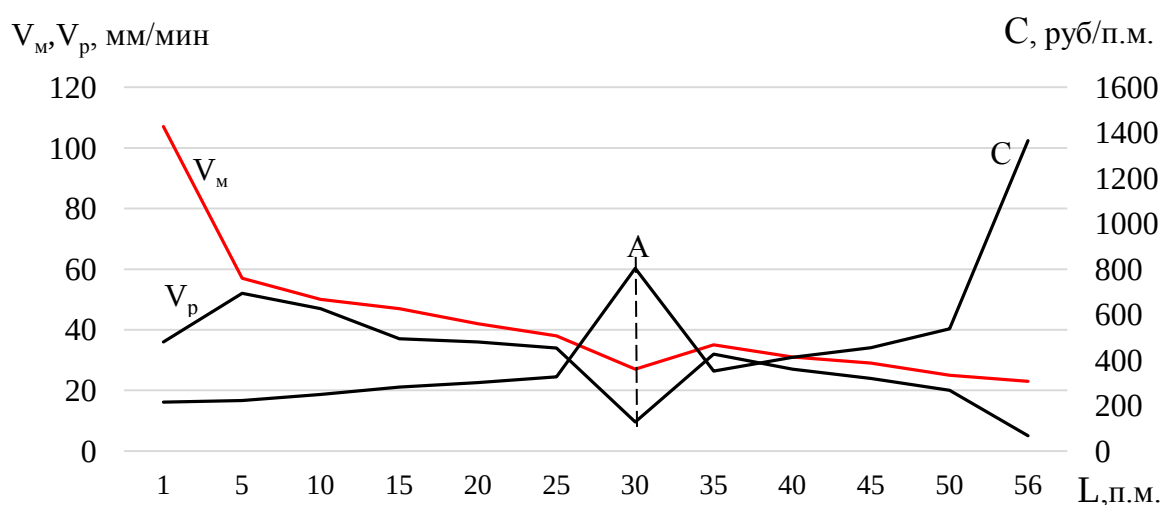


Рис. 2. Техничко-экономическая диаграмма проходки взрывной скважины

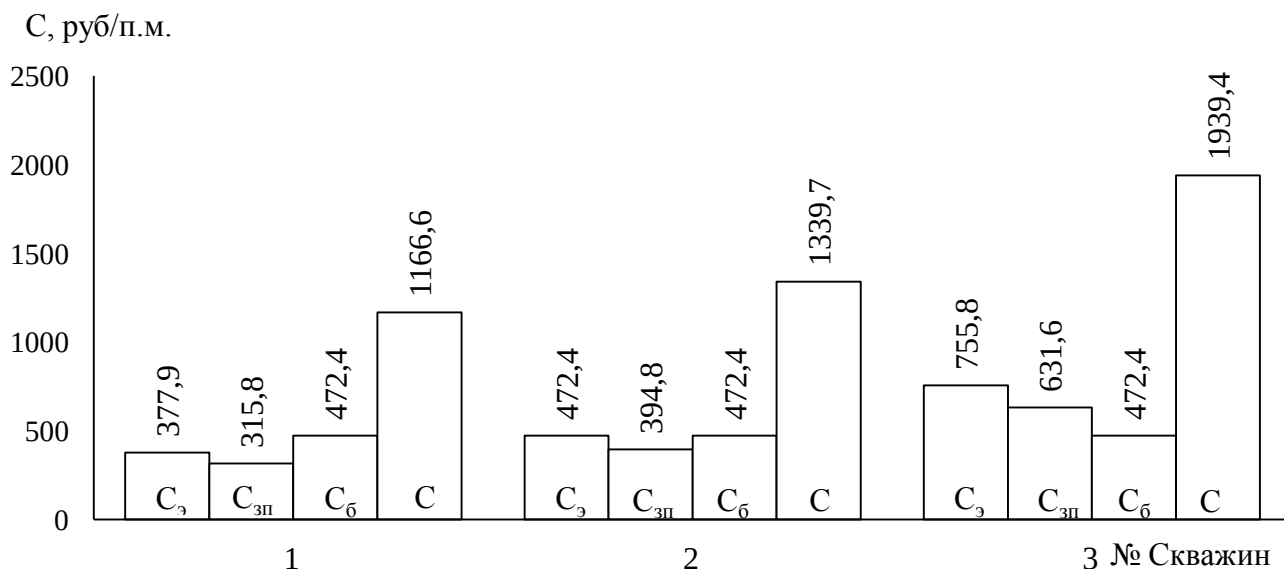


Рис. 3. Себестоимость прямых затрат на бурение глубоких взрывных скважин

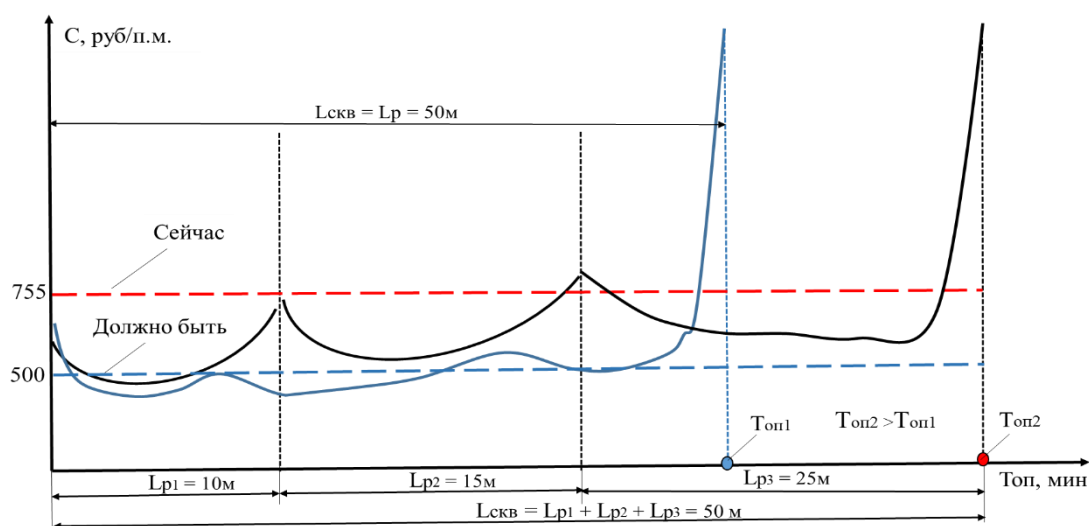


Рис. 4. Удельные затраты на проходку 1 п. м. глубокой взрывной скважины Ø 105 мм глубиной 50 п. м. за один и три рейса в течение оперативного времени бурения скважины $T_{оп}$:

$T_{оп}$ — конкретный лимит времени в течении рабочих смен предназначенный для операций непосредственно связанных с проведением буровых работ на карьерах и в рудниках, установленный в ранее приведенной нормативной базе РФ

Этот пример, как и ранее приведенный характеризует остроту происходящего на горных предприятиях России, где за последнее десятилетие увеличение затрат на бурение возросло 2,5 раза. Это вызвано как организационно-техническими, так и технико-технологическими проблемами нормирования буровых работ на горных предприятиях. Последние будут рассмотрены в следующей работе авторов.

Заключение

Рассмотренный комплекс проблем в области нормирования буровых работ при пневмоударном бурении взрывных скважин обозначил острую необходимость в разработке нового единого документа по нормированию буровых работ на карьерах и в рудниках. Коренная основа такого документа должна иметь активный и гибкий методический аппарат, основанный на количественных данных современных способов и средств измерений по определению физико-механических свойств руд и пород, а также техники и технологии пневмоударного бурения применительно к конкретным месторождениям полезных ископаемых [23]. Что позволит обеспечить прозрачность буровых работ и их объективную технико-экономическую оценку с позиции минимальной энергоёмкости разрушения горных пород при максимальной стойкости породоразрушающего инструмента при прохождении рейсов буримых скважин, что позволит перейти к рациональному нормированию буровых работ на горных предприятиях России.

Таким образом, из-за разницы в физико-механических свойствах горные породы одного вещественного состава практически всегда имеют разную буримость при использовании одной модели пневмоударника. В связи с этим, для нормирования буровых работ при пневмоударном бурении взрывных скважин необходимо:

1) мероприятия по нормированию проводить до полного выполнения технологической задачи – пробуренной скважины, с учетом полного количества рейсов, пройденных в течение оперативного времени всех рабочих смен;

2) в случае проходки скважины за один рейс должна проводиться оценка состояния породоразрушающего инструмента на предмет его абразивного износа и экономической целесообразности его повторного использования, например, после заточки;

3) выбор оптимальных режимных параметров бурового оборудования производить с учетом физико-механических свойств подсекаемых при бурении породных толщ, а выбор количества рейсов для проходки скважины – с учетом удельных затрат на энергоносители, буровое оборудование и смазочные материалы.

При проходке нескольких глубоких скважин одним инструментом в себестоимости бурения доля удельных затрат на энергоносители по сравнению с затратами на буровое оборудование и смазочные материалы существенно возрастает. При бурении последней скважины ввиду износа инденторов долота, утечек в межштанговых соединениях и износа ответственных деталей системы воздухораспределения погружной машины происходит катастрофический спад производительности буровых работ и наибольшие затраты приходятся на сжатый воздух. В связи с этим, при техническом нормировании на горных предприятиях после проходки как первой, так и последующих скважин необходимо производить учет и оценку технико-экономической целесообразности использования машин и инструмента с учетом потребления энергоносителей.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090003-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казаченко Г. В., Басалай Г. А., Нагорский А. В., Шульдова С. Г., Ярмолинский В. К. Исследование процесса шнекового бурения часть 2. Производительность и методика расчета ее характеристик // Горная механика и машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 53–60.
2. Панченко А. Е., Стрелковская А. В., Данилов А. К. Повышение надежности бурового долота // Международное научное издание Современные фундаментальные и прикладные исследования. 2017. – № 3 – (26). – С. 12–16.
3. Новосельцева М. В. Гидроимпульсный механизм бурильных машин для алмазного бурения горных пород // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 6. – С. 72–76.
4. Бугаев В. Г., Ереско С. П., Бугаев И. В. Влияние режимных параметров на показатели эффективности процесса бурения скважин в мерзлых грунтах // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 9. – С. 16–21.

5. Герике П. Б. Актуальные проблемы диагностирования и оценки остаточного ресурса горно-шахтного оборудования // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 5 (123). – С. 111–119.
6. Иванов Б. В. Нормирование и анализ эффективности выполнения буровых работ с применением современных автоматизированных систем измерения // Бурение и нефть. – 2017. – № 4. – С. 56–59.
7. Кашапов Р. З. Организация системы нормирования на буровом предприятии с использованием информационных технологий // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2018. – № 3. – С. 49–56.
8. Единые нормы выработки и времени на подземные очистные, горнопроходческие и нарезные горные работы. Часть I. Утверждено комитетом СССР по труду и социальным вопросам и ВЦСПС. Постановление № 326/20-93 от 31 декабря 1982 г.
9. Единые нормы выработки (времени) на бурение скважин на открытых горных работах предприятий угольной и сланцевой промышленности. Утверждены 30 октября 1980 г. – М., 1981. – 41 с.
10. Опарин В. Н., Тимонин В. В., Карпов В. Н., Смоляницкий Б. Н. О применении энергетического критерия объемного разрушения горных пород при совершенствовании технологии ударно-вращательного бурения скважин // ФТПРПИ. – 2017. – № 6. – С. 81– 04.
11. Atlas Sopco Rock Drilling Tools. Secoroc Down-the-hole equipment: Operators instruction and spare parts list down-the-hole hammers /Atlas Copco Secoroc AB, Fagestra, Sweden, 2002. – 23 p.
12. Танайно А. С. Сопоставление шкал классификаций горных пород по буримости // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 3. – С. 34–38.
13. Голубинцев О. Н. Механические и абразивные свойства горных пород и их буримость. – М.: Недра, 1968. – 199 с.
14. Воздвиженский Б. И., Мельничук И. П., Пешалов Ю. А. Физико-механические свойства горных пород и влияние их на эффективность бурения – М.: Недра, 1973. – 240 с.
15. Постановление Госкомтруда СССР, Секретариата ВЦСПС от 15.10.1990 № 404/18-94 «Об утверждении Межотраслевых укрупненных нормативов времени на открытые горные работы для предприятий горнодобывающей промышленности. Бурение».
16. Постановление Минтруда РФ от 21.04.1993 № 89 «Об утверждении Укрупненных нормативов времени на горнопроходческие и нарезные горные работы шахт и рудников горнодобывающей промышленности и в геологоразведке».
17. Eremenko V. A., Karpov V. N., Timonin V. V., Shakhtorin I. O., and Barnov N. G. Basic trends in development of drilling equipment for ore mining with block caving method, J. of Mining Science, 2015, Vol. 51, No. 6. – P. 1113–1125.
18. Oparin V. N., Timonin V. V., Karpov V. N. Quantitative estimate of rotary-percussion drilling efficiency in rocks // J. of Mining Science. – 2016. – Т. 52. № 6. – С. 1100–1111.
19. Bo Presson. How sharp rock drilling tools put money in the bank. Mining & construction. 2012, No.3. – P. 26–27.
20. Фокс Брайан и др. Бурение взрывных скважин на открытых горных выработках: издатель Ульф Линде, Atlas Copco Drilling Solutions LLC, Garland, Texas, USA, 2011. – 274 с.
21. A – Z of DTH drilling / Halco Rock Tools. – 05.2016 – pp.76.
22. Емельянов П. М., Есин Н. Н., Зиновьев А. А., Семенов Л. И., Суксов Г. И. Машины для бурения скважин погружными молотками в подземных условиях. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1965. – 200 с.
23. Карпов В. Н. Методика проведения оценочных испытаний погружных пневмоударников в производственных условиях // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – № 3. – Т. 2. – С. 74–80.

REFERENCES

1. Kazachenko G.V., Basalay G.A., Nagorsky A.V., Shuldova S.G., Yarmolinsky V.K. Investigation of the process of auger drilling Part 2. Performance and methods for calculating its characteristics [Issledovaniye protsessa shnekovogo bureniya chast' 2. Proizvoditel'nost' i metodika rascheta yeye kharakteristik] // Mining mechanics and machine building. – 2013. – No. 3. – P. 53–60. [in Russian]
2. Panchenko A.E., Strelkovskaya A.V., Danilov A.K. Increase of reliability of a drill bit // International scientific edition Modern fundamental and applied researches [Mezhdunarodnoye nauchnoye izdaniye Sovremennyye fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya]. 2017. – No. 3 – (26). – P. 12–16. [in Russian]
3. Novoseltseva M.V. Hydroimpulse mechanism of drilling machines for diamond drilling of rocks // Modern science-intensive technologies [Gidroimpul'snyy mekhanizm buril'nykh mashin dlya almaznogo bureniya gornyx porod]. – 2017. – No. 6. – P. 72–76. [in Russian]
4. Bugaev V.G., Eresko S.P., Bugaev I.V. Influence of regime parameters on the efficiency indices of the process of drilling wells in frozen soils [Vliyaniye rezhimnykh parametrov na pokazateli effektivnosti protsessa bureniya skvazhin v merzlykh gruntakh // Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika] // Mining equipment and electromechanics. – 2013. – No. 9. – P. 16–21. [in Russian]
5. Gerike P.B. Actual problems of diagnosing and estimating the residual resource of mining equipment [Aktual'nyye problem diagnostirovaniya i otsenki ostatochnogo resursa gornoshakhtnogo oborudovaniya // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta] // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2017. – No. 5 (123). – P. 111-119. [in Russian]
6. Ivanov B.V. Rationing and analysis of drilling performance with the use of modern automated measurement systems [Normirovaniye i analiz effektivnosti vypolneniya burovnykh rabot s primeneniym sovremennykh avtomatizirovannykh sistem izmereniya] // Drilling and oil. – 2017. – No. 4. – P. 56–59. [in Russian]
7. Kashapov R.Z. Organization of a system of rationing at a drilling enterprise using information technologies [Organizatsiya sistemy normirovaniya na burovom predpriyatii s ispol'zovaniym informatsionnykh tekhnologiy // Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom] // Problems of Economics and Management of the Oil and Gas Complex. – 2018. – No. 3. – P. 49–56. [in Russian]
8. Uniform performance standards and time for underground clearing, tunnelling and cut mining operations. Part I. It is approved by committee of the USSR on work and social problems and the All-Union Central Council of Trade Unions. The resolution No. 326/20-93 of December 31, 1982 [in Russian]
9. Edinye normy vyrabotki (vremeni) na burenie skvazhin na otkrytyh gornyx rabotah predpriyatij ugol'noj i slancevoj promyshlennosti. Utverzhdeny 30 oktyabrya 1980 goda. M., 1981 [in Russian]
10. Oparin V. N., Timonin V. V., Karpov V. N. & Smolyanickij B. N. (2017) Energy-based volumetric rock destruction criterion in the rotary-percussion drilling technology improvement FTPrPI, 81–104 [in Russian]
11. Atlas Sopco Rock Drilling Tools (2002) Secoroc Down-the-hole equipment: Operators instruction and spare parts list down-the-hole hammers. Atlas Copco Secoroc AB, Fagestra, Sweden
12. Tanajno A.S.(2006) Sopostavlenie shkal klassifikacij gornyx porod po burimosti.Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta,3, 34–38 [in Russian].
13. Golubintsev, O.N. (1968) Mekhanicheskie i abrazivnye svoistva gornyx porod i ikh burimost' (Mechanical Properties, Abrasiveness and Drillability of Rocks), Moscow: Nedra [in Russian].

14. Vozdvizhensky, B.I., Mel'nychuk, I.P., & Peshalov Yu. A. (1973) Fiziko-mekhanicheskie svoistva gornykh porod i vliyanie ikh na effektivnost' bureniya (Physical Properties of Rocks and Influence on Drilling Efficiency), Moscow: Nedra [in Russian]
15. Postanovlenie Goskomtruda SSSR, Sekretariata VCSPS ot 15.10.1990 N 404/18-94 "Ob utverzhdenii Mezhotraslevykh ukрупnennykh normativov vremeni na otkrytye gornye raboty dlya predpriyatij gornodobyvayushchej promyshlennosti. Burenie" [in Russian]
16. The resolution of Ministry of Labor of the Russian Federation from 4/21/1993 N 8 «About the ap-proval of the Integrated standards of time for tunnelling and cut mining operations of mines and mines of the mining industry and in geological exploration» [in Russian]
17. Eremenko V. A., Karpov V. N., Timonin V. V. & Shakhtorin I. O., & Barnov N. G.(2015) Basic trends in development of drilling equipment for ore mining with block caving method. J. of Mining Science, Vol. 51, No. 6, P. doi:10.1134/S106273911506037X
18. Oparin V.N., Timonin V.V.&Karpov V.N.(2016) Quantitative estimate of rotary-percussion drilling efficiency in rocks. J. of Mining Science. Vol. 52, No. 6,doi:10.1134/S1062739116061637
19. Bo Presson (2012) How sharp rock drilling tools put money in the bank. Mining & construction.No.3, 26 – 27.
20. Brian Fox (2011) Blasthole Drilling in Open Pit Mining. Garland Texas USA: Atlas Copco Drilling Solutions LLC .
21. A – Z of DTH drilling (2016) Halco Rock Tools – 05.2016 – pp. 76.
22. Yemelyanov P.M. &Yesin N.N., Zinovyev A.A., Semenov L.I., Suksov G.I. (1965) Cars for well-drilling by submersible hammers in underground conditions. Novosibirsk: Academy of Sciences of the USSR [in Russian]
23. Karpov V.N. Technique of carrying out of evaluation tests of submersible hammers in production conditions [Metodika provedeniya otsenochnykh ispytaniy pogruzhnykh pnevmoudarnikov v proizvodstvennykh usloviyakh // Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy gornykh nauk]// Fundamental and applied questions of mining sciences. – 2016. – No. 3. – T. 2. – P. 74–80 [in Russian]

© *В. Н. Карпов, В. В. Тимонин, А. И. Конурич, А. К. Ткачук, 2018*

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И ЗАКЛАДКИ НА РУДНИКЕ «АЙХАЛ» АК «АЛРОСА»

Владислав Генрихович Качальский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории диагностики механического состояния массива горных пород, тел. (905)937-22-85, e-mail: kwg@ngs.ru

Дмитрий Васильевич Барышников

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник лаборатории диагностики механического состояния массива горных пород, тел. (383)291-90-89, e-mail: v-baryshnikov@yandex.ru

Родион Юрьевич Андреев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, ведущий технолог лаборатории диагностики механического состояния массива горных пород, тел. (923)113-41-98, e-mail: andreevrodion@yandex.ru

В статье приведены результаты лабораторных испытаний деформационных и прочностных свойств твердеющей закладки и вмещающих горных пород на глубинах отработки запасов месторождения ромбовидными камерами в условиях рудника «Айхал». В процессе проведения исследований уточнена методика определения деформационных свойств образцов керна с использованием прижимных датчиков деформаций.

Ключевые слова: вмещающая порода, закладка, керн, модуль упругости, коэффициент Пуассона, прочность на сжатие и растяжение.

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF HOST ROCKS AND CONCRETE BACKFILL AT “AYKHAL” MINE “ALROSA” ENTERPRISE

Vladislav G. Kachalsky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Mechanical Rock Mass State Diagnostics Laboratory, phone: (905)937-22-85, e-mail: kwg@ngs.ru

Dmitry V. Baryshnikov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Researcher, Mechanical Rock Mass State Diagnostics Laboratory, phone: (383)291-90-89, e-mail: v-baryshnikov@yandex.ru

Rodion Yu. Andreev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Lead Engineer, Mechanical Rock Mass State Diagnostics Laboratory, phone: (923)113-41-98, e-mail: andreevrodion@yandex.ru

The paper presents the results of laboratory tests of deformation and strength properties of the concrete backfill and host rocks at the area of deposits mining by rhomboid chambers in “Aykhall”

mine. In the process of the research the authors have refined the technique used to determine deformation properties of the core samples using clamping strain gauges.

Key words: host rock, concrete backfill, core sample, elastic modulus, Poisson's ratio, compressive and tensile strength.

В статье представлен анализ результатов определения в лабораторных условиях деформационных и прочностных характеристик образцов горных породы твердеющей закладки, отобранных с глубин отработки запасов полезного ископаемого рудника «Айхал» (АК «Алроса»), по следующим основным показателям:

- предел прочности при одноосном сжатии;
- предел прочности при одноосном растяжении (методом разрушения цилиндрических образцов сжатием по образующим);
- модуль упругости (модуль Юнга), являющийся основной характеристикой деформируемости и представляющий собой отношение напряжения к относительной упругой деформации образца керна в направлении действия этого напряжения при одноосном сжатии.
- коэффициент поперечной упругой деформации (коэффициент Пуассона), являющийся отношением упругой деформации в направлении, перпендикулярном приложенной нагрузки, к относительной упругой деформации в направлении, совпадающим с направлением действия напряжения.

Для определения прочностных и деформационных свойств вмещающих пород и твердеющей закладки было подготовлено 60 образцов диаметром 68 мм, а общее количество испытаний составило 86 (табл. 1).

Таблица 1

Количество испытаний деформационных и прочностных характеристик образцов горных пород и твердеющей закладки

Место отбора	Материал	Количество испытанных образцов		
		$\sigma_{сж.}$	$\sigma_{раст.}$	Деформ. свойства
Скважина 32/1	Закладка	16	4	8
Скважина 32/1	Доломит	20	3	12
Горизонт ± 0	Доломит	8	8	7

Проведение тестов по определению деформационных свойств образцов кернов с наклейкой тензорезисторов на боковые поверхности кернов [1], наклейкой опорных шайб для последующего крепления измерительных устройств [2] и других подобных приспособлений довольно трудоемки и не позволяют повторного использования тензорезисторов. При этом процесс подготовки образцов к испытанию также занимает много времени. Использование этих методов не обеспечивает оперативной оценки деформационных свойств материала в

полевых условиях, особенно при наличии большого количества испытываемых образцов.

В рассматриваемой статье требовалось в лабораторных условиях определить деформационные характеристики 27 образцов керна, полученных из однородного массива доломита и твердеющей закладки, с обеспечением статистической устойчивости полученных результатов. Для выполнения этой задачи использовался соответствующий требованиям ГОСТ 28985-91 [3] прижимной тензометр ДМ-12 конструкции ВНИМИ (рис.1), позволяющий измерять продольные и поперечные деформации на цилиндрических образцах исследуемого материала.

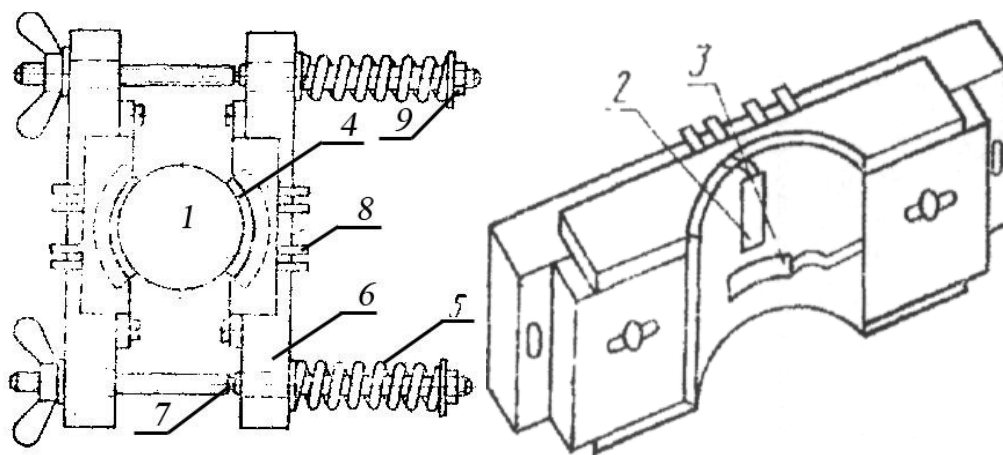


Рис. 1. Прижимной тензометр ДМ-12 конструкции ВНИМИ:

1 – образец; 2 – тензорезистор продольных деформаций; 3 – тензорезистор поперечных деформаций; 4 – прижимная резиновая пластина; 5 – пружины; 6 – опорные плиты; 7 – риски (выточки) на болтах; 8 – контактные колодки; 9 – гайки

Принцип работы данного тензометра основан на прижиге резиновых пластин 4 с наклеенными тензорезисторами к боковой поверхности образца. При этом необходимо обеспечить такое усилие прижима, при котором показания, получаемые в ходе эксперимента, практически совпадают с показаниями, получаемые на этом же образце в ходе эксперимента с применением наклеенных датчиков. Оценка допустимого усилия прижима, обеспечивающего за счет трения резиновых пластин и исследуемого образца измерение деформаций боковой поверхности образца, была проведена перед началом проведения лабораторных исследований.

Сначала на тарирующем устройстве измерялась величина усилия прижима резиновых пластин к образцу диаметром 68 мм, создаваемая путем сжатия пружин тензометра 5. Величина прижима оценивалась по величине смещения опорной плиты 6 относительно рисок (выточек) на болтах 7 тензометра. После тарирования на подготовленных образцах горной породы и закладочного материала была проведена серия измерений относительной деформации прижимных тензорезисторов. Измерения выполнялись при различных величинах прижима

резиновых пластин, но при одинаковом нагружении тестируемых образцов, которое соответствовало 30 % их предела прочности при одноосном сжатии. Целью было определение усилия прижима тензометра, при котором значение относительной деформации было бы наиболее близко к значению наклеенных тензорезисторов (при той же нагрузке образца). Это, в свою очередь, указало бы на оптимальную (требуемую) степень усилия прижима резиновых пластин, при которой обеспечивается наиболее полная передача деформаций керна на прижимной тензорезистор.

На рис. 2 представлен график изменения значений деформаций (в осевом направлении) прижимных тензодатчиков на образце доломита при его нагрузке до 70 кН в зависимости от давления прижима резиновых пластин на его боковую поверхность. Предварительно измеренные значения относительной деформации наклеенных на боковую поверхность тензорезисторов при таком же усилии составляет $38,5 \cdot 10^{-6}$.

Полученный результат свидетельствует о том, что при усилии прижима резиновых пластин до давления 0,75–0,8 МПа обеспечивается полная передача деформаций керна на прижимной тензорезистор.

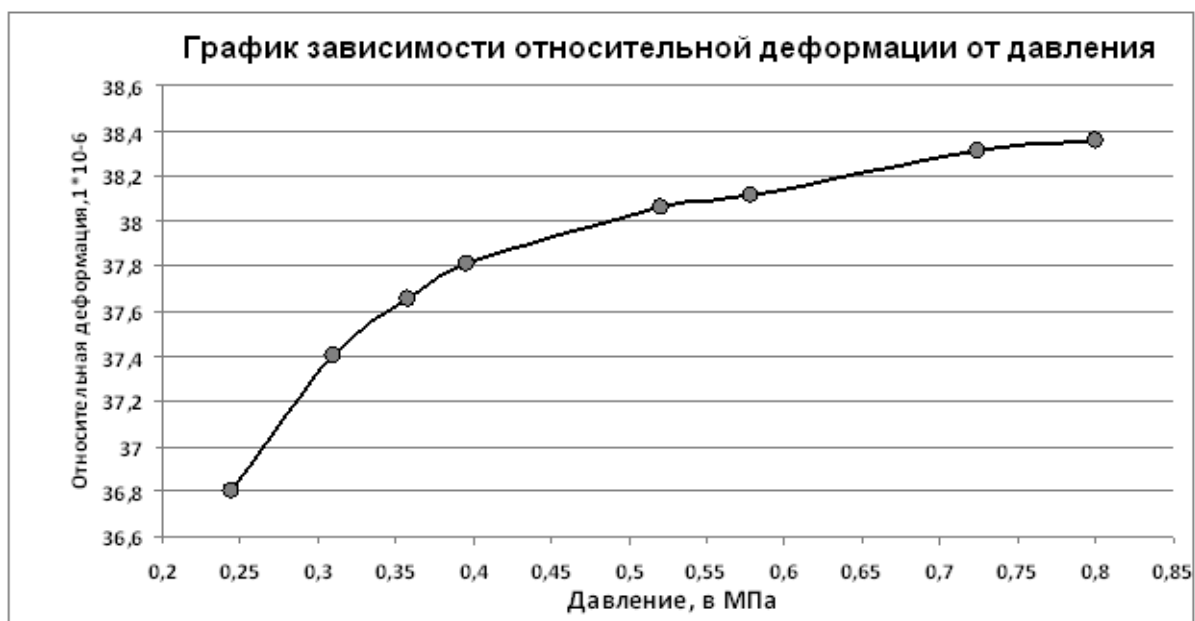


Рис. 2. График экспериментальной зависимости относительной деформации тензодатчиков от давления прижима резиновой пластины тензорезистора ДМ-12 к боковой поверхности образца керна доломита

Результаты применения описанной методики для оценки деформационных свойств образцов горной породы и закладки рудника «Айхал» с использованием прижимного тензометра приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения деформационных свойств твердеющей закладки
и доломита с применением прижимного тензометра

№ скважины	Материал	№ образца	Модуль деформ., ГПа	Модуль упругости, ГПа	Коэфф. Пуассона	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа
Камера 32							
32/1	закладка	1	6,68	7,01	0,26	5,4	-
		2	4,27	4,74	0,21	7,4*	-
		3	-	-	-	4,6	-
		4	4,38	5,89	0,31	4,8	-
		5	-	-	-	5,0	0,93
		6	3,68	4,27	0,25	4,5	-
		7	-	-	-	4,9	-
		8	5,37	6,66	0,39*	4,6	-
		9	-	-	-	5,1	-
		10	4,71	5,47	0,19	4,4	-
		11	4,36	5,09	0,22	3,5	-
		12	-	-	-	4,9	-
		13	4,56	5,85	0,18	4,0	-
		14	-	-	-	4,3	0,86
		15	-	-	-	4,1	0,93
		16	-	-	-	2,6*	0,42*
Среднее значение			4,8	5,6	0,23	4,4	0,91
Среднеквадратичное отклонение			0,9	0,9	0,05	0,7	0,04
Вариация, %			19,2	16,5	19,6	15,8	4,5
32/2	доломит	1	26,3	29,4	0,23	67,2	-
		2	38,3	41,6	0,33	71,4	-
		3	-	-	-	57,6	-
		4	31,3	36,5	0,22	96,9	-
		5	37,5	41,7	0,26	94,7	-
		6	-	-	-	109,1*	-
		7	-	-	-	82,5	-
		8	29,6	32,0	0,29	65,8	-
		9	19,6	20,5	0,19	62,3	-
		10	26,8	29,6	0,29	56,2	-
		11	17,8*	19,7*	0,41*	54,9	-
		12	-	-	-	77,8	-
		13	-	-	-	67,6	-
		14	33,3	36,8	0,27	62,0	4,04
		15	24,4	27,2	0,23	75,3	-
		16	-	-	-	55,5	4,10

№ скважины	Материал	№ образца	Модуль деформ., ГПа	Модуль упругости, ГПа	Коэфф. Пуассона	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа
		17	-	-	-	-	2,11*
		18	-	-	-	38,5*	-
		19	26,2	27,8	0,20	91,1	-
		20	27,9	32,0	0,19	36,4*	-
		21	-	-	-	112,0*	-
Среднее значение			29,2	32,3	0,25	71,2	4,07
Среднеквадратичное отклонение			5,6	6,4	0,05	14,00	0,04
Вариация, %			19,2	19,9	18,8	19,7	1,0
Горизонт ±0							
СЗН 1-1	доломит	1	-	-	-	-	2,9
		2	26,7	29,1	0,18	39,0	
СЗН 2-2	доломит	3	19,8	22,5	0,25	42,9	4,1
		4	25,6	27,0	0,19	52,9	
		5	-	-	-	51,3	
		6	28,0	29,3	0,16	64,0	
ППМ	доломит	7	-	-	-	-	4,5
		8	-	-	-	-	
		9	16,9	19,9	0,17	47,4	
		10	20,8	21,3	0,16	49,6	
		11	19,7	20,8	0,15	42,3	
Среднее значение			22,5	24,3	0,18	48,7	4,1
Среднеквадратичное отклонение			4,2	4,1	0,03	7,8	0,6
Вариация, %			18,8	16,8	18,7	16,1	13,9

* Образцы исключены из обработки.

Выводы:

1. Для качественного измерения величин относительной деформации образцов горной породы (или закладочного материала) с помощью прижимного тензометра необходимо для каждой серии испытываемого материала проводить предварительную оценку усилия прижима резиновых пластин тензометра к образцу, обеспечивающего полную передачу деформаций образца на прижимные тензорезисторы.

2. При усилии прижима резиновых пластин тензометра к образцам доломита, равном 0,75–0,8 МПа, различие значений деформаций прижимных и накладных тензодатчиков не превышает 1 %, что свидетельствует о полной передаче деформаций образца.

3. После исключения (в соответствии с методами статистической обработки) из анализа результатов тестирования некоторых образцов, коэффициенты вариации значений деформационных характеристик доломита и твердеющей закладки не превышают допустимых ГОСТом 20 %. Это говорит о хорошем качестве измерений, выполняемых при помощи прижимного тензометра ДМ-12, которые, в том числе, могут оперативно выполняться в полевых условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2004.
2. Сукнев С. В. Опыт применения стандарта организации СТО 05282612-001-2013 для определения упругих свойств горных пород // Proceeding of the International Geomechanics Conference 27 June – 01 July 2016, Varna, Bulgaria. Междунар. науч. конф. “Scientific and technical union of mining, geology and metallurgy”. Varna, Bulgaria, 27 June – 01 July 2016. – С. 3–9.
3. Барышников В. Д., Качальский В. Г. Анализ погрешности определения деформационных свойств образцов кернов при лабораторных испытаниях // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 13–16.

REFERENCES

1. National Standard GOST 28985-91. Rocks. Method for the determination of deformation characteristics under uniaxial compression. – M. : IPK Publishing House of Standards, 2004.
2. Suknev S.V. Experience in applying the standard of organization STO 05282612-001-2013 for the determination of elastic properties of rocks // Proceeding of the International Geomechanics Conference 27 June – 01 July 2016, Varna, Bulgaria. International Scientific Conference “Scientific and technical union of mining, geology and metallurgy”. Varna, Bulgaria, 27 June – 01 July 2016. – p. 3–9.
3. V. D. Baryshnikov, V. G. Kachalsky. Analysis of Error in Laboratory Evaluation of Strain Properties of Core Specimens // Interexpo GEO-Siberia 2017 XIII International Exhibition and Scientific Congress. International Scientific Congress “Mining. Trends and technologies of search, exploration and development of mineral deposits. Geoecology”, April 25–27, 2017, Novosibirsk, Russia. V. 2, pp. 13–16.

© В. Г. Качальский, Д. В. Барышников, Р. Ю. Андреев, 2018

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕВОДОРОДНОГО ФРАГМЕНТА ОКСИГИДРИЛЬНЫХ И КАТИОННЫХ РЕАГЕНТОВ НА ИХ СОБИРАТЕЛЬНУЮ АКТИВНОСТЬ

Сергей Александрович Кондратьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, зав. лабораторией обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)205-30-30, доп. 120, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

Рассматриваются особенности строения углеводородного фрагмента флотационных реагентов-собирателей, показавших высокое извлечение полезного компонента и качество концентрата. На примере карбоновых кислот, саркозинатов, катионных собирателей установлено, что введение в углеводородную цепь атомов, способных организовать водородную связь с молекулами воды, не может быть разъяснено в рамках термодинамического подхода. Описание энергетического взаимодействия воды с минералом без собирателя и в присутствии собирателей с разной структурой углеводородного фрагмента позволило установить, что внедрение атомов азота или кислорода в молекулу собирателя снижает гидрофобность покрытия минеральной поверхности. Уменьшение свободной поверхностной энергии на границе раздела «минерал-жидкость» в термодинамической постановке задачи о формировании флотационного агрегата неизбежно снизит вероятность его образования. Причины повышения собирательных свойств флотационного реагента, содержащего в углеводородном фрагменте полярные группы, изучаются на основе механизма работы физически сорбируемых реагентов-собирателей. Рассматривается кинетика образования флотационного агрегата. Кинетический подход к описанию элементарного акта флотации раскрыл функциональное назначение электроотрицательных атомов кислорода и азота в углеводородной цепи молекулы собирателя. Установлено, что указанные атомы повышают энергию адгезии пленки собирателя к поверхности воды. Энергетическое взаимодействие молекул собирателя и воды обеспечивает захват и вынос растекающейся пленкой реагента прилегающих слоев воды из прослойки, заключенной между минеральной частицей и пузырьком. В результате снимается кинетическое ограничение образованию флотационного контакта. В тоже время углеводородный радикал собирателя обеспечивает необходимую степень гидрофобизации извлекаемого минерала. Высокие поверхностное давление и скорость растекания пленки реагента обусловлены развитым углеводородным фрагментом молекул собирателя, необходимой его концентрацией на минеральной поверхности и высоким поверхностным натяжением применяемых во флотации пузырьков.

Ключевые слова: оксигидрильные и катионные реагенты-собиратели, структура углеводородного радикала.

INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF HYDROCARBON FRAGMENT OF OXYHYDRIL AND CATIONIC REAGENTS ON THEIR COLLECTING ACTIVITY

Sergey A. Kondratiev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Head of Laboratory for Mineral Beneficiation and Technological Ecology, phone: (383)205-30-30, extension 120, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

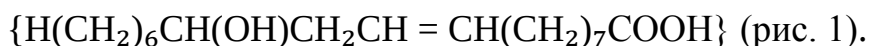
The works studies features typical for the structure of hydrocarbon moiety of flotation collecting reagents with high level of valuable component extraction and concentrate quality. With the

help of carboxylic acids, sarcosinates and cationic collecting reagents it is shown that thermodynamic approach cannot describe the introduction of atoms capable of h-bond with water molecule into hydrocarbon chain. The description of the energy interaction of water with a mineral without a collector and in the presence of collectors with different structure of a hydrocarbon fragment has made it possible to establish that the introduction of nitrogen or oxygen atoms into the collector molecule reduces the hydrophobic properties of the mineral surface coating. A decrease in the free surface energy at the “mineral-liquid” interface in the thermodynamic formulation of the problem on the formation of a flotation unit will inevitably reduce the probability of its formation. The reasons causing the increase in the collective properties of a flotation reagent containing polar groups in the hydrocarbon fragment are studied on the basis of the operating mechanism of physically sorbed reagent-collectors. The kinetics of the formation of a flotation unit is considered. The kinetic approach to the description of the flotation unit event has revealed the functional purpose of the electronegative atoms of oxygen and nitrogen in the hydrocarbon chain of the collector molecule. It is established that these atoms increase the energy of the collector film’s adhesion to the water surface. The energy interaction of the collector and water molecules provides for the capture and removal of the adjacent layers of water by the spreading film of the reagent from the interlayer enclosed between the mineral particle and the bubble. As a result, the kinetic restriction to the formation of the flotation contact is removed. At the same time, the hydrocarbon radical of the collector provides the necessary degree of hydrophobization of the extracted mineral. The high surface pressure and the spreading rate of the reagent film are caused by the developed hydrocarbon fragment of the collector molecules, its required concentration on the mineral surface and the high surface tension of the bubbles used in flotation.

Key words: oxyhydryl and cationic collecting reagents, hydrocarbon radical structure.

Для получения высококачественных апатитовых концентратов с малым содержанием силикатов, карбонатов (доломита и кальцита) применяются карбоновые кислоты, алкилсаркозинаты, сульфосукцинаты и другие собиратели. Указанные собиратели содержат в своем углеводородном фрагменте атомы, способные организовать водородную связь с молекулами воды. Наиболее распространенный метод в производстве концентратов железа- обратная катионная флотация кварца. Эфирные амины, содержащие атом кислорода в углеводородном радикале, также показали высокие собирательные свойства. Цель работы раскрыть причины высоких собирательных свойств реагентов с углеводородными радикалами, содержащими гидрофильные атомы и группы атомов.

Рицинолевая кислота (12-гидрокси-9-цис-октадеценовая кислота). Наиболее полные исследования ненасыщенных жирных кислот на их собирательные свойства выполнены в [1]. Установлены их высокие собирательные свойства. Авторы использовали чистую линоленовую кислоту и подтвердили правило «Хукки и Вартиайнена» о возрастании флотационной активности кислот с увеличением ненасыщенности углеводородного радикала [2]. Ими установлено, что линоленовая кислота обладает лучшими собирательными качествами в сравнении с олеиновой и линолевой кислотами. Также ими было установлено, что наиболее эффективной из исследованных кислот является рицинолевая кислота с гидроксильной группой в углеводородном фрагменте



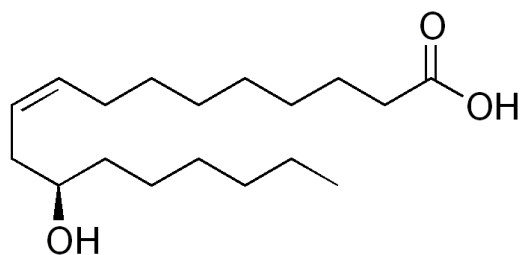


Рис. 1. Структурная формула 12-гидрокси-9-цис-октадеценовой кислоты (рицинолевой кислоты)

В работе [3] также подтверждено правило «Хукки и Вартиайнена» и изучены собирательные свойства рицинолевой кислоты. Флотация кальцита выполнялась в трубке Халлимонта мылами карбоновых кислот: стеариновой, олеиновой, линолевой, линоленовой и рицинолевой. Установлено, что натриевая соль рицинолевой кислоты обладает высокими собирательными свойствами (рис. 2). Ее флотационная активность практически не уступает собирательным свойствам олеата натрия. Гидрофильно-липофильный баланс (ГЛБ) молекул олеиновой кислоты равен 2,45, а олеат иона 19,45 [4]. ГЛБ ионно-молекулярных ассоциатов составит 10,95. Такое значение ГЛБ указывает на некоторую гидрофильность собирателя.

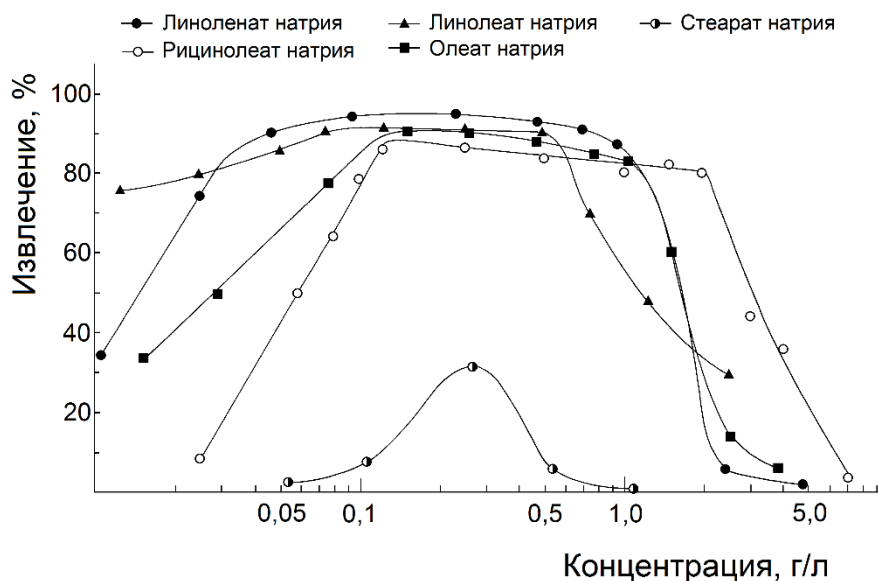


Рис. 2. Флотируемость минералов в трубке Холлимонта в зависимости от концентрации карбоновых кислот

Для получения высококачественных апатитовых концентратов с малым содержанием силикатов, карбонатов доломита и кальцита используется лаурил-саркозинат натрия ($C_{15}H_{28}N_1Na_1O_3$) [5]. На рис. 3 приводится его структурная формула.

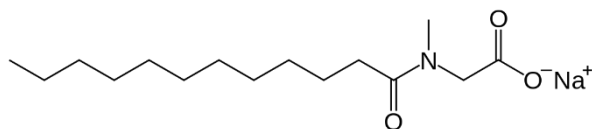
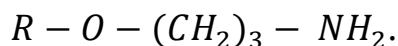


Рис. 3. Структурная формула лаурилсаркозината натрия

В углеводородном фрагменте лаурилсаркозината натрия содержатся атомы кислорода и азота. Эти атомы имеют небольшой радиус и значительную электроотрицательность, что обуславливает возможность образования водородной связи в растворе с молекулами воды.

Гидрофильно-липофильный баланс этого реагента колеблется в зависимости от величины pH от 31 (pH 5) до 39 (pH 9). Указанные значения ГЛБ позволяют отнести лаурилсаркозинат натрия к гидрофильным поверхностно-активным веществам.

Первичные алифатические амины, их ацетат и гидрохлорид соли в основном использовались в ранний период развития катионной флотации. Их свойства и собирательная способность хорошо изучены. В последнее время развитие катионной флотации связывают с применением первичных эфираминов, содержащих ковалентную связь C – O. Первичный амин может быть превращен в эфирный амин введением между алкильным радикалом и атомом азота группы $O - (CH_2)_3$:



Известный собиратель Flotigam EDA это эфирамин с додециловым радикалом и степенью нейтрализации ацетатной кислотой 50 %.

Катионные собиратели наиболее часто применяют в обратной катионной флотации кварца [6]. Эфирный моноамин N-алкилоксипропиламин ($R - O - CH_2 - CH_2 - CH_2 - NH_2$) эффективен при флотации тонких (–74 +38 мкм) частиц кварца, извлечение практически достигает 100 % (рис. 4). Расход собирателя при этом составил 70–80 г/т. Лучшие показатели достигнуты при pH 9. Эфирный диамин N-алкилоксипропил-1,3-диаминопропана ($R - O - (CH_2)_3 - NH - CH_2)_3 - NH_2$ более эффективен при флотации крупнозернистого кварца (–297 +150 мкм) (рис. 4). Получили распространение реагенты типа лилафлот Д817 М и ряд других.

Запатентован собиратель, структурная формула которого содержит в углеводородной цепи атом азота [7]:



где R – линейная или разветвленная алкильная или алкениловая группа с 6–20 атомами углерода, A – алкиленовая группа с 2–4 атомами углерода, например пропилен $H_2C = CH - CH_3$. Авторы утверждают, что данный собиратель замет-

но улучшает флотацию силикатсодержащих минералов по сравнению с известными флотационными реагентами, причем удельный расход этого собирателя может быть заметно снижен.

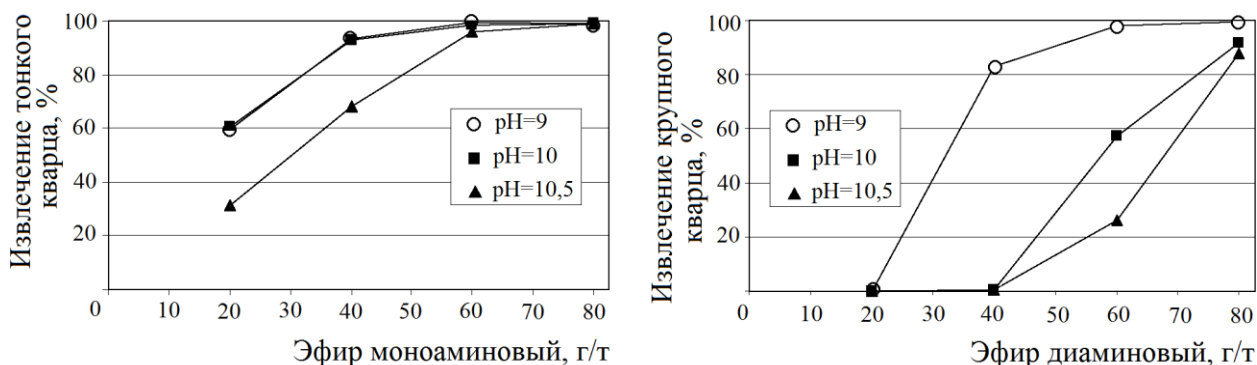


Рис. 4. Извлечение тонких частиц кварца в зависимости от расхода эфирного моноамина и крупных частиц в зависимости от расхода эфирного диамина и pH

Положительное влияние введения атома кислорода и азота в углеводородный фрагмент молекулы собирателя на показатели флотации не находит объяснения при термодинамическом анализе процесса формирования флотационного комплекса. Проанализируем состояние ряда минералов в воде: без гидрофобизирующего покрытия, с аполярным покрытием и с покрытием, имеющим возможность устанавливать энергетическую связь с молекулами воды.

Энергия взаимодействия воды с минералом описывается зависимостью

$$W_A = \sigma_{L-V} (\cos\Theta + 1) + \Pi_e, \quad (1)$$

где σ_{L-V} – поверхностное натяжение воды, Н/м; Π_e – поверхностное давление пленки воды на минерале, Н/м. Увеличение краевого угла Θ приведет к уменьшению $\cos \Theta$, свободная энергия на границе сред «вода минерал» увеличится, а смачиваемость уменьшится. Энергия взаимодействия между твердым телом и водой определяется по формуле [8, 9]:

$$W_A = 2\sqrt{\sigma_{S-V}^{LW}\sigma_{L-V}^{LW}} + 2\sqrt{\sigma_{S-V}^{+}\sigma_{L-V}^{-}} + 2\sqrt{\sigma_{S-V}^{-}\sigma_{L-V}^{+}}, \quad (2)$$

где LW относится к Лифшицу – ван дер Ваалса компонентам поверхностного натяжения; (+) и (–) относятся к электронно-акцепторными электронно-донорным соответственно компонентам кислотно-основных взаимодействий [10, 11].

В работе [12] приводятся значения электронно-донорных и электронно-акцепторных компонент свободной поверхностной энергии ряда жидкостей и твердых тел. Для воды электронно-донорная σ_{L-V}^{-} (основание Льюиса) и электронно-акцепторная σ_{L-V}^{+} (кислота Льюиса) компоненты поверхностного натяжения равны 25.5 мДж/м², аполярная компонента поверхностного натяжения

равна 21,8 мДж/м². Для апатита электронно-донорная составляющая $\sigma_{S-V}^- = 20,5$, электронно-акцепторная компонента $\sigma_{S-V}^+ = 0$ и аполярная $\sigma_{S-V}^{LW} = 35,4$ мДж/м². Для кальцита соответствующие компоненты $\sigma_{S-V}^- = 54,4$, $\sigma_{S-V}^+ = 1,3$ и $\sigma_{S-V}^{LW} = 40,2$ мДж/м².

Работа адгезии воды к апатиту в сумме аполярного и кислотно-основного взаимодействия равна 101,287, а к кальциту 132,69 мДж/м². Когда работа адгезии равна работе когезии или превышает ее $W_A - W_k \geq 0$, то возможно растекание жидкости по поверхности твердого тела. Если работа адгезии меньше работы когезии $W_A - W_k < 0$, то растекание ограничено или отсутствует. Поэтому чем меньше коэффициент растекания, тем хуже смачивание поверхности твердого тела. Коэффициент растекания по Гаркинсу определится из выражения $S_A = W_A - W_k$ или

$$S_A = 2\sqrt{\sigma_{S-V}^{LW}\sigma_{L-V}^{LW}} + 2\sqrt{\sigma_{S-V}^+\sigma_{L-V}^-} + 2\sqrt{\sigma_{S-V}^-\sigma_{L-V}^+} - 4\sqrt{\sigma_{L-V}^+\sigma_{L-V}^-} - 2\sigma_{L-V}^{LW}. \quad (3)$$

Величина коэффициента растекания воды по поверхности апатита в результате аполярных и кислотно-основных взаимодействий составит (–)99,873, а по поверхности кальцита – (–)88,357 мДж/м². Таким образом, оба минерала ограничено смачиваются, но кальцит смачивается водой несколько лучше в сравнении с апатитом. Покрытие минеральной поверхности апатита додеканом ($C_{12}H_{26}$) с аполярной компонентой поверхностного натяжения 25,35 мН/м и нулевыми значениями электронно-донорной и электронно-акцепторной компонентами поверхностного натяжения приведет к снижению энергии взаимодействия воды с минералом до 47,016 мДж/м². Коэффициент растекания воды по гидрофобизированному додеканом апатиту составит –145,6 мДж/м². Это величина равна энергии когезии молекул воды и таким образом растекание воды по минералу отсутствует.

В другом случае при $\Theta = 0$ величина адгезии равна когезии и свободная поверхностная энергия на границе «минерал-жидкость» отсутствует $\sigma_{L-S} = 0$. Этот случай возможен, когда минерал покрывается соединением, формирующим энергетическую связь с молекулами воды. Коэффициент растекания будет равен или больше 0. Использование собирателей, содержащих атомы кислорода, азота, фтора имеющих небольшой радиус и значительную электроотрицательность, приведет к образованию водородной связи с положительно заряженными атомами водорода молекул воды. То есть, углеводородный фрагмент реагента-собирателя установит энергетическую связь с молекулами воды. Эта связь в основном обусловлена кислотно-основными взаимодействиями граничащих сред – свободная энергия на границе раздела «газ-жидкость» понизится и $\Theta \rightarrow 0$.

Сорбционный слой флотируемого минерала представлен химической и физической формами сорбции. Наружная часть сорбционного слоя обычно представлена молекулами и ионно-молекулярными ассоциатами. Рассмотрим наружное покрытие минеральной поверхности молекулами собирателя, функциональные группы которого в состоянии установить энергетическую связь с мо-

лекулами воды, например, с гексадецилтриметил аммоний бромидом. Будем предполагать, что гексадецилтриметил аммоний закрепился физически в результате действия сил ван-дер Ваальса на предварительно гидрофобизированной минеральной поверхности. Аполярная компонента поверхностного натяжения равна $40,0 \text{ мДж/м}^2$, электронно-донорная составляющая σ_{S-V}^- и электронно-акцепторная σ_{L-V}^+ компонента равны соответственно: 8,7 и $0,5 \text{ мДж/м}^2$. Из формулы (2) следует, что $W_A = 95,99 \text{ мДж/м}^2$. Эта величина значительно превышает энергию взаимодействия воды с минералом, в сорбционном слое которого находится додекан, равную $47,016 \text{ мДж/м}^2$. Таким образом, если физическая форма сорбции представлена молекулами с неравными нулю полярными компонентами поверхностного натяжения, то гидрофобность минерального покрытия снижается, а флотируемость повышается.

Объяснение высокой собирательной способности рицинолевой кислоты (12-гидрокси-9-цис-октадеценовая кислота), лаурилсаркозината натрия, эфирных аминов может быть дано в рамках механизма работы физической формы сорбции [13, 14].

В момент столкновения минеральной частицы с пузырьком происходит локальный прорыв прослойки жидкости, разделяющей объекты взаимодействия. Образуется мениск с наступающим краевым углом. В этот же момент устанавливается контакт границы раздела «газ – жидкость» с поверхностью минерала. Поверхностно-активные ассоциаты карбоновых кислот, аминов или ксантогенатов, структурными единицами которых могут служить соответственно: $(RCOO)_2H^-$, $RNH_3^+ \cdot RNH_2$ и $(ROCSS)_2ROCSS^-$, $Me(ROCSS)_3^-$, сорбированные минералом, переходят на поверхность мениска и, вследствие высокой скорости растекания, увлекают в свое движение воду, находящуюся в прослойке между объектами взаимодействия. Скорость растекания пленки реагента и отсутствие ее гидрофобного проскальзывания по поверхности воды – факторы, определяющие время удаления воды из прослойки.

Предельные физически сорбируемые аполярные соединения с симметричным строением молекул и дипольным моментом, равным нулю, не являются собирателями, так как не в состоянии установить энергетическое взаимодействие с молекулами воды. Согласно правилу Гаркинса [15], в этом случае реагент не растекается и не увлекает воду в свое движение. Напротив, непредельные реагенты с асимметричным строением молекул, с дипольным моментом большим нуля и активные на границе «газ – жидкость» ассоциаты в состоянии оказать эффект удаления воды из прослойки. В этом случае наблюдается «прилипание» водной подложки к пленке. «Прилипание» водной прослойки к растекающейся пленке десорбированных с минеральной поверхности физически закрепившихся форм собирателя осуществляется за счет водородных связей. За счет уменьшения объема жидкости в прослойке ее толщина уменьшается. Мениск с наступающим контактным углом трансформируется в мениск с отступающим динамическим контактным углом. При достижении указанного угла линия смачивания перемещается по минеральной поверхности, а «сухое» пятно,

образовавшееся на минеральной грани в момент локального прорыва, расширяется до ребер частицы извлекаемого минерала. Таким образом, дифильные молекулы собирателя обеспечивают определенную энергетическую связь растекающейся пленки с водой и возможность удаления ее из прослойки.

Растекание пленки производных форм собирателя по поверхности воды происходит в том случае, если работа адгезии W_{W-Oil}^A превышает работу когезии W_{Oil}^C растекающейся жидкости, т. е. жидкость растекается, если ее межмолекулярные связи разрушаются в результате адгезии. Таким образом, если $W_{W-Oil}^A - W_{Oil}^C \geq 0$, то происходит растекание пленки, и если $W_A - W_k < 0$, то растекание не происходит.

Количественно коэффициент растекания можно выразить в виде

$$S = \sigma_W - \sigma_{Oil} - \sigma_{W-Oil}. \quad (4)$$

Здесь σ_W – поверхностное натяжение воды; σ_{Oil} – поверхностное натяжение производных форм собирателя, закрепившихся на минеральной поверхности; жидкости взаимно насыщены. σ_{W-Oil} – поверхностное натяжение на границе раздела «вода-производные формы собирателя».

Величину σ_{W-Oil} найдем согласно правилу Антонова: если жидкости ограниченно растворимы друг в друге, то поверхностное натяжение на границе раздела двух жидкостей равно разности между поверхностными натяжениями взаимно насыщенных жидкостей на границе их с воздухом или с их собственным паром:

$$\sigma_{W-Oil} = \sigma_W - \sigma_{Oil} = 47,45. \quad (5)$$

Учитывая, что додекан плохо растворим в воде, а его поверхностное натяжение $\sigma_{Oil} = 25,35$ мДж/м² из (4) определим $S = 0$. Равенство нулю коэффициента S допускает возможность растекания додекана по поверхности воды.

Величина энергии связи додекана с водой в результате аполярного и электронно-акцепторного и электронно-донорного взаимодействия составит:

$$W_{W-Oil}^A = 2\sqrt{\sigma_{W-V}^{LW}\sigma_{Oil-V}^{LW}} + 2\sqrt{\sigma_{W-V}^+\sigma_{Oil-V}^-} + 2\sqrt{\sigma_{W-V}^-\sigma_{Oil-V}^+} = 47,016 \text{ мДж/м}^2 \quad (6)$$

где $\sigma_{Oil-V}^{LW} = 25,35$ – аполярная компонента поверхностного натяжения додекана, мДж/м²;

$\sigma_{Oil-V}^- = 0$ – его электронно-донорная компонента, мДж/м²;

$\sigma_{Oil-V}^+ = 0$ – электронно-акцепторная компонента додекана, мДж/м².

Аполярная составляющая когезии додекана равна

$$2W_{Oil}^C = 50,7 \text{ мДж/м}^2.$$

Из приведенной оценки коэффициента растекания следует $S < 0$. Таким образом, растекание додекана по поверхности воды невозможно, правило Антонова в данном случае не соблюдается.

Растекание углеводородной пленки по поверхности воды можно обеспечить, добавляя в нее вещества, уменьшающие ее поверхностное натяжение и увеличивающие работу адгезии со смачиваемой поверхностью. Для того чтобы произошло растекание жидкости не обязательно наличие полярных групп. Однако, полярные группы повышают величину W_{W-oil}^A по отношению к воде значительно больше, чем величину W_{oil}^C , так что разность $W_{W-oil}^A - W_{oil}^C$ увеличивается. Отсутствие растекания, как правило, вызывается высоким значением W_{oil}^C для данной жидкости. Например, хорошо известно, что длинноцепочечные, насыщенные (C14 и выше) карбоновые кислоты, у которых велики силы когезии углеводородных цепей, практически не растекаются по поверхности воды. По этой причине ненасыщенные кислоты с более длинной углеводородной цепью могут растекаться по поверхности воды и выполнять собирательную функцию – удалять жидкость из прослойки.

Основной вклад в уменьшение величины коэффициента растекания S вносит снижение поверхностного натяжения жидкости-субстрата за счет образования на ее поверхности мономолекулярного слоя поверхностно-активных веществ. Во флотации применение длинноцепочечных собирателей и их высокий расход приводят к снижению поверхностного натяжения σ_w пузырьков. В ряде работ установлено, что применение свежих пузырьков, не содержащих на своей поверхности поверхностно-активных собирателей, наиболее благоприятно для формирования флотационного контакта. Авторы работы [16] приходят к выводу, что флотационная активность минерала возрастает в условиях адсорбции на извлекаемом минерале активных по отношению к границе раздела «газ – жидкость» ионно-молекулярных ассоциатов и использовании «свежих» пузырьков, т. е. пузырьков с высоким поверхностным натяжением. В этом случае поверхностное натяжение жидкости-субстрата способствует повышению коэффициента растекания пленки, содержащей производные формы собирателя. В работе [17] показано, что понижение поверхностного натяжения пузырька привело к увеличению времени его прилипания к подложкам, изготовленным из стекла, гематита и тефлона. Вне зависимости от природы материала подложки эффект увеличения времени прилипания пузырька к ним проявляется очевиднее с понижением поверхностного натяжения раствора собирателя. Необходимо отметить, что измерения времени прилипания проводились в растворе додециламины с pH раствора 9,7. При указанном значении pH на поверхности гидрофобизированной или гидрофобной подложки находится физическая форма сорбции реагента, представленная ассоциатами катионов и молекул реагента.

Градиент поверхностного давления пленки десорбированных с минеральной поверхности форм собирателя можно записать в следующем виде $P = \partial\sigma/\partial x$. Здесь x – ось на поверхности раздела двух жидкостей, направленная

в сторону растекания жидкости с меньшим поверхностным натяжением по жидкости с большим поверхностным натяжением. Градиент поверхностного давления можно разложить на два сомножителя: $P = \frac{\partial \sigma}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial x}$. Здесь $\frac{\partial \sigma}{\partial c}$ характеризует поверхностную активность производных форм реагента-собираателя, а $\frac{\partial c}{\partial x}$ – градиент концентрации в направлении движения пленки указанных форм. Учитывая, что скорость растекания пропорциональна градиенту поверхностного натяжения получим

$$V = k \frac{\partial \sigma}{\partial c} \Delta C. \quad (7)$$

Из полученного соотношения следует, что скорость растекания тем выше, чем больше поверхностная активность $\frac{\partial \sigma}{\partial c}$ производных продуктов реагента-собираателя и больше его сорбция на извлекаемом минерале. Увеличение поверхностной концентрации длинноцепочечного собирателя на границе раздела «газ – жидкость» уменьшит градиент концентрации ΔC и скорость растекания пленки. Как результат, показатели флотации снизятся, что находится в соответствии с данными [16]. Точно также использование короткоцепочечных собирателей приведет к сокращению их сорбции на минерале и сохранению высокой концентрации в растворе. В результате градиент концентрации ΔC уменьшится, а скорость растекания таких реагентов или их производных продуктов снизится.

В [18] предложен метод изменения значений электронно-донорных и электронно-акцепторных компонент свободной поверхностной энергии твердых тел электромагнитной импульсной обработкой. Метод может быть применен для повышения извлечения и селективности извлечения минералов во флотации. Сравнительно непродолжительная электромагнитная обработка кальцита, флюорита, шеелита привела к увеличению концентрации электродонорных люисовских центров и протонодонорных центров бренстедовского типа.

Выводы

Установлено, что высокая флотационная активность: рицинолевой кислоты, саркозинатов, эфирных аминов и других собирателей, содержащих в углеводородной цепи гидрофильные атомы, не может быть разъяснена в рамках термодинамического анализа формирования флотационного комплекса. Энергетическое взаимодействие воды с углеводородным фрагментом собирателя, содержащим атомы кислорода и азота, приведет к гидрофилизации минеральной поверхности и уменьшению вероятности образования флотационного комплекса.

Механизм работы физической формы сорбции позволяет раскрыть причины положительного эффекта от введения атомов кислорода, азота, фторав углеводородный радикал собирателя. Показано, что введение в углеводородный

фрагмент указанных атомов или групп атомов приведет к формированию энергетической связи собирателя с молекулами воды в прослойке и захватом их растекающейся пленкой производных форм реагента-собирателя. Длительность истечения жидкости из прослойки и время формирования флотационного агрегата будут сокращены.

Углеводородный радикал, например, собирателя Flotigam EDA, обеспечивает необходимую степень гидрофобизации минеральной поверхности, необходимую для прорыва прослойки между минеральной частицей и пузырьком воздуха и закрепления периметра контакта трех агрегатных состояний на минеральной поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-05-00361.

The work has been funded by RFBR grant № 18-05-00361.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kivalo P., Lehmusvaare E. An investigation into the collecting properties of some basic components of tall oil / Progress in Mineral Dressing. Stockholm, Verl. Almquist and Wiksell. – 1958. – P. 577–587.
2. Hukki R. T., Vartiainen O. An investigation of the collecting effects of fatty acids in tall oil on oxide minerals, particularly on ilmenite / Mining Engng. – 1953. – V. 5. – N. 7. – P. 818–820.
3. Mackenzie J. M. W. Soap flotation of calcite with particular reference to the upgrading of caversham sandstone. A thesis presented to the University of New Zealand for the degree of master of engineering. University of Otago. 1959. – P. 55.
4. Yu F., Wang Y., Zhang L., Zhu G. Role of oleic acids ionic-molecular complex in the flotation of spodumene / Mineral Engineering. – 2015. – Vol. 71. – P. 7–12.
5. Kramer A., Gaulocher S., Martins M., Leal Filho L.S. Surface Tension Measurement for Optimization of Flotation Control / Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 46. – P. 111–118.
6. Vieira A. M., Peres A. E. C. The effect of amine type, pH, and size range in the flotation of quartz / Minerals Engineering. – 2007. – Vol. 20. – P. 1008–1013.
7. Патент RU 2440854. Педейн К-У, Рэй Т., Патцке М. Флотореагент для силикатсодержащих минералов. Опубл. 27.01.2012.
8. Koopal L. K. Wetting of solid surfaces: fundamentals and charge effects / Advances in Colloid and Interface Science. – 2012. – Vol. 179–182. – P. 29–42.
9. Lecrivain G., Petrucci G., Rudolph M., Hampel U., Yamamoto R. Attachment of solid elongated particles on the surface of a stationary gas bubble / International Journal of Multiphase Flow. – 2015. – P. 83–93.
10. Van Oss C. J. Interfacial Forces in Aqueous Media. – New York: Marcel Dekker, Inc. – 1994. – P. 440.
11. Giese F. G., van Oss C. J. Colloid and Surface Properties of Clays and Related Minerals. – 2002, New York: Marcel Dekker, Inc. – P. 296.
12. Nguyen A., Drelich J., Colic M., Nalaskowski J., Miller J. D. Bubbles: Interaction with Solid Surfaces / Encyclopedia of Surface and Colloid Science. – 2007. – P. 50. <http://dx.doi.org/10.1081/E-ESCS-120022194>. DOI: 10.1081/E-ESCS-120022194. Review Article.
13. 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. 164–174.

14. Kondratyev S. A., Ryaboy V. I. Dithiophosphates collecting ability estimation and its relationship to selectivity of valuable component recovery / *Obogashchenie rud–Ore Dressing Treatment*. – 2015. – Vol. 3. – pp. 25–31.
15. Harkins, W. D. The Physical Chemistry of Surface Films. *J. Chem. Phys.* – 1941. Vol. 9, 552. – P. 95–105.
16. Finch J. A., Smith G. W. Dynamic surface tension of alkaline dodecylamine solutions / *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1973. – Vol. 45. – No.1. – P. 81–91.
17. Finch, J.A., Smith G.W. Bubble-solid attachment as a function of bubble surface Tension / *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1975. – V.14. – Issue 1. – P. 47–51.
18. Рязанцева М. В., Бунин И. Ж. Модифицирование кислотно-основных свойств поверхности кальцита, флюорита и шеелита в процессе электромагнитной импульсной обработки // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2015. – №. 5. – С. 140–145.

REFERENCE

1. Kivalo P., Lehmusvaare E. An investigation into the collecting properties of some basic components of tall oil / *Progress in Mineral Dressing*. Stockholm, Verl. Almquist and Wiksell. – 1958. – P. 577–587.
2. Hukki R.T., Vartiainen O. An investigation of the collecting effects of fatty acids in tall oil on oxide minerals, particularly on ilmenite / *Mining Engng.* -1953. – V. 5. – N. 7. – P. 818–820.
3. Mackenzie J .M.W. Soap flotation of calcite with particular reference to the upgrading of caversham sandstone. A thesis presented to the University of New Zealand for the degree of master of engineering. University of Otago.1959. – P. 55.
4. Yu F., Wang Y., Zhang L., Zhu G. Role of oleic acids ionic-molecular complex in the flotation of spodumene / *Mineral Engineering*. – 2015. – Vol. 71. – P. 7–12.
5. Kramer A., Gaulocher S., Martins M., Leal Filho L.S. Surface Tension Measurement for Optimization of Flotation Control / *Procedia Engineering*. – 2012. – Vol. 46. P. 111–118.
6. Vieira A. M., Peres A.E.C. The effect of amine type, pH, and size range in the flotation of quartz / *Minerals Engineering*. – 2007. – Vol. 20. – P. 1008–1013.
7. Patent RU 2440854. Pedain Klaus-Ulrich (DE), Rau Tobias (DE), Patske Michael(AT). Фотореагент для силикатсодержащих минералов. Опубл. 27.01.2012.
8. Koopal L. K. Wetting of solid surfaces: fundamentals and charge effects / *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2012. – Vol. 179-182. – P. 29–42.
9. Lecrivain G., Petrucci G., Rudolph M., Hampel U., Yamamoto R. Attachment of solid elongated particles on the surface of a stationary gas bubble / *International Journal of Multiphase Flow*. – 2015. – P. 83–93.
10. Van Oss C.J. *Interfacial Forces in Aqueous Media*. – New York: Marcel Dekker, Inc. – 1994. – P. 440.
11. Giese F.G., van Oss C.J. *Colloid and Surface Properties of Clays and Related Minerals*. – 2002, New York: Marcel Dekker, Inc. – P. 296.
12. Nguyen A., Drelich J., Colic M., Nalaskowski J., Miller J. D. Bubbles: Interaction with Solid Surfaces / *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*. – 2007. – P. 50. <http://dx.doi.org/10.1081/E-ESCS-120022194>. DOI: 10.1081/E-ESCS-120022194. Review Article.
13. Kondrat'ev S. A., Moshkin N.P., Konovalov I.A. Collecting ability of easily desorbed xanthate / *Journal of Mining Science*. – 2015. – Vol. 51. – No. 4. – P. 830–838.
14. Kondratyev S. A., Ryaboy V. I. Dithiophosphates collecting ability estimation and its relationship to selectivity of valuable component recovery / *Obogashchenie rud–Ore Dressing Treatment*. – 2015. – Vol. 3. – pp. 25–31.
15. Harkins, W. D. The Physical Chemistry of Surface Films. *J. Chem. Phys.* – 1941. Vol. 9, 552. – P. 95–105.

16. Finch J. A., Smith G. W. Dynamic surface tension of alkaline dodecylamine solutions / Journal of Colloid and Interface Science. – 1973. – Vol. 45. – No. 1. – P. 81–91.
17. Finch, J.A., Smith G.W. Bubble-solid attachment as a function of bubble surface Tension /Canadian Metallurgical Quarterly. 1975. – V.14. – Issue 1. – P. 47–51.
18. Ryazantseva M. V., Bunin I. Zn. Modifying acid-base surface properties of calcite, fluorite and scheelite under electromagnetic pulse treatment // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51. – No. 5. – P. 1016–1020.

© C. A. Кондратьев, 2018

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГРУНТОВОЙ ПРОБКИ ПРИ ПОГРУЖЕНИИ ТРУБЫ ОТКРЫТЫМ ТОРЦОМ В МАССИВ

Антон Игоревич Конурин

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

Андрей Сергеевич Кондратенко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, директор, e-mail: kondratenko@misd.ru

Применение бестраншейного метода прокладки подземных коммуникаций является выгодной альтернативой применению открытых методов. При сооружении закрытых подземных переходов широко применяется способ виброударного погружения в грунт стальных труб с открытым передним торцом. Регулярная очистка забитой трубы от образующегося грунтового керна является одной из наиболее важных операций в этой технологии. Параметры грунтовой пробки (плотность, линейные размеры) зависят от физико-механических свойств грунта, в котором производятся работы. Целью настоящей статьи является установление параметров моделирования процесса формирования грунтовой пробки при погружении трубы открытым торцом в массив, а также установление факторов, влияющих на характеристики грунтовой пробки. Рассмотрены примеры построения численных моделей грунтовых массивов при погружении труб при различных технологических операциях. Построена расчетная модель взаимодействия открытого торца трубы с грунтовым массивом при статическом нагружении для решения методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Принятый подход к моделированию процесса формирования грунтовой пробки при погружении трубы открытым торцом в массив позволяет учесть упруго-пластические свойства грунта, дает возможность решить контактную задачу для системы «поверхность трубы – грунтовый массив», обеспечивает интерактивную оптимизацию параметров расчета и адаптивное перестроение сетки конечных элементов при уплотнении грунта. Выявлены основные ограничения и допущения при моделировании рассматриваемого процесса, связанные с объемами затрачиваемых вычислительных ресурсов. Полученные результаты могут быть использованы для построения динамической модели взаимодействия системы, а также при разработке расчетной модели процесса комбинированной очистки трубы от грунтового керна.

Ключевые слова: грунтовый массив, труба, напряженное состояние, метод конечных элементов, численное моделирование, грунтовая пробка, керна, способы проходки, бурение, подземное строительство.

NUMERICAL MODELING OF A SOIL PLUG FORMATION DURING AN OPEN END PIPE SUBMERGENCE INTO A ROCK MASS

Anton I. Konurin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, Physical-Technical Geotechnology Laboratory, e-mail: akonurin@yandex.ru

Andrey S. Kondratenko

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Director, e-mail: kondratenko@misd.ru

The employment of a trenchless method of subsurface utility engineering is a viable alternative to the use of open methods. A method of vibro-impact submergence of steel pipes with an open front end into the ground is widely used in the construction of closed underground galleries. Regular cleaning of the clogged pipe from the emerging core is one of the most important operations in this technology. The parameters of the soil plug (density, linear dimensions) depend on the physical and mechanical properties of the soil in which the work is done. The aim of the article is to establish the parameters for the simulation of a soil plug formation when the pipe with an open end is immersed into the rock mass. Also, it is important to determine factors affecting the properties of the soil plug. The work studies the construction of soil mass numerical models during the immersion of pipes under various technological operations. The calculated model of the interaction of the pipe's open end with a soil mass under static loading is constructed for the solution by the finite element method in the ANSYS software package. The adopted approach to the modeling of the soil plug formation when the pipe with an open end is submerged into the mass makes it possible to take into account the elastic-plastic properties of the soil. It provides the opportunity to solve the contact problem for the "pipe surface-soil mass" system and provides interactive optimization of calculation parameters and adaptive reconstruction of the finite elements network during soil consolidation. The main limitations and assumptions in the simulation of the process under consideration associated with the amount of computing resources expended are revealed. The obtained results can be used to construct a dynamic model of the system interaction, as well as to develop a design model for the process of combined pipe cleaning from the core.

Key words: soil mass, pipe, stress state, finite element method, numerical modeling, soil plug, core, methods of timbering, drilling, underground construction.

Введение

Применение бестраншейного метода прокладки подземных коммуникаций является выгодной альтернативой применению открытых методов. При сооружении закрытых подземных переходов широко применяется способ виброударного погружения в грунт стальных труб с открытым передним торцом.

Регулярная очистка забитой трубы от образующегося грунтового керна является одной из наиболее важных операций в этой технологии. Параметры грунтовой пробки (плотность, линейные размеры) зависят от физико-механических свойств грунта, в котором производятся работы.

Целью настоящей статьи является установление параметров моделирования процесса формирования грунтовой пробки при погружении трубы открытым торцом в массив, а также установление факторов, влияющих на характеристики грунтовой пробки.

Сложность численного моделирования формирования грунтовой пробки заключается в том, что процессы закупоривания трубы при ее погружении открытым торцом в массив не были полностью исследованы. Еще одной проблемой является сложность экспериментального определения неизвестных параметров, таких как динамический коэффициент трения на контакте поверхности трубы с грунтовым массивом, а также учет волновых процессов в трубе.

В научных статьях используются различные подходы для описания рассматриваемого процесса. Некоторые из них основаны на экспериментальных

исследованиях в полевых условиях [1–3], другие применяют численное моделирование методом дискретных [4] и конечных [5] элементов.

На первом этапе по мере внедрения трубы в ней начинает накапливаться грунт, этот процесс продолжается до тех пор, пока трение на боковых стенках трубы не превышает определенной критической величины. При дальнейшем движении трубы все ее сечение заполняется грунтом, а грунт начинает сжиматься. Последующее перемещение трубы приводит к тому, что давление грунта на стенки трубы, а также плотность грунта достигают максимальной величины и формируется грунтовая пробка.

Методы и материалы, результаты

Численное моделирование процесса формирования грунтовой пробки при погружении трубы открытым торцом в массив выполнено в программном комплексе ANSYS в осесимметричной постановке. Грунт в начальный момент времени с известными допущениями считается изотропным. Границы рассчитываемой области были приняты исходя из условия того, что отсутствует влияние участка исследования (зоны ударного взаимодействия) на внешний контур расчетной области (принцип Сен-Венана). Краевые условия задачи заданы в виде ограничений на перемещения по всем компонентам вектора перемещений. Качество сеточной модели влияет на точность, сходимость и скорость получения решения, поэтому при разбиении расчетной области применялись конечные элементы переменного размера. В зоне ожидаемого наибольшего градиента деформаций разбиение было наиболее мелким и увеличивалось на участках с плавным изменением деформаций (на границах расчетной области). Размер соседних конечных элементов увеличивался не более чем в 2 раза. Расчетная область разбивалась на конечные элементы, имеющие по 3 степени свободы в каждом узле – перемещения в направлении осей X , Y , Z узловой системы координат и линейную аппроксимацию поля перемещений [6, 7].

Для описания взаимодействия трубы с грунтом были использованы контактные элементы. В рассматриваемой задаче на поверхности контакта задавались условия частичного проскальзывания [8, 9]. Для повышения точности результатов расчетов шаг дискретизации в области контактного взаимодействия уменьшался. При разбиении расчетной области на конечные элементы выполнялось условие наличия на каждой контактной поверхности более 24 конечных элементов [10, 11]. Физически контактирующие тела не проникают друг в друга, поэтому расчетный алгоритм должен обеспечивать установку взаимоотношений между двумя поверхностями для предотвращения проникновения в расчете. Для конечной контактной силы $F_{\text{норм}}$ вводится понятие контактной жесткости $k_{\text{норм}}$. Чем выше контактная жесткость, тем ниже величина проникновения $x_{\text{прон}}$. В расчете применяется расширенный метод Лагранжа (Augmented Lagrange) – это метод, «расширяющий» вычисление при помощи дополнительного члена λ :

$$F_{\text{норм}} = k_{\text{норм}} x_{\text{прон}} + \lambda.$$

Благодаря дополнительному члену λ , расширенный метод Лагранжа менее чувствителен к колебаниям контактной жесткости $k_{\text{норм}}$.

Система дифференциальных уравнений для определения вектора перемещений узловых точек имеет вид:

$$[M](\ddot{u}) + [C](\dot{u}) + [K](u) = (F(t)),$$

где $[M]$ – матрица масс,

$[C]$ – матрица демпфирования,

$[K]$ – матрица жесткости,

$(\ddot{u})$ – вектор ускорений узлов,

$(\dot{u})$ – вектор скоростей узлов,

(u) – вектор перемещений узлов,

$(F(t))$ – вектор приложенного силового воздействия.

При моделировании предполагалось, что демпфирование в системе происходит по Рэлею [12, 13]. Матрица демпфирования определяется с использованием матрицы масс и матрицы жесткости:

$$[C] = \varepsilon \cdot [M] + \chi \cdot [K].$$

Коэффициенты вязкого демпфирования ε, χ являются действительными константами. Они определялись из условий соответствия расчетов результатам экспериментальных исследований [14–16].

В упругой постановке, когда полученные напряжения ниже предела текучести, материал может полностью восстановить свою форму при разгрузке. Однако в грунтах наблюдаются большие остаточные деформации. Когда грунт достигает напряжений, превышающих предел текучести, он течет, получая крупные постоянные перемещения. Пластическая деформация происходит из-за скольжения плоскостей атомов в результате сдвиговых напряжений (девиаторные напряжения). Это движение дислокаций по сути является перестановкой атомов в кристаллической решетке, для предоставления им новых соседей. Оно приводит к невозстанавливаемым перемещениям или остаточной деформации после снятия нагрузки. Скольжение, как правило, не приводит ни к каким объемным деформациям (условие несжимаемости), в отличие от упругости.

Поведение грунта за пределом текучести обычно характеризуется как деформационное упрочнение, т. е. напряжения за пределом текучести растут вместе с деформациями (рис. 1).

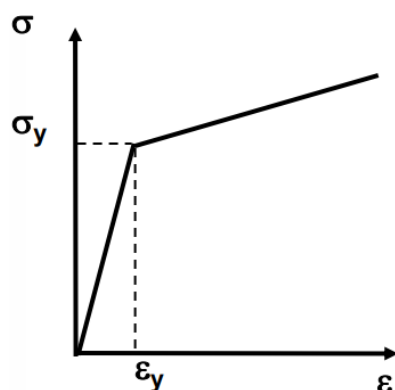


Рис. 1. График деформационного упрочнения грунта при одноосном НДС

Процесс погружения стальной трубы открытым торцом в грунтовый массив и формирования грунтовой пробки подразумевает наличие больших деформаций. В этом случае применение стандартного подхода к моделированию методом конечных элементов по Лагранжу не представляется возможным из-за высокой степени искажения сетки. Для преодоления этой проблемы применяется специальный подход – сопряженный численный метод Эйлера – Лагранжа (Coupled Eulerian – Lagrangian, CEL). В работах [17–21] показана эффективность применения этого метода к решению геотехнических задач, подразумевающих большие перемещения. Метод CEL сочетает преимущества методов Лагранжа и Эйлера: граница смещения распространяется во внутреннее пространство сеточного объема, при этом малые и пристеночные элементы деформируются меньше. Это обеспечивает хорошее разрешение пограничного слоя и позволяет работать с большими деформациями сетки (рис. 2).



Рис. 2. Распределение деформаций в грунтовом массиве при погружении трубы

Для представления грунта используется три основных компонента теории пластичности в приращениях: критерий текучести, закон течения и закон упрочнения.

Критерий текучести используется для соотношения многоосных напряженных состояний с одноосным. Поскольку грунт находится в многоосном напряженном состоянии, критерий текучести предлагает скалярную инвариантную меру напряженного состояния материала, которую можно сравнить с одноосным случаем.

Критерий текучести Мизеса прогнозирует возникновение пластического течения всякий раз, когда энергия деформирования на единицу объема равняется энергии деформирования того же объема, достигшего предела текучести в одноосном напряженном состоянии. Когда эквивалентные напряжения по Мизесу превышают одноосный предел текучести материала, возникает общее течение. Развитие пластической деформации определяется законом течения:

$$d\varepsilon^{pl} = d\lambda \frac{\delta Q}{\delta \sigma},$$

где $d\lambda$ – величина приращения пластической деформации,

Q – потенциал пластической деформации.

Закон упрочнения описывает то, как меняется поверхность текучести (размер, центр, форма) в ходе пластической деформации (рис. 3). Он определяет, когда материал вновь потечет, если нагрузка продолжится или будет направлена в противоположную сторону. Для описания изменения поверхности текучести применяется кинематическое упрочнение, т. е. поверхность текучести остается неизменной в размере и перемещается в направлении течения. Исходный материал после пластического течения и кинематического упрочнения перестает быть изотропным.

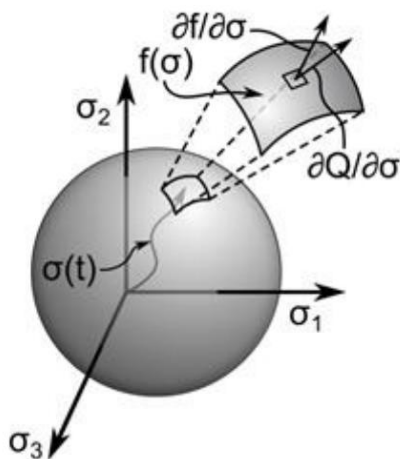


Рис. 3. Развитие пластической деформации в элементарном объеме грунта

Обсуждение

На рис. 4 показаны результаты численного моделирования. При погружении трубы сначала она прорезает грунт, потом грунт внутри начинает уплотняться и начинает двигаться вместе с трубой, затем в трубе образуется пробка

и грунт перестает поступать в трубу. Возникающие напряжения в грунтовой пробке значительно превышают напряжения в окружающем трубу массиве. Наибольшая концентрация напряжений наблюдается в области открытого торца трубы.

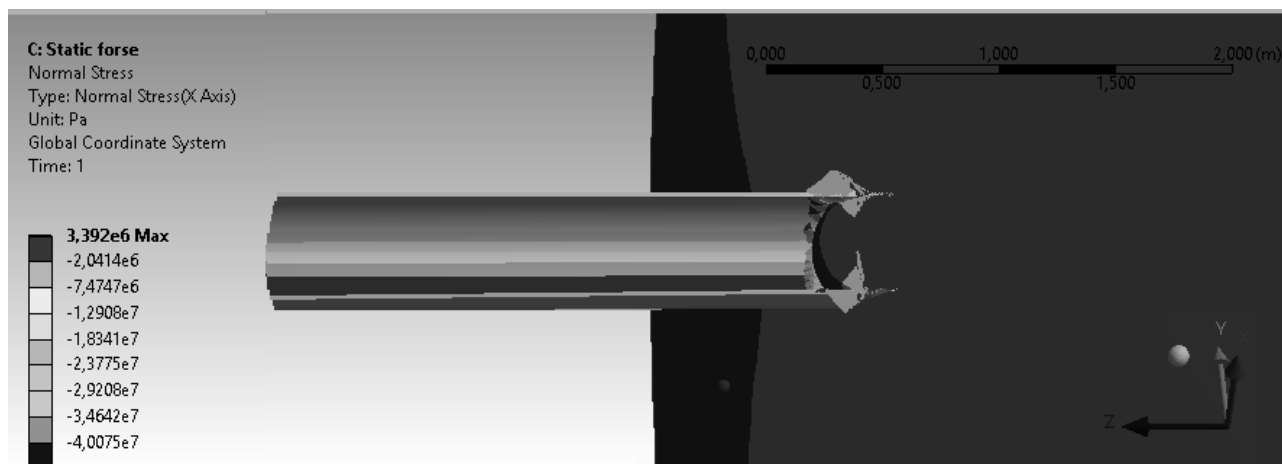


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений в грунтовом массиве при погружении трубы

Длина пробки зависит от физико-механических свойств грунта и параметров движения трубы. Для определения областей уплотнения грунта необходимо рассмотреть распределение плотности грунта вокруг трубы. Наивысшая степень уплотнения также наблюдается в области открытого торца трубы на расстоянии порядка ее диаметра (рис. 5), при этом на внешней поверхности трубы уплотнение грунта выражено незначительно.

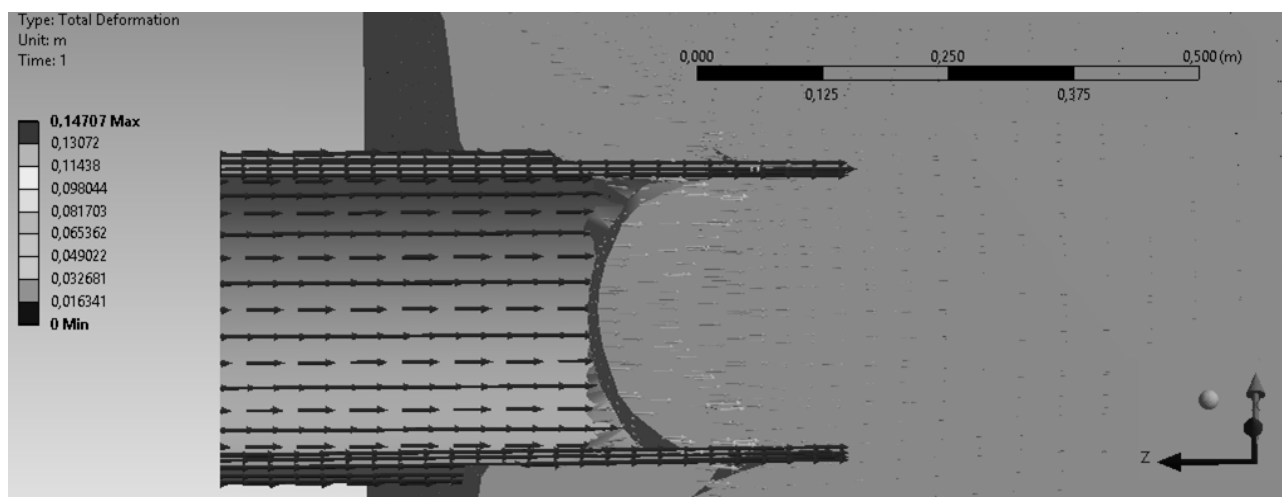


Рис. 5. Распределение векторов деформаций в грунтовом массиве при погружении трубы

Заключение

Для исследования поведения грунтовой пробки при погружении трубы открытым торцом в массив необходимо установить закономерности взаимодействия структур почвы во время движения трубы. Представленное здесь численное моделирование демонстрирует развитие напряжений и деформаций почвы вокруг трубы в процессе ее погружения.

Получена расчетная модель формирования грунтовой пробки при статическом нагружении. Неупругие или пластические перемещения возникают при напряжениях, больших, чем предел текучести. При разгрузке всегда будет иметь место и восстанавливаемая (упругая) деформация. Рассматриваемая система находится в многоосном напряженном состоянии, поэтому расчетная модель использует критерий текучести Мизеса для соотношения многоосного напряженного состояния со скалярными данными. Для повышения точности расчета в этой ситуации может быть использована истинная кривая деформирования грунта.

В дальнейших исследованиях основное внимание будет уделено численному моделированию процесса формирования грунтовой пробки при динамическом нагружении, а также влиянию вариации физико-механических свойств грунтового массива на параметры пробки. Для верификации численной модели и исследования поведения грунтовой пробки необходимо выполнение полевых испытаний в различных типах грунта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 17-77-20049.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смоляницкий Б. Н., Опарин В. Н., Денисова Е. В., Кондратенко А. С., Тищенко И. В., Смоленцев А. С., Хмелинин А. П., Конурин А. И. Современные технологии сооружения протяженных скважин в грунтовых массивах и технические средства контроля их траектории. – Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела им. Н. А. Чинакала. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. – 237 с.
2. Способ бестраншейной прокладки труб в грунте. Смоляницкий Б. Н., Данилов Б. Б., Кондратенко А. С. Патент на изобретение RUS 2516630 24.09.2012.
3. B. B. Danilov, A. S. Kondratenko, B. N. Smolyanitsky, A. S. Smolentsev, Improvement of Pipe Pushing Method / Journal of Mining Science // 2017, Vol. 53, No. 3, pp. 57–62.
4. S. Thongmune, S. Kobayashi, T. Matsumoto. Push-Up Load Tests Using Uncrushable Particles And Its Dem Analyses / Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA // Vol. 42. – No. 2. – June 2011.
5. C. Moormann, J. Labenski, J. Aschrafi Simulation of Soil Plug Effects in Open Steel Pipe Piles Considering the Complex Soil-Structure-Interaction During Installation / 40th Annual Conference on Deep Foundations // Oakland, California, USA. – 2015.
6. Stolarski, T. Engineering Analysis with ANSYS Software / T. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. – Butterworth-Heinemann, 2007. – 480 p.
7. Вебер В. А. Использование сред компьютерного моделирования для решения прикладных инженерных задач / Вебер В. А., Каширин В. С., Осинцев А. В., Суринов В. И. // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 2 (162). С. 45–52.

8. Moaveni S. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS / S. Moaveni. – Prentice Hall, 1999. – 527 p.
9. Balg C. Ground support applications / Balg C., Roduner A. Geobruigg A. G. // Int. Ground Support Conf. AGH University. – Lungern, Switzerland, 11-13 September, 2013.
10. Белов, Г. Использование программного комплекса ANSYS AUTODYN при расчете средств защиты на воздействие от взрыва и баллистического удара / Г. Белов. // ANSYS Advantage. Русская редакция. – 2009. – № 10.
11. Kelly B. Stress analysis for boreholes on department of defense lands in the western United States: A study in stress heterogeneity // Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. – Stanford University, Stanford, California, February 11–13. – 2013. – P. 139–150.
12. Madenci, E. The finite element method and applications in engineering using Ansys / E. Madenci, I. Guven. – Springer Science+Business Media, 2006. – 696 p.
13. Wu, Y. Vibration of Hydraulic Machinery / Y. Wu, S. Li, Liu S., H.-S. Dou. – Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013. – 500 p.
14. Тимонин В. В. Оценка процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин / Тимонин В. В., Карпов В. Н. // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 172–176.
15. Кондратенко А. С. Удаление грунтового керна из трубы с помощью комбинированного воздействия на систему «труба с керном в грунте» / Кондратенко А. С. // Механизация строительства. 2013. № 4 (826). С. 3–5.
16. Denisova E. V. Geomechanical model of the pneumatic borer and soil interaction / Denisova E. V., Konurin A. I. // Journal of Mining Science. 2013. Т. 49. № 5. С. 724–730.
17. Липин А. А. Расчет напряженно-деформированного состояния системы «шнек – грунт» с использованием пакета ANSYS / Липин А. А., Шапкин В. А., Вахидов У. Ш., Вишняков А. В., Стрижак А. Д. // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3 (71). – С. 14–15.
18. Вербицкий В. А. Моделирование системы «железобетонная свая – грунт» для исследования конструкции при ударном воздействии / Вербицкий В. А., Шиляева О. В. // Точная наука. – 2017. – № 9. – С. 24–27.
19. Липин А. А. Статический прочностной расчет системы «шнек – грунт» / Липин А. А., Стрижак А. Д. // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития материалы международной научно-практической конференции: в 2 ч. – Научный центр «Диспут», 2017. – С. 17–19.
20. Вагнер В. В. Аппроксимация зависимостей сопротивления грунта поперечным и продольным перемещениям подземной трубы / Вагнер В. В., Кушнир С. Я., Казакова Н. В. // Горные ведомости. 2009. № 2 (57). С. 48–50.
21. Górski K. Effort of steel pipe jacking in terms of imperfection pipes and heterogeneity of ground / Górski K., Ignatowicz R. L. // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 3 (63). – С. 171–180.

REFERENCES

1. Smolyanitskiy B. N., Oparin V. N., Denisova Ye. V., Kondratenko A. S., Tishchenko I. V., Smolentsev A. S., Khmelinin A. P., Konurin A. I. Modern technologies of obstruction in underground massifs and technical means of control of their trajectory [Sovremennyye tekhnologii zagrazhdeniya v podzemnykh massivakh i tekhnicheskikh sredstvakh kontrolya ikh trayektorii]. – Ros. akad. nauk, Sib. otd-niye, In-t gornogo dela im. N.A. Chinakala. – Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2016. – 237 s. [in Russian]

2. Method of trenchless laying of pipes in the ground [Sposob bestransheynoy prokladki trub v grunte]. Smolyanitskiy B.N., Danilov B.B., Kondratenko A.S. patent na izobreteniyе RUS 2516630 24.09.2012. [in Russian]
3. B. B. Danilov, A. S. Kondratenko, B. N. Smolyanitskiy, A. S. Smolentsev, Improvement of Pipe Pushing Method / Journal of Mining Science // 2017, Vol. 53, No. 3, pp. 57–62.
4. S. Thongmune, S. Kobayashi, T. Matsumoto. Push-Up Load Tests Using Uncrushable Particles And Its Dem Analyses / Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA // Vol 42 –No.2 – June 2011.
5. C. Moormann, J. Labenski, J. Aschrafi Simulation of Soil Plug Effects in Open Steel Pipe Piles Considering the Complex Soil-Structure-Interaction During Installation / 40th Annual Conference on Deep Foundations // Oakland, California, USA. – 2015.
6. Stolarski, T. Engineering Analysis with ANSYS Software / T. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. – Butterworth-Heinemann, 2007. – 480 p.
7. Veber V.A. Use of computer imitation environments for solving applied engineering problems. [Ispol'zovaniye srednego komp'yuternogo modelirovaniya dlya resheniya prikladnykh inzhenernykh zadach] / Veber V.A., Kashirin V.S., Osintsev A.V., Surin V.I. // Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve. 2016. № 2 (162). S. 45–52. [in Russian]
8. Moaveni S. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS / S. Moaveni. – Prentice Hall, 1999. – 527 p.
9. Balg C. Ground support applications /Balg C., Roduner A. Geobruigg A.G.// Int. Ground Support Conf. AGH University. – Lungern, Switzerland, 11–13 September, 2013.
10. Belov, G. Using the software complex ANSYS AUTODYN in calculating the means of protection for impact from an explosion and ballistic impact [Ispol'zovaniye programmnoy kompleksa ANSYS AUTODYN pri raschete sredstv zashchity na vozdeystviye ot vzryva i ballisticheskogo udara] / G. Belov. // ANSYS Advantage. Russkaya redaktsiya. – 2009. – № 10. [in Russian]
11. Kelly B. Stress analysis for boreholes on department of defense lands in the western United States: A study in stress heterogeneity // Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. – Stanford University, Stanford, California, February 11–13. – 2013. – P. 139–150.
12. Madenci, E. The finite element method and applications in engineering using Ansys / E. Madenci, I. Guven. – Springer Science+Business Media, 2006. – 696 p.
13. Wu, Y. Vibration of Hydraulic Machinery / Y. Wu, S. Li, Liu S., H.-S. Dou. – Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013. – 500 p.
14. Timonin V. V. Evaluation of the process of rock destruction during rotational drilling of wells [Otsenka protsessa razrusheniya gornyykh porod pri udarno-vrashchatel'nom burenii skvazhin] / Timonin V. V., Karpov V. N. // Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy gornyykh nauk. – 2016. – T. 2. – № 3. – S. 172–176. [in Russian]
15. Kondratenko A. S. Removal of ground core from the pipe by means of combined influence on the system "pipe with a core in the ground" [Udalenie gruntovogo kerna iz truby s pomoshch'yu kombinirovannogo vozdeystviya na sistemu «truba s kernom v grunte»] / Kondratenko A. S. // Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2013. № 4 (826). S. 3–5. [in Russian]
16. Denisova E. V. Geomechanical model of the pneumatic borer and soil interaction / Denisova E. V., Konurin A. I. // Journal of Mining Science. 2013. T. 49. № 5. C. 724–730.
17. Lipin A. A. Calculation of the stress-strain state of the "screw-soil" system using ANSYS package [Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistemy «shnek – grunt» s ispol'zovaniyem paketa ANSYS] / Lipin A. A., Shapkin V. A., Vakhidov U. S. H., Vishnyakov A. V., Strizhak A. D. // Vestnik IzhGTU im. M. T. Kalashnikova. 2016. № 3 (71). S. 14–15. [in Russian]
18. Verbitskiy V. A. Modeling of the system "reinforced concrete pile – ground" for structural research under shock action [Modelirovaniye sistemy «zhelezobetonnyaya svaya – grunt» dlya

issledovaniya konstruktsii pri udarnom vozdeystvii] / Verbitskiy V. A., Shilyayeva O. V. // *Tochnaya nauka*. 2017. № 9. S. 24–27. [in Russian]

19. Lipin A. A. Static strength calculation of the "screw-ground" system [Staticheskiy prochnostnoy raschet sistemy "shnek-grunt"] / Lipin A. A., Strizhak A. D. // V sbornike: *Nauka segodnya: global'nyye vyzovy i mekhanizmy razvitiya materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 chastyakh*. Nauchnyy tsentr «Disput». 2017. S. 17–19. [in Russian]

20. Vagner V. V. Approximation of the dependence of soil resistance to transverse and longitudinal displacements of a subterranean pipe [Approksimatsiya zavisimostey soprotivleniya grunta poperechnym i prodol'nym peremeshcheniyam podzemnoy truby] / Vagner V. V., Kushnir S.YA., Kazakova N. V. // *Gornyye vedomosti*. 2009. № 2 (57). S. 48–50. [in Russian]

21. Górski K. Effort of steel pipe jacking in terms of imperfection pipes and heterogeneity of ground / Górski K., Ignatowicz R. L. // *Nauka Ta Progres Transportu*. 2016. № 3 (63). C. 171–180.

© *A. И. Конурин, А. С. Кондратенко, 2018*

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЕОСРЕДЫ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД

Антон Игоревич Конурин

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

Сергей Алексеевич Неверов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, зав. лабораторией подземной разработки рудных месторождений, e-mail: nsa_nsk@mail.ru

Александр Алексеевич Неверов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, зав. лабораторией открытых горных работ, e-mail: nnn_aa@mail.ru

Целью работы является установление особенностей построения параметрических моделей геосреды для численного моделирования напряженного состояния массива пород, а также выявление ограничивающих факторов, оказывающих влияние на построение приближенных к действительности моделей. Рассмотрены примеры построения геометрических (твердотельных, каркасных) моделей массивов горных пород, предназначенные для численного геомеханического моделирования, с учетом горнотехнических ситуаций и применяемых геотехнологий на разрабатываемых месторождениях минерального сырья. Принятый подход к решению проблем геометрических построений при разработке трехмерных моделей горнотехнических конструкций, действующих и вводимых в эксплуатацию рудников, позволяет учесть разнообразные конструктивные нелинейности, дает возможность решить контактные задачи для различных поверхностей, обеспечивает интерактивную оптимизацию параметров и адаптивное перестроение конечной сетки. Выявлены основные ограничения и допущения при моделировании материализованного объекта, связанные с объемами затрачиваемых вычислительных ресурсов. Сформулированы положения для разработки геометрических моделей месторождений полезных ископаемых. Реализация обозначенных принципов параметрического моделирования обеспечивает возможность воссоздания предельной горнотехнической ситуации на месторождении и позволяет производить численные оценки устойчивости горных выработок в наихудших условиях с необходимым запасом прочности.

Ключевые слова: массив горных пород, глубина, геологическая структура, напряженное состояние, классификация геомеханических структур, методология, геотехнология, горное давление, устойчивость, безопасность.

CONSTRUCTING FEATURES OF THE PARAMETRIC MODEL OF GEO-ENVIRONMENT FOR NUMERICAL MODELING OF THE ROCK MASS STRESS STATE

Anton I. Konurin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, Physical-Technical Geotechnology Laboratory, e-mail: akonurin@yandex.ru

Sergey A. Neverov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Head of Laboratory of Underground Development of Ore Deposits, e-mail: nsa_nsk@mail.ru

Aleksander A. Neverov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Head, Surface Mining Laboratory, e-mail: nnn_aa@mail.ru

The aim of the work is to establish the constructing features of parametric models of the geo-environment for numerical modeling of the rock mass stress state. Also, the aim is to identify the limiting factors affecting the construction of models close to reality. Examples of the construction of rock mass geometric (solid, frame) models used for numerical geomechanical modeling are studied, taking into account mining conditions and applied geotechnologies in the developed mineral deposits. The adopted approach to the problems of geometric constructions employed in the development of three-dimensional models of mining structures, operating and put on production mines makes it possible to take into account various constructive nonlinearities. Moreover, it provides an opportunity to solve contact problems for various surfaces and ensures the interactive optimization of parameters and the adaptive reconstruction of the final network. The main limitations and assumptions in the modeling of a materialized object are identified. They are related to the volumes of expended computing resources. The conditions necessary for the development of geometric models of mineral deposits are formulated. Implementation of the indicated principles of parametric modeling provides the opportunity to recreate the limiting mining situation in the field and to numerically estimate the stability of mine openings in the worst conditions with the required margin of strength.

Key words: rock mass, depth, geological structure, stress state, classification of geomechanical structures, methodology, geotechnology, rock pressure, stability, safety.

Введение

В практике численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород при оценке устойчивости горных выработок, различного рода обнажений и рудо-породных целиков, зачастую прибегают к идеализированным геометрическим моделям. Ограничивающими факторами, оказывающими влияние на построение максимально приближенных к реальной действительности моделей, являются не только изометрическая сложность горно-геологического строения массива горных пород (морфология, угол падения, изменяющая мощность рудных тел, литология и слоистость вмещающих пород, тектонические нарушения), но пространственная ориентация выработок и геометрическая комбинационность существующих систем разработки и их элементов. Усиливает проблему более точного параметрического описания геологического строения и техногенной деятельности в массиве горных пород отсутствие в большинстве проектных, отраслевых и научно-исследовательских институтах мощных вычислительных ресурсов.

В основе большинства геомеханических решений, как правило, лежит обоснование конкретной горнотехнической ситуации без привязки (реже с частичным учетом) системы выработок и очистных пространств ранее отработанных участков месторождения, что относит их к частным случаям [1–2]. Следует добавить, что подобное решение задач, также применяется при прогнозных

оценках новых геотехнологий, требующих для их первоначальной реализации хотя бы предварительных результатов. Несомненно, учет всего комплекса горных выработок (разработок), оказывающих влияние на анализируемый район обеспечит получение более корректных результатов, соответствующих шахтным условиям. Однако в рамках всего месторождения, принимая во внимание его пространственные и временные параметры, а это в среднем размеры залежей (рудных зон) от первых до 5–10 километров и срок службы шахты (рудника) более 30 лет работы, требуется разработка очень сложной параметрической модели [3–5].

Раскрытие вышеописанной проблемы геометрического описания геологического строения геосреды с комплексом горных выработок для реализации численных расчетов НДС массива пород, потребовало развития исследований по разработке научных и инженерных приемов и подходов, которые учитывают максимальное количество факторов, оказывающих влияние на состояние горнотехнических конструкций и обеспечивающих приемлемые (на уровне допустимых погрешностей) результаты, коррелирующие с реальной действительностью имеющей место быть на месторождениях. Актуальность проблемы усиливается с ростом глубины горных работ и сложной техногенной деятельностью, связанной с добычей полезных ископаемых. Причем по упрощенным геометрическим моделям, эквивалентно описывающим ограниченные в пространстве горнотехнические ситуации, не совсем корректно проводит анализ и обобщение НДС и устойчивости массива горных пород.

Методы и материалы, результаты

Параметрическая модель геосреды представляет собой геометрические построения, имеющие формализованное описание с использованием геологоструктурных и техногенных элементов и параметров, и взаимосвязей между этими параметрами и элементами. С помощью параметризации можно за короткое время опробовать различные комбинации геометрического соотношения и изменения параметров геомеханической модели, внести необходимые корректировки и избежать дальнейших ошибок. Параметрическая модель включает геометрическую модель, таблицу размеров (параметров) и информацию о взаимосвязях размеров (параметров). Взаимосвязи могут иметь линейный, нелинейный и многофакторный характер. Основное преимущество параметризации в горном деле – эффективное решение многовариантных задач по выбору и обоснованию параметров геотехнологий, а также возможность использования ее в качестве одного из критериальных признаков для разработки рейтинговой классификации систем подземной добычи полезных ископаемых.

Численное 3D-моделирование позволяет осуществлять дифференцированный подход к дискретизации рабочих областей на конечные элементы (одним из основных назначением параметрического моделирования является разработка геолого-технологических моделей геосреды для математического моделирования НДС массива пород и оценки устойчивости конструктивных элементов

горных технологий), от формы и размеров которых зависит эффективность и точность геомеханических расчетов.

На современном этапе развития информационных технологий в сфере графической 3D-документации существует множество программных комплексов объемного моделирования. Среди распространенных программ выделяются AutoCAD, AutoDESK 3ds Max, Blender 3D, SketchUp, КОМПАС и др., а также графические редакторы, реализованные в вычислительных комплексах – Ansys, Nastran, Abaqus, Ls-dyna, Algor и др.

В горном деле при обосновании технологий (открытой, подземной) выемки минерального сырья наибольшее распространение получил программный комплекс AutoCAD и специализированные программы Datamine, Micromine, Minemax, Surpac и др.

Ниже приводятся примеры построения геометрических (твердотельных, каркасных) моделей массивов горных пород с учетом горнотехнических ситуаций и применяемых геотехнологий на разрабатываемых месторождения минерального сырья, предназначенных для численного геомеханического моделирования.

Основные этапы геометрических построений геосреды включают в себя разработку следующих моделей:

1. Геологической – учитывает морфологию рудных тел;
2. Породной – разрабатывается по данным литологического строения массива горных пород и, как правило, учитывает слоистость пород, их мощность и падение;
3. Структурной – описывает тектонические нарушения и блочное строение (выделяются геологические блоки различных иерархических уровней);
4. Техногенной – максимально воспроизводится существующая (проектируемая или варианты случаи) горнотехническая конструкция со всеми вскрывающими, подготовительными и очистными выработками на действующем руднике.

На рис. 1, 2 представлена горнотехническая ситуация имеющая место быть на Иртышском месторождении полиметаллических руд (Восточный Казахстан) [6–8].

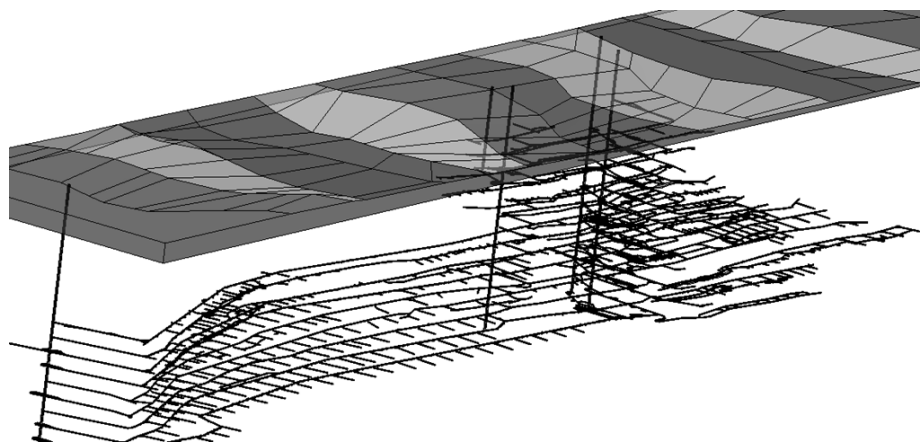


Рис. 1. Твердотельная модель Иртышского месторождения (система горных выработок)

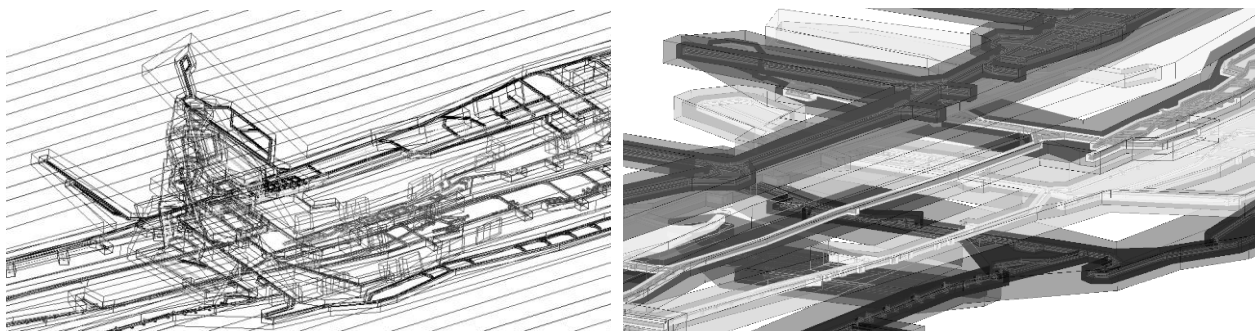


Рис. 2. Фрагменты участков месторождения при моделировании слоев горных пород с различными физико-механическими свойствами

На рис. 3 приведена 3D параметрическая модель Октябрьского месторождения в пределах шахты «Глубокая» ПАО «Норильский Никель» (в границах исследуемого объекта), разработанная путем геометрических построений на базе графической документации, представленной в виде геологических и горно-технических планов и разрезов [9–11].

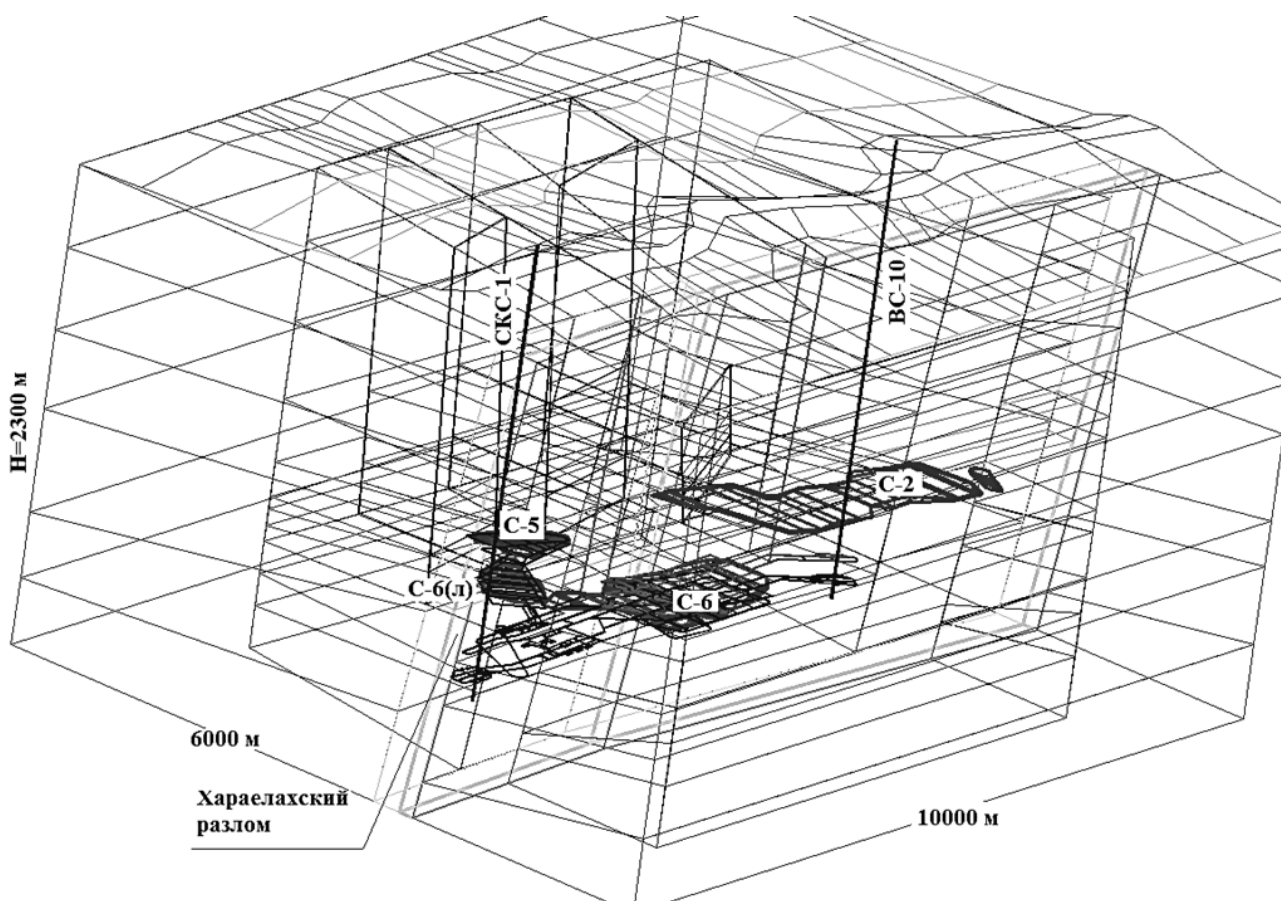


Рис. 3. Твёрдотельная модель Октябрьского месторождения в границах шахты «Глубокая» с учетом геолого-структурных особенностей и системы горных выработок, представленных откаточным, доставочным и вентиляционно-закладочным горизонтом

Для повышения надежности результатов исследований при геомеханической оценке разрабатываемого месторождения в геометрической модели необходимо предусматривать создание «слоев» (геологических объектов, воспроизводящих литологическое строение месторождения) горных пород с различными деформационными и прочностными свойствами (см. рис. 2–3). Наиболее близкие по физико-механическим и деформационно-прочностным свойствам горные породы (коэффициент корреляции между которыми составляет не менее 75 %), объединяются в единый геологический объект (домены), имеющий, как правило, жесткое сцепление с «телом» основной модели.

На рис. 4 представлены фрагменты параметрического моделирования соответственно технологии отработки предохранительного целика на алмазонной трубке «Мир» и сложившаяся горнотехническая ситуация с системой вскрывающих подготовительных, нарезных выработок и очистных работ на Орловском месторождении полиметаллических руд (Восточный Казахстан). Геометрическое описание представлено в виде твердотельных моделей, разработанных на первоначальных этапах породного и техногенного моделирования.

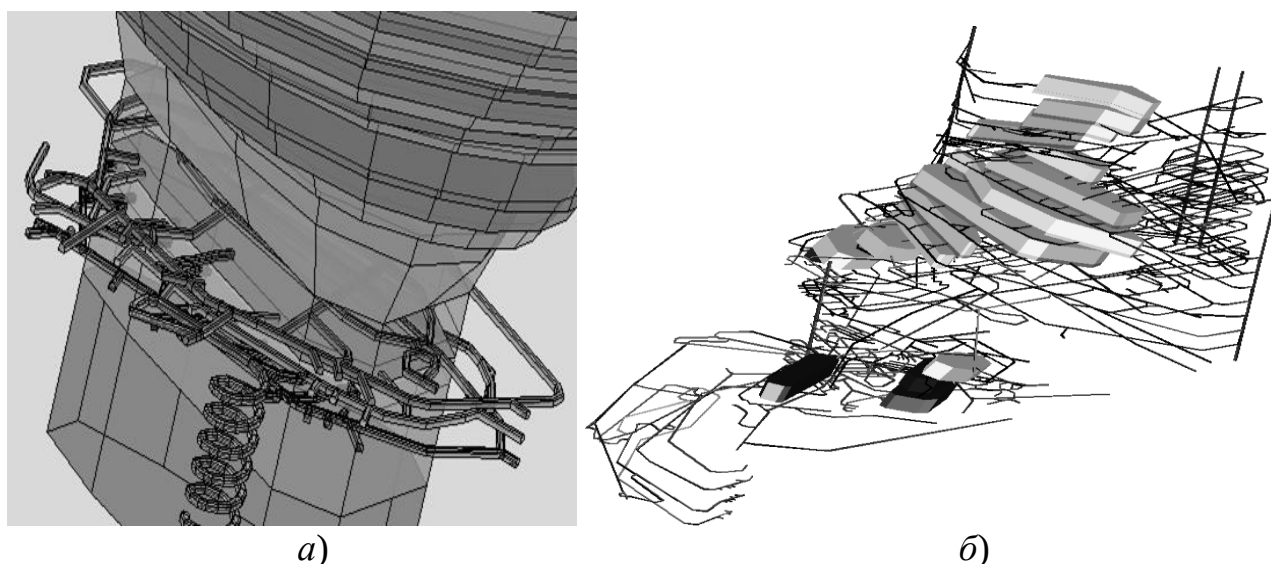


Рис. 4. Фрагменты параметрического моделирования:

- а) трассировка выработок в пределах предохранительного целика рудника «Мир»;
- б) система горных выработок и очистных пространств Орловского месторождения

На рис. 5 представлены элементы параметрического моделирования камерной системы разработки с поэтажной отбойкой и конструктивные параметры (геологические, техногенные), подвергающиеся варьированию для обоснования безопасности горных работ.

Разрывные нарушения (сместители) должны имитироваться сплошными (обширными) низкомодульными телами без разделения на слои. Последние, как правило, аппроксимируются (сглаживались) линиями по их контуру с отклонением не более 15 % от реальной их ориентации и длиной по границе контакта с крыльями (разрывами) не менее 5 м. Такое допущение обосновывается на основе предварительно выполненных тестовых задач по оптимизации затрачиваемых вычислительных ресурсов. Качество полученных результатов при последующем геомеханическом моделировании практически не снижается [18–20]. Коэффициент корреляции между точным геометрическим построением модели и принятыми ограничениями должен составлять не менее 85 %.

Реализация обозначенных принципов параметрического моделирования обеспечивает возможность воссоздания предельной горнотехнической ситуации на месторождении и позволяет произвести численные оценки устойчивости горных выработок в наихудших условиях с необходимым запасом прочности.

Заключение

Принятый подход к решению проблем геометрических построений при разработке трехмерных моделей горнотехнических конструкций, действующих и вводимых в эксплуатацию рудников, позволяет учесть разнообразные конструктивные нелинейности, дает возможность решить контактные задачи для различных поверхностей, обеспечивает интерактивную оптимизацию параметров и адаптивное перестроение конечной сетки (при оценке НДС массива горных пород численным моделированием с помощью метода конечных элементов).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-6827.2018.5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никольский А. М., Коваленко А. А., Тишков М. В., Неверов А. А., Неверов С. А. Технология подземной отработки подкарьерных запасов в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях : монография / отв. ред. В. И. Клишин. – Новосибирск: Наука, 2017. – 328 с.
2. Жирнов А. А., Шапошник Ю. Н., Никольский А. М., Неверов С. А. Геомеханическая оценка горнотехнической ситуации на Иртышском месторождении обоснование параметров систем разработки // Горный журнал. – 2018. – № 1. – С. 48–53.
3. 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.
4. 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.
5. Shaposhnik Yu. N., Konurin A. I., Neverov S. A., Neverov A. A., Shaposhnik S. N. Justification of mine working supports in terms of the rating classification of norwegian geotechnical institute // 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. 519–526.
6. Жирнов А. А., Абдрахманов С. У., Шапошник Ю. Н., Конурин А. И. Оценка устойчивости массива горных пород и выбор типа и параметров крепления выработок на Орловском полиметаллическом месторождении // Горный журнал. – 2018. – № 3. – С. 39–45.
7. Башков В. И., Христоробов Е. А., Еременко А. А., Филиппов В. Н., Конурин А. И. Обоснование параметров систем разработки слепых рудных тел в удароопасных условиях на железорудных месторождениях Горной Шории // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 3. – С. 18–31.
8. Шапошник Ю. Н., Неверов А. А., Неверов С. А., Никольский А. М. Оценка влияния накопившихся пустот на безопасность доработки Артемьевского месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 3. – С. 108–118.
9. Ордин А. А., Никольский А. М., Метельков А. А., Сивов М. О. Освоение камерно-столбовой системы разработки ниже границы горных ударов в условиях шахты «Денисовская» // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – Т. 1. – № 1. – С. 273–279.
10. Тапсиев А. П., Фрейдин А. М., Усков В. А., Анушенков А. Н., Филиппов П. А., Неверов А. А., Неверов С. А. Развитие ресурсосберегающих геотехнологий разработки мощных пологопадающих залежей полиметаллических руд в условиях Норильска // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 5. – С. 123–136.
11. Еременко А. А., Гахова Л. Н., Конурин А. И., Колтышев В. Н., Приб В. В., Узун Е. Е. Оценка геомеханического состояния массива горных пород при отработке двух сближенных рудных тел на шерегешевском месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 1. – С. 67–75.
12. Лушников В. Н., Сэнди М. П., Еременко В. А., Коваленко А. А., Иванов И. А. Методика определения зоны распространения повреждения породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования // Горный журнал. – 2013. – № 12. – С. 11–16.
13. Louchnikov V. N., Sandy M. P., Eremenko V. A. Ground support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs // Eurasian Mining. – 2014. – № 1. – P. 54–62.
14. Pantelidis L. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2009. – Vol. 46. – Iss. 2. – P. 315–325.
15. Eremenko V. A., Neguritsa D. L. Efficient and active monitoring of stresses and strains in rock masses // Eurasian Mining. – 2016. – № 1 (25). – P. 21–24.
16. Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada) // Solid Earth, 5 (2). – 2014. – P. 1123–1149.
17. Gunzburger Y., Magnenet V. Stress inversion and basement-cover stress transmission across weak layers in the Paris basin, France // Tectonophysics, 617. – 2014. – P. 44–57.
18. Hofmann H., Weides S., Babadagli T., Zimmermann G., Moeck I., Majorowicz J., Unsworth M. Potential for enhanced geothermal systems in Alberta, Canada // Energy, 69. – 2014. – P. 578–591.
19. Potvin Y., Giles G. The development of a new high-energy absorption mesh // Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series. – 2008. – P. 89–94.
20. Balg C., Roduner A. Geobrigg A.G. Ground support applications // Int. Ground Support Conf. AGH University. – Lungern, Switzerland, 11–13 September, 2013.

REFERENCES

1. Nikolsky A.M., Kovalenko A.A., Tishkov M.V., Neverov A.A., Neverov S.A. Technology of underground mining of underpasses in complex mining-geological and mining conditions [Tekhnologiya podzemnoy otrabotki podkar'yernykh zapasov v slozhnykh gorno-geologicheskikh i gornotekhnicheskikh usloviyakh] / Monograph, Editor V.I. Klishin. – Novosibirsk: Science, 2017. – 328 p.
2. Zhirnov A.A., Shaposhnik Yu.N., Nikolsky A.M., Neverov S.A. Geomechanical assessment of the mining situation in the Irtysh deposit, justification of the parameters of development systems [Geomekhanicheskaya otsenka gornotekhnicheskoy situatsii na Irtyshskom mestorozhdenii obosnovaniye parametrov sistem razrabotki] / Mining Journal, 2018, No. 1, p. 48–53.
3. Freydin A.M., Neverov S.A., Neverov A.A., Konurin A.I. Geomechanical estimation of geotechnologies of underground ore mining at the design decisions stage [Geomekhanicheskaya otsenka geotekhnologiy podzemnoy dobychi rud na stadii proyektnykh resheniy] // Mining Journal. – 2016. – No. 2. – P. 39–45.
4. 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.
5. Shaposhnik Yu. N., Konurin A. I., Neverov S. A., Neverov A. A., Shaposhnik S. N. Justification of mine working supports in terms of the rating classification of norwegian geotechnical institute // 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. 519–526.
6. Zhirnov A.A., Abdrakhmanov S.U., Shaposhnik Yu.N., Konurin A.I. Evaluation of the stability of the rock massif and the choice of the type and parameters of fixing the excavations at the Orel polymetallic deposit [Otsenka ustoychivosti massiva gornykh porod i izbor tipa i parametrov krepleniya vyrabotok na Orlovskom polimetallicheskom mestorozhdenii] // Mining Journal. – 2018. – No. 3. – P. 39–45.
7. Bashkov V.I., Khristolyubov E.A., Eremenko A.A., Filippov V.N., Konurin A.I. Substantiation of the parameters of systems for the development of blind ore bodies in shock-hazard conditions at the iron ore deposits of Gornaya Shoria [Obosnovaniye parametrov sistem razrabotki slepykh rudnykh tel v udaroopasnykh usloviyakh na zhelezorudnykh mestorozhdeniyakh Gornoy Shorii] // Mining information-analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2018. – No. 3. – P. 18–31.
8. Shaposhnik Yu.N., Neverov AA, Neverov SA, Nikolsky AM Evaluation of the influence of accumulated voids on the safety of completion of the Artemyevsky deposit [Otsenka vliyaniya nakopivshikhsya pustot na bezopasnost' dorabotki Artem'yevskogo mestorozhdeniya] // Physico-technical problems of mining. – 2017. – No. 3. – P. 108–118.
9. Ordin A.A., Nikolsky A.M., Metelkov A.A., Sivov M.O. The mastering of the chamber-pillar development system below the boundary of the mountain impacts in the conditions of the Denisovskaya mine [Osvoeniye kamerno-stolbovoy sistemy razrabotki nizhe granitsy gornykh udarov v usloviyakh shakhty «Denisovskaya»] // Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy gornykh nauk] // Fundamental and applied problems of mining sciences. – 2014. – T. 1. – No. 1. – P. 273–279.
10. Tapsiev A.P., Freydin A.M., Uskov V.A., Anushenkov A.N., Filippov P.A., Neverov A.A., Neverov S.A. Development of resource-saving geotechnologies for the development of powerful gently falling deposits of polymetallic ores in the conditions of Norilsk [Razvitiye resursosberegayushchikh geotekhnologiy razrabotki moshchnykh pologopadayushchikh zalezhey polimetallicheskikh rud v usloviyakh Noril'ska] // Physico-technical problems of mining. – 2014. – No. 5. – P. 123–136.

11. Eremenko A.A., Gakhova L.N., Konurin A.I., Koltyshev V.N., Prib V.V., Uzun E.E. Evaluation of the geomechanical state of the rock massif while working out two closely related ore bodies at the Sheregeshevsky deposit [Otsenka geomekhanicheskogo sostoyaniya massiva gornyykh porod pri otrabotke dvukh sblizhennykh rudnykh tel na sheregeshevskom mestorozhdenii] // Mining information-analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2018. – No. 1. – P. 67–75.
12. Lushnikov V.N., Sandy M.P., Eremenko V.A., Kovalenko A.A., Ivanov I.A. Method for determining the zone of propagation of damage to a rock mass around mine workings and chambers using numerical simulation // Mining Journal. – 2013. – No. 12. – P. 11–16.
13. Louchnikov V.N., Sandy M.P., Eremenko V.A. Ground support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs [Metodika opredeleniya zony rasprostraneniya povrezhdeniya porodnogo massiva vokrug gornyykh vyrabotok i kamer s pomoshch'yu chislennogo modelirovaniya] // Eurasian Mining. – 2014. – № 1. – P. 54–62.
14. Pantelidis L. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2009. – Vol. 46. – Iss. 2. – P. 315–325.
15. Eremenko V.A., Neguritsa D.L. Efficient and active monitoring of stresses and strains in rock masses // Eurasian Mining. – 2016. – № 1 (25). – P. 21–24.
16. Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada) // Solid Earth, 5 (2). – 2014. – pp. 1123–1149.
17. Gunzburger Y., Magnenet V. Stress inversion and basement-cover stress transmission across weak layers in the Paris basin, France // Tectonophysics, 617. – 2014. – pp. 44–57.
18. Hofmann H., Weides S., Babadagli T., Zimmermann G., Moeck I., Majorowicz J., Unsworth M. Potential for enhanced geothermal systems in Alberta, Canada // Energy, 69. – 2014. – pp. 578–591.
19. Potvin Y., Giles G. The development of a new high-energy absorption mesh // Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series. – 2008. – pp. 89–94.
20. Balg C., Roduner A. Geobrigg A.G. Ground support applications // Int. Ground Support Conf. AGH University. – Lungern, Switzerland, 11–13 September, 2013.

© А. И. Конурин, С. А. Неверов, А. А. Неверов, 2018

К ВОПРОСУ ПРОЧНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК С ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРОЙ СЕРДЕЧНИКА ДЛЯ ОСЕВЫХ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Александр Михайлович Красюк

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, профессор кафедры прочности летательных аппаратов, тел. (383)205-30-30, доп. 182, e-mail: am.krasuk@gmail.com

Евгений Юрьевич Русский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доцент кафедры автономных информационных и управляющих систем, тел. (383)205-30-30, доп. 339, e-mail: geomining@mail.ru

Предложен способ снижения центробежных сил от лопаток рабочего колеса осевого вентилятора путем выполнения ее сердечника в виде древовидной структуры. Приведены результаты исследования напряжений на примере лопатки рабочего колеса вентилятора с диаметром рабочего колеса 4 м. Исследования показали, что можно существенно снизить массу лопатки, до 1,8 раза, без потери ее прочности. Это позволяет увеличить скорость вращения рабочего колеса и повысить производительность вентилятора в 1,4 раза не увеличивая габариты машины. Показано, что максимальные напряжения в сердечнике древовидной структуры и пластинах, образующих поверхность лопатки, примерно одинаковы при углах установки лопаток в диапазоне 25–35°. Но на углах 120–135° напряжения на поверхности значительно возрастают. Поэтому лопатки с предложенной структурой сердечника следует применять в вентиляторах, в которых режим работы регулируется изменением частоты вращения. И не следует использовать такие лопатки в вентиляторах, регулируемых и реверсируемых путем поворота лопаток рабочего колеса.

Ключевые слова: осевой вентилятор, рабочая лопатка, напряжения, прочность, ячеистая структура, сердечник лопатки.

ON STRENGTH OF ROTATING BLADES WITH CELL STRUCTURE CORE FOR AXIAL MINE FANS

Aleksander M. Krasnyuk

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Professor, Aircrafts and Aircraft Engines Technical Maintenance Chair, phone: (383)205-30-30, extension 182, e-mail: am.krasuk@gmail.com

Evgeny Yu. Russky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Senior Researcher; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Associate Professor, Information Control Systems & Technologies Chair, phone: (383)205-30-30, extension 339, e-mail: geomining@mail.ru

A method for reducing centrifugal forces from the rotating blades of an axial fan is proposed. It includes designing the blade core in the form of a tree-like structure. The results of stress analysis performed on the blade of the fan impeller which diameter is equal to 4m are presented. The analysis has shown that the blade's weight can be significantly reduced to 1,8 times without its strength loss. Therefore, it is possible to increase the rotation velocity of the impeller and increase the fan's capacity by 1,4 times without the increase of its dimensions. It is shown that the maximum stresses in the tree-structure core and the plates forming the blade surface are approximately the same for the angles of the blades installation of the blades varying 25–35°. But at the angles 120–135°, the stresses on the surface increase significantly. Therefore, the blades with the proposed core structure should be used in fans in which the operating mode is controlled by changes of the rotational velocity. One shouldn't use such blades in fans that are adjustable and reversible by rotation of the fan blades.

Key words: axial fan, rotating blade, stresses, durability, cell structure, blade core.

Введение

За последние 30 лет в шахтном вентиляторостроении произошёл ряд существенных изменений. Были разработаны новые аэродинамические схемы, обеспечивающие создание высоконагруженных осевых вентиляторов главного проветривания (ВГП), на основе которых созданы одноступенчатые машины с аэродинамическими параметрами, доступными ранее только в двухступенчатом исполнении. Это обусловлено значительным прогрессом в области вычислительной техники [1, 2] и программных алгоритмов, дающих возможность математического моделирования, расчета и исследования влияния различных параметров проточной части вентилятора на аэродинамические и прочностные характеристики вентиляторной установки [3].

В основном это достигнуто за счет увеличения скорости вращения рабочих колес (РК). Например, если у вентиляторов серии ВОД окружная скорость по концам лопаток была 78 м/с, то у современных машин она достигает 150–160 м/с [4, 5]. Значительное повышение скоростей увеличивает нагрузки на узлы машин и предъявляет повышенные требования к их прочности и в первую очередь к лопаткам рабочего колеса (РК).

На лопатку колеса, кроме аэродинамической нагрузки, действует нормальная составляющая силы инерции. Она является основной нагрузкой, и определяет напряжения в узлах РК. Нормальная сила инерции лопаток (центробежная сила), определяемая как

$$F_{\text{и}} = \sum m_i \cdot r_i \cdot \omega^2 ,$$

где m_i – масса i -го элемента лопатки, r_i – расстояние от оси вращения до центра масс i -го элемента лопатки, ω – угловая скорость вращения рабочего колеса.

С достаточной степенью точности эту силу можно записать как $F = m\omega^2 R$, где m – масса лопатки, R – расстояние от оси вращения РК до центра масс лопатки РК. Один из путей снижения силы инерции – уменьшение ее массы. Снижение массы за счет уменьшения плотности материала, т. е. изготовление лопаток из легких алюминиевых сплавов, себя исчерпал.

Методы

Авторами предложен путь снижения массы лопасти за счет выполнения ее сердечника в виде ячеистой структуры: сотовой или древесной [6]. Исследования напряжений в лопатках, проведенных для шахтных вентиляторов главного проветривания с диаметром РК 2,4–4,0 м, показали перспективность применения древесной структуры сердечника. При варианте, когда «ветви» сердечника направлены вдоль линий действия центробежной силы, дают наилучший результат: масса лопасти стремится к минимальным значениям. Но следует учитывать технологические особенности литейного производства лопаток. Они накладывают свои ограничения. С учетом этих ограничений были рассмотрены несколько вариантов конструкций лопаток с древесным сердечником. В настоящей статье приведены результаты исследований одного из вариантов, рекомендованных к использованию в шахтных вентиляторах (рис. 1).

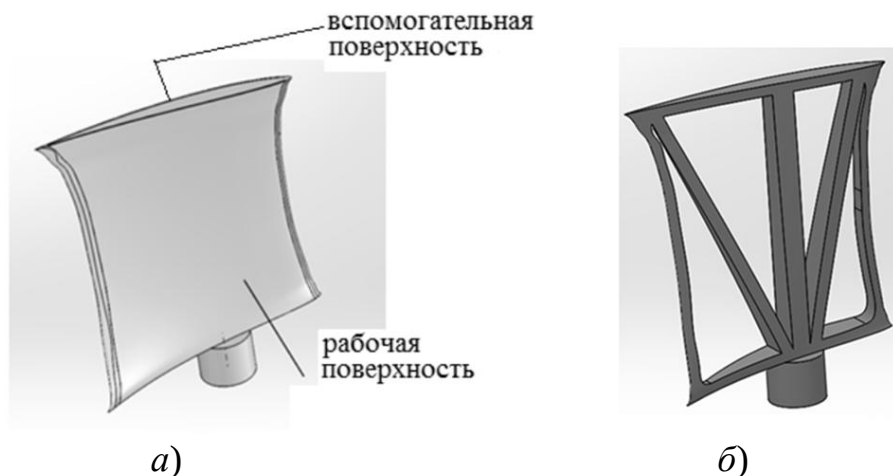


Рис. 1. Лопатка рабочего колеса:
а) общий вид; б) сердечник

Лопатка состоит из сердечника, на котором закрепляются пластины, образующие рабочую и вспомогательную поверхность лопасти. Крепление может быть выполнено, например, посредством сварки. Масса такой лопасти для вентилятора с диаметром рабочего колеса 4,0 м составляет 45 кг, что на 38,9 кг меньше, чем у цельно литой лопасти, т. е. в 1,86 раза. При этом ее прочность не снижается. Определим при какой угловой скорости вращения ротора нормальная сила инерции лопасти с древесным сердечником будет одинакова с цельнолитой лопастью:

$$F = m\omega^2 R = (m/1,86) \omega_1^2 R,$$

где ω_1 – скорость ротора с лопатками, имеющими древесный сердечник. Или $1,86 = (\omega_1/\omega)^{0,5}$. Отсюда получаем, что $\omega_1 = 1,36 \omega^2$. Следовательно, у вентиля-

тора с такими лопатками можно повысить скорость вращения в 1,36 раза. Это позволит во столько же раз повысить производительность вентилятора без увеличения его типоразмера.

На рис. 2 показана область максимальных напряжений при номинальной скорости вращения ротора вентилятора и приведены их значения.



Рис. 2. Область максимальных напряжений в сердечнике лопатки с древовидной структурой

Исследования проводились методом конечных элементов в программном пакете ANSYS. Использовались объемные конечные элементы, имеющие форму тетраэдра, с десятью узлами по три степени свободы в узле [7, 8].

На рис. 3 и 4 приведены некоторые результаты исследования напряжений в сердечнике и пластинах в зависимости от скорости вращения РК и угла установки лопаток.

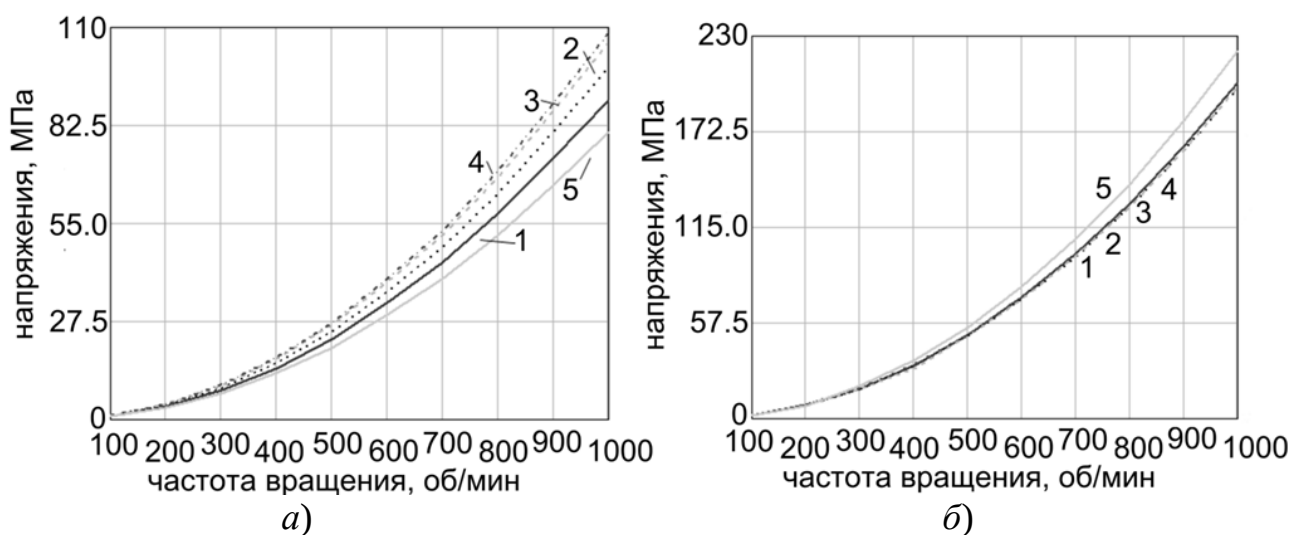


Рис. 3. Зависимость максимальных напряжений от частоты вращения и угла установки лопатки:

а) в сердечнике древовидной структурой; б) в цельнолитой лопатке

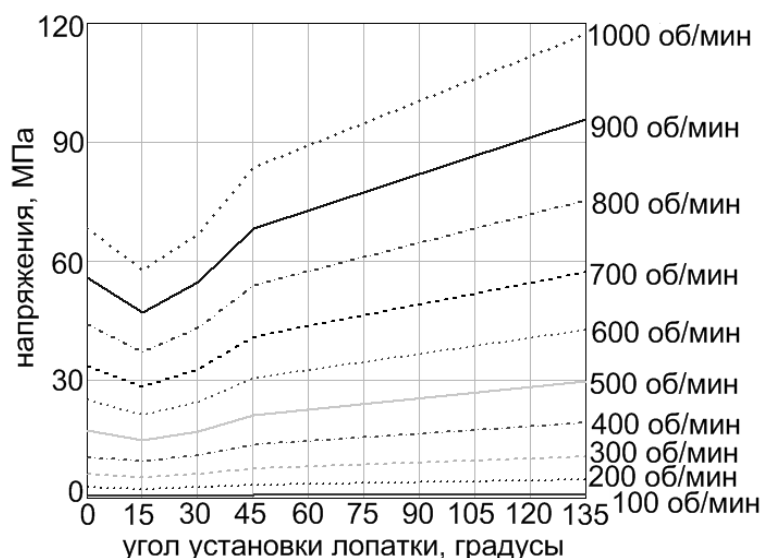


Рис. 4. Зависимость напряжений от частоты вращения и угла установки лопатки:

1–5 – углы установки лопатки 0, 15, 30, 45, 135°

Результаты

Анализ графиков показывает, что максимальные напряжения в цельнолитой лопатке примерно в 1,8 раза выше, чем в лопатке с древовидным сердечником. Напряжения в пластинах рабочей и вспомогательной поверхностях существенно зависят от угла установки лопаток РК. Если режим работы вентилятора регулируется изменением частоты вращения ротора, лопатки РК устанавливаются на расчетный угол, при котором КПД принимает максимальные значения.

Известно, что при изменении частоты вращения, КПД вентилятора не изменяется. На практике расчетный угол находится в диапазоне 25° – 35°. Сравнивая графики на рис. 3, а и рис. 4, видно, что напряжения, например при частоте вращения 700 об/мин, в сердечнике и пластинах близки. Если режим вентилятора регулируется и реверсируется путем поворота лопаток РК, диапазон углов установки изменяется в широких пределах. Но рис. 4 видно, что при углах 120° – 135° напряжения в пластинах почти в 2 раза выше, чем в сердечнике. Следовательно, лопатки с древовидной структурой сердечника не следует применять в вентиляторах, у которых режим работы регулируется путем изменения угла установки лопаток РК.

Заключение

Сравнительный анализ параметров НДС лопаток с рассмотренными сердечниками ячеистой структуры показал, что меньшую массу имеют лопатки с древовидной структурой сердечника. Выполнение сердечника лопатки рабочего

колеса осевого вентилятора главного проветривания в виде древовидной ячеистой структуры дает возможность увеличить скорость вращения ротора в 1,8 раза по сравнению с цельно литой лопаткой, не нарушая условий прочности лопатки. Это позволяет повысить производительность вентилятора в 1,36 раза без увеличения его типоразмера.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117091320027-5.

The work was carried out within the FNI project, state registration number is АААА-А17-117091320027-5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров Н. Н., Попов Н. А., Русский Е. Ю. Разработка научных основ и освоение производства нового ряда осевых вентиляторов // ФТПРПИ. – 2007. – № 5.
2. Kutler P. A perspective of theoretical and applied computational fluid dynamics // AIAA Paper. 1983. N0037.
3. Батурин О. В., Матвеев В. Н., Шаблий Л. С., Попов Г. М., Колмакова Д. А. Исследование рабочего процесса в ступени осевого компрессора с помощью универсального программного комплекса ANSYS CFX. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011.
4. Krasnyuk A. M., Lugin I. V. Research of dynamics of air streams in the subway from the revolting action of trains // FTPI. – 2007. – № 6.
5. Paul A. Durbin, Gorazd Medic. Fluid Dynamics with a Computational Perspective / Cambridge University Press. ISBN: 052185017, 2007.
6. Красюк А. М., Русский Е. Ю., Кутаев В. И., Горшков И. В. Разработка и исследование прочности рабочих лопаток с сотовой структурой сердечника для осевых шахтных вентиляторов // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 1. – С. 3–6.
7. Krasnyuk A.M., Russky E.Y., Popov N.A. Estimating strength of high-loaded impellers of large-size mine axial fans // Journal of Mining Science, 2012, Volume 48, Issue 2, pp 314-321. DOI 10.1134/S1062739148020128.
8. Russky E. Y., Lugin I. V., Krasnyuk A. M., Popov N. A. Engineering and analysis of aerodynamics and design parameters for metro tunnel fans with the same blade for different hub/tip diameter ratios // Proceedings – 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. – P. 594–598.

REFERENCES

1. Petrov N.N., Popov N.A., Russky E.Y. Development of scientific foundations and mastering the production of a new range of axial fans // FTPI. – 2007. – № 5.
2. Kutler P. A perspective of theoretical and applied computational fluid dynamics//AIAA Paper. 1983. N0037.
3. Baturin O. V., Matveev V. N., Shabliy L. S., Popov G. M., Kolmakova D. A. Study of the working process in the stage of the axial compressor using the universal software complex ANSYS CFX. – Samara. – 2011.
4. Krasnyuk A. M., Lugin I. V. Research of dynamics of air streams in the subway from the revolting action of trains // FTPI. – 2007. – № 6.
5. Paul A. Durbin, Gorazd Medic. Fluid Dynamics with a Computational Perspective / Cambridge University Press. ISBN: 052185017, 2007.

6. A.M. Krasnyuk, E.Y. Russky, Kutaev V. I., Gorshkov I. V. Development and investigation of the blades strength with honeycomb core structure for axial shaft fans // Mining equipment and electromechanics. – 2017. – № 1. – P. 3–6.

7. A.M. Krasnyuk, E.Y. Russky, N.A. Popov. Estimating strength of high-loaded impellers of large-size mine axial fans // Journal of Mining Science, 2012, Volume 48, Issue 2, pp 314-321. DOI 10.1134/S1062739148020128.

8. Russky, E.Y., Lugin, I.V., Krasnyuk, A.M., Popov, N.A. Engineering and analysis of aerodynamics and design parameters for metro tunnel fans with the same blade for different hub/tip diameter ratios // Proceedings – 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. – P. 594–598.

© *A. M. Красюк, Е. Ю. Русский, 2018*

АППАРАТУРА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИХ МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Лариса Алексеевна Назарова

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, 111020, г. Москва, Крюковский тупик, 4, доктор физико-математических наук, руководитель проекта, тел. (499)230-25-93, e-mail: lanazarova@ngs.ru

Петр Владимирович Николенко

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, 111020, г. Москва, Крюковский тупик, 4, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (499)230-25-93, e-mail: petrov-87@mail.ru

Владимир Лазаревич Шкуратник

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, 111020, г. Москва, Крюковский тупик, 4, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (499)230-25-93, e-mail: ftkp@mail.ru

Обосновываются базовые требования к аппаратуре для ультразвуковой реконструктивной томографии образцов горных пород в условиях их одноосного механического нагружения. Отмечается, что для исключения влияния релаксационных процессов в образце необходимо минимизировать время измерений на каждой ступени нагружения. Представлены структурная схема и технические характеристики указанной аппаратуры, дано описание ее работы. Отмечаются особенности построения отдельных элементов аппаратуры, необходимость использования пьезопреобразователей с круговой диаграммой направленности. Приведены принципиальная электрическая схема генератора возбуждающих импульсов и временные диаграммы сигналов, иллюстрирующие его работу. Показано, что использование возбуждающих импульсов специальной формы обеспечивает получение электрических импульсов на выходе приемного пьезоэлектрического преобразователя длительностью, не превышающей половины периода принятого ультразвукового сигнала. Дано описание оригинального алгоритма цифровой обработки этого сигнала, обеспечивающей автоматическое с высокой точностью определение времени его распространения по акустическим трактам каждого из измерительных каналов. Аппаратура позволяет на основе многоканальных время-импульсных ультразвуковых измерений и томографической обработки их результатов выявлять структурные неоднородности в образцах, изучать их пространственное распределение и динамику на различных стадиях деформирования.

Ключевые слова: образцы горных пород, механическое нагружение, ультразвуковая томография, акустический тракт, скорость, стадии деформирования, алгоритм цифровой обработки.

EQUIPMENT FOR ULTRASONIC TOMOGRAPHY OF ROCK SAMPLES UNDER MECHANICAL LOADING

Larisa A. Nazarova

Melnikov Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 4, Kryukovsky Tupik, Moscow, 111020, Russia, D. Sc., Head of Project, phone: (499)230-25-93, e-mail: lanazarova@ngs.ru

Peter V. Nikolenko

Melnikov Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 4, Kryukovsky Tupik, Moscow, 111020, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (499)230-25-93, e-mail: petrov-87@mail.ru

Vladimir L. Shkuratnik

Melnikov Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 4, Kryukovsky Tupik, Moscow, 111020, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (499)230-25-93, e-mail: ftkp@mail.ru

Basic requirements to the equipment for ultrasonic reconstructive tomography of rock samples under the conditions of their uniaxial mechanical loading are justified. It is noted that in order to exclude the influence of relaxation processes in the sample, it is necessary to minimize the measurement time at each loading stage. The structural diagram and technical characteristics of the specified equipment are presented; the description of its work is given. The features of the construction of individual elements of equipment, and the need for the use of piezoelectric converters with a circular pattern are noted. The principal electrical circuit of the generator of excitation pulses and time diagrams of signals illustrating its operation are given. It is shown that the use of excitation pulses of a special shape provides the generation of electrical pulses at the output of a receiving piezoelectric converter of a duration not exceeding half the period of the received ultrasonic signal. A description of the original algorithm for digital processing of the signal is presented. The processing provides an automatic determination of the signal propagation time along the acoustic paths of each of measuring channels. The equipment makes it possible to detect structural inhomogeneities in samples based on multichannel time-pulse ultrasonic measurements and tomographic processing of their results and to study their spatial distribution and dynamics at various deformation stages of deformation.

Key words: rock samples, mechanical loading, ultrasonic tomography, acoustic path, velocity, deformation stages, algorithm of digital processing.

Введение

Ультразвуковые (УЗ) исследования на образцах широко используются для определения и оценки акустических, упругих, прочностных и других свойств горных пород, а также их динамики под влиянием различных внешних воздействий [1–9]. Кроме того такие исследования, рассматриваемые как модельные, позволяют установить закономерности, необходимые для интерпретации результатов акустического контроля, осуществляемого непосредственно в массиве [10–19]. Однако традиционное УЗ прозвучивание позволяет получать только интегральные характеристики подвергаемых механическому нагружению образцов, а для достижения пространственного разрешения необходим переход к многоканальным томографическим измерениям [20–23], аппаратное обеспечение которых рассматривается в настоящей работе.

Принципы построения и работы аппаратуры

Структурная схема аппаратуры представлена на рис. 1, а временные диаграммы сигналов, иллюстрирующие работу генератора возбуждающих импуль-

сов, на рис. 2. Аппаратура реализует последовательный опрос каждого из приемных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) $\Pi_1 - \Pi_6$ при излучении УЗ сигнала каждым из излучающих ПЭП $\text{И}_1 - \text{И}_6$.

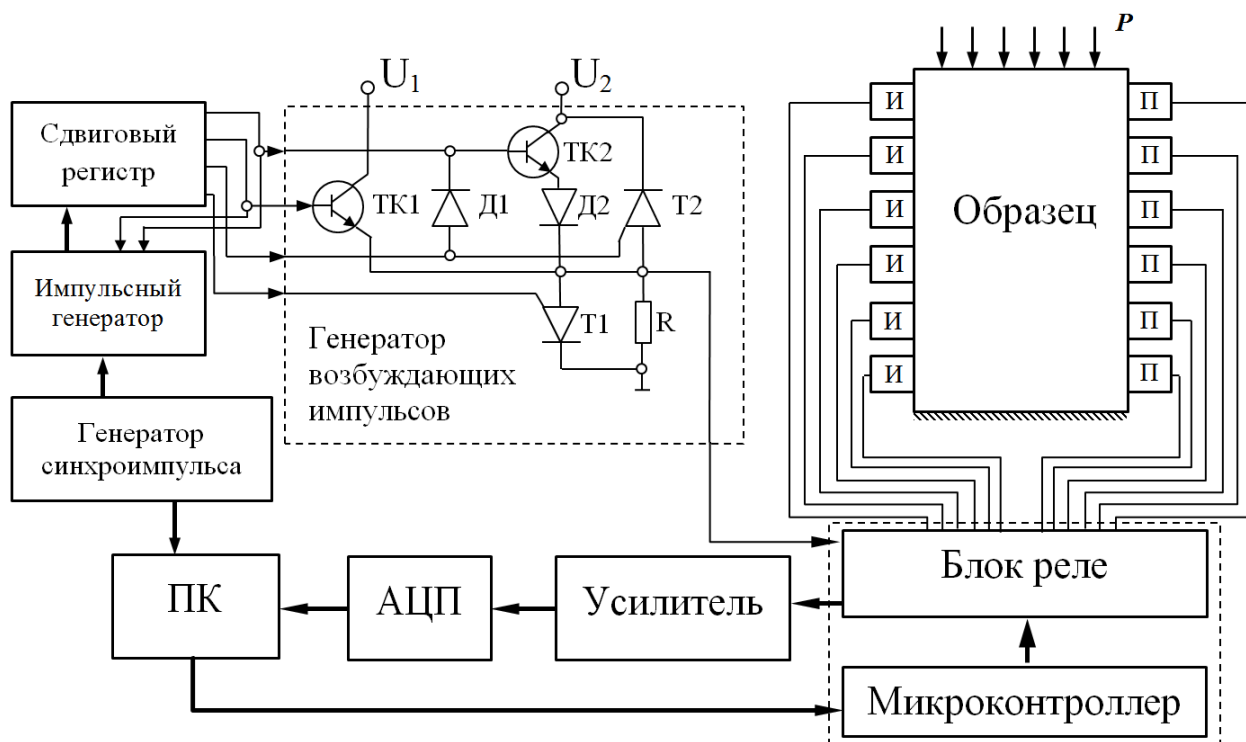


Рис. 1. Структурная схема аппаратуры для реализации томографических исследований на образцах горных пород

Построение генератора возбуждающих импульсов (ГВИ) обеспечивает получение на выходах приемных ПЭП коротких электрических импульсов длительностью τ , не превышающей половину периода T излученного УЗ сигнала. Это позволяет максимально быстро осуществлять опрос приемных ПЭП за время $\Delta t \ll \Delta t_p$, где Δt_p – время релаксации напряжений на каждой ступени нагружения образца. Кроме того, присутствие на выходе приемного ПЭП только первого полупериода исключает возможность возникновения ошибки измерения скорости распространения УЗ сигнала, связанной с отсчетом времени его прихода по второму или третьему полупериоду, амплитуды которых существенно превышают амплитуду первой полуволны. При этом следует учитывать, что традиционные методы излучения и приема коротких УЗ импульсов обычно связаны с использованием различных способов повышения широкополосности преобразователей [24]. Однако реализация этих способов всегда сопровождается потерей абсолютной чувствительности электроакустического тракта аппаратуры, что, учитывая высокое частотнозависимое затухание ультразвука в горных породах, недопустимо.

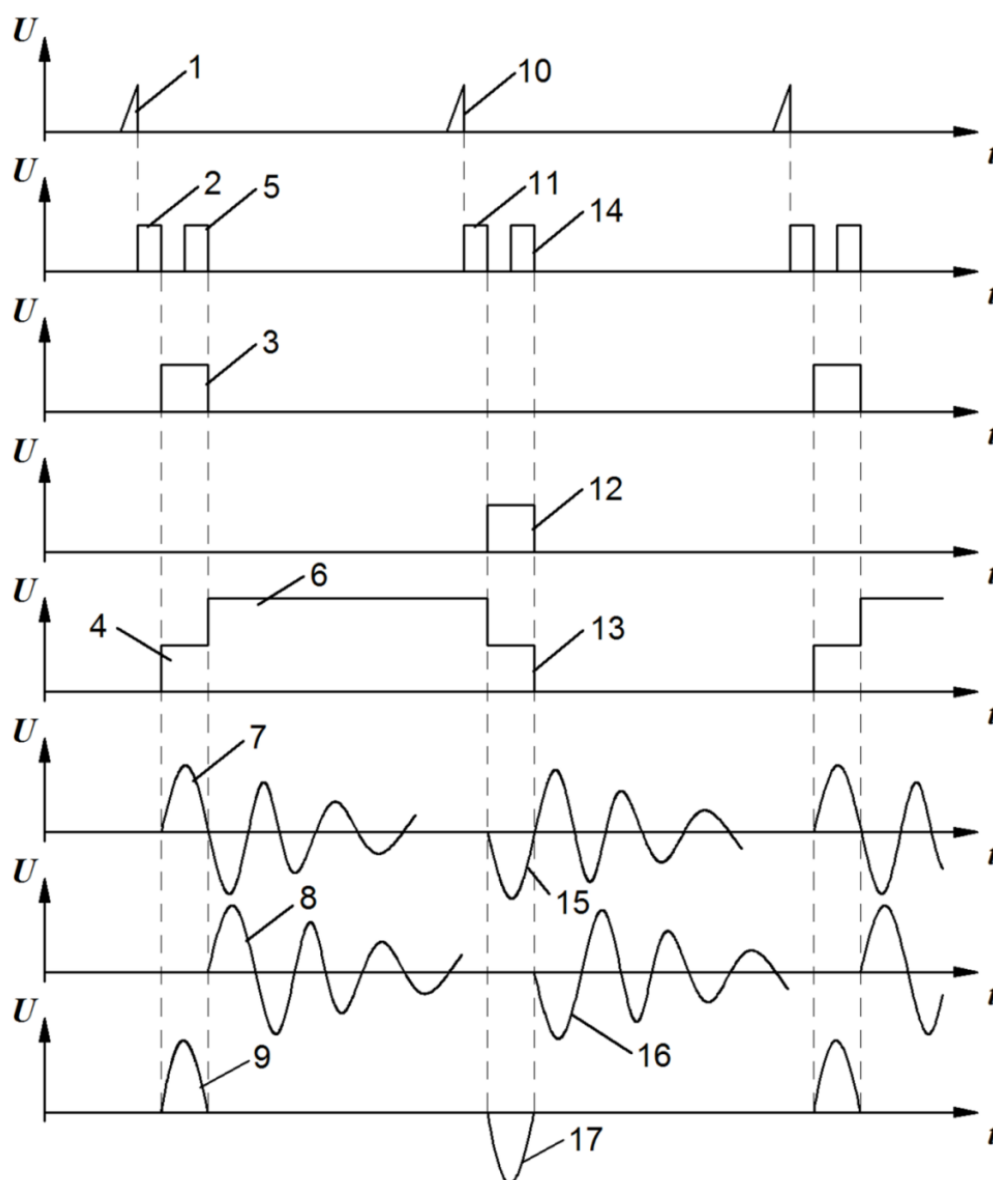


Рис. 2. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу генератора возбуждающих импульсов

Аппаратура работает следующим образом. Импульс 1 генератора синхроимпульсов (ГС) запускает импульсный генератор (ИГ), на выходе которого формируется импульс 2, поступающий на вход сдвигового регистра (СР). При этом на выходе последнего, подключенном к базе второго транзисторного ключа (ТК2) генератора возбуждающих импульсов (ГВИ) и управляющему входу ИГ, появится напряжение 3. Это положительное напряжение откроет ТК2. В результате напряжение источника питания U_1 через защитный диод Д2 поступит на сопротивление нагрузки R и далее через блок реле (БР) на первый излучающий ПЭП (П1), напряжение которого скачком возрастет до уровня 4.

В ИГ имеется времязадающая цепочка, постоянная времени τ которой равна половине периода T собственных колебаний излучающего ПЭП ($\tau = T/2$).

Именно на эту цепочку поступает напряжение 3. В результате через время τ с выхода ИГ на вход СР поступит импульс 5 и в СР произойдет единичный сдвиг информации. Как следствие, на входе ТК2 напряжение станет равным нулю, а на выходе СР, соединенном с базой транзисторного ключа ТК1, – равным напряжению логической единицы. При этом ТК2 закроется, а ТК1 откроется, напряжение на подключенном с помощью БР излучающем ПЭП скачком изменится до уровня 6, пропорционального напряжению источника питания $U_2 = 2U_1$. При этом защитный диод Д2 предотвратит пробой ТК2.

При поступлении первой ступени 4 двухступенчатого напряжения с ГВИ на излучающий ПЭП последний излучает акустический импульс длительностью τ , а при поступлении на излучающий ПЭП второй ступени 6 двухступенчатого напряжения – акустический импульс такой же длительности и полярности. В приемном ПЭП пришедший на него сложный акустический сигнал возбуждает экспоненциально затухающие синусоидальные колебания 7 и 8, сдвинутые относительно друг-друга на время τ . Взаимная компенсация этих колебаний приведет к возникновению на выходе приемного ПЭП электрического импульса 9 длительностью τ , соответствующей первой полуволне принятого сигнала.

Отметим, что на рис. 2 условно не показан сдвиг во времени принятых колебаний 7, 8, 9 относительно излученных, обусловленный прохождением УЗ сигнала исследуемой базы образца между излучающим и соответствующим приемным ПЭП. С приходом следующего импульса синхронизации 10 на вход ИГ, на его выходе формируется импульс 11. Под его воздействием на выходе СР, соединенном с управляющим электродом тиристора Т2 и через диод Д1 с базой ТК2, появится напряжение логической единицы 12. В результате закроется ТК1 и откроется ТК2 и Т2. При этом на сопротивлении R и соответствующем излучающем ПЭП напряжение скачком упадет до уровня 13, который пропорционален напряжению U_1 . Тиристор Т2 включен в схему для уменьшения времени переключения.

После того, как ИГ сформирует импульс 14, напряжение логической единицы появится на управляющем электроде тиристора Т1, что вызовет его открывание. При этом напряжение на сопротивлении R станет равным нулю. Сдвинутые относительно друг друга на время τ затухающие импульсы 15 и 16 при попадании на приемный ПЭП приведут к возникновению на его выходе короткого электрического импульса 17. С приходом следующего импульса синхронизации на вход ИГ все описанные процессы повторяются.

С учетом специфики пространственно-распределенных ультразвуковых измерений в образцах, а также ограниченных размеров пьезопреобразователей, последние должны иметь круговую диаграмму направленности.

Блок реле изготовлен с использованием быстродействующих электромагнитных реле под управлением контроллера на базе микропроцессора ATmega 328. Управление контроллером осуществляется с ПК посредством виртуального COM-порта через интерфейс USB.

Аппаратура имеет следующие основные технические характеристики: частотный диапазон принимаемых сигналов – 20÷500 кГц, разрядность используемого АЦП – 14 бит, резонансная частота преобразователей – 150 кГц, количество каналов коммутатора – 12.

При определении скорости продольных волн в образце в случае реализации томографических исследований на первый план выходит необходимость автоматизированного вычисления времени первого вступления волнового пакета. Для этого используется следующий алгоритм, основывающийся на гипотезе симметричности первой полуволны принимаемого волнового пакета.

В преобразованном в цифровую форму сигнале по пороговому принципу удаляется шумовая компонента. Далее вычисляется время перехода первой полуволны через нулевую отметку t_0 . Затем определяется положение максимума первого вступления $t_{\max}$, для чего сигнал дифференцируется и вычисляется координата первого перехода производной через нуль. Расстояние между t_0 и $t_{\max}$ принимается за величину Δt . Таким образом время первого вступления $t_{\text{пв}}$ определяется из выражения $t_{\text{пв}} = t_{\max} - \Delta t$. Дальнейшее вычисление времени распространения УЗ импульса между излучающим и приемным ПЭП сводится к вычислению временного интервала между приходом на АЦП синхроимпульса и определенным ранее значением $t_{\text{пв}}$.

По измеренным временам распространения УЗ импульсов вдоль каждого из 36 возможных акустических каналов в исследуемом образце рассчитываются соответствующие скорости их распространения. Полученная совокупность скоростей подвергается дальнейшей обработке с использованием алгебраических алгоритмов реконструктивной томографии. Восстановленное таким образом поле скоростей продольных волн позволяет исследовать пространственное распределение структурных неоднородностей в объекте контроля, возникающих в нем под влиянием механического нагружения.

Заключение

Разработанный аппаратный комплекс позволяет проводить ультразвуковые томографические исследования образцов горных пород в условиях одноосного механического нагружения. Предлагаемое построение электро-акустического измерительного тракта обеспечивает высокую скорость опроса каналов, что необходимо для повышения помехоустойчивости измерений, а также исключения влияния на их результаты релаксационных процессов в образце.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00029).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Laboratory approach to the study of dynamic and static bulk anisotropy in rock under high hydrostatic pressure by simultaneous P, S sounding and sample deformation measurements on

- spheres / Lokajíček T., Svitek T., Petružálek M. // Proc. 48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2014. – 2014. – Vol. 2 – P. 988–994.
2. Ahrens B., Duda M., Renner J. Relations between hydraulic properties and ultrasonic velocities during brittle failure of a low-porosity sandstone in laboratory experiments // *Geophysical Journal International*. – 2018. – Vol. 212. – No. 1. – P. 627–645.
3. Pimienta L., Fortin J., Guéguen Y. Bulk modulus dispersion and attenuation in sandstones // *Geophysics*. – 2015. – Vol. 80. – No. 2. – P. 111–127.
4. Song L., Gu L., Wei S. P. Study of damage and acoustic emission properties of rocks under uniaxial cyclic load-unload // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 887. – P. 878–881.
5. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Koshelev A.E. Stress dependence of elastic P-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions // *Journal of Mining Science*. – 2016. – Vol. 52. – No. 5. – P. 873–877.
6. Li S.H., Zhu W.C., Niu L.L., Yu M., Chen C.F. Dynamic Characteristics of Green Sandstone Subjected to Repetitive Impact Loading: Phenomena and Mechanisms // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2018. – P. 1–16.
7. Zhao Y., Zhang Y., Yu H. Experimental research on effects of water absorption on acoustic velocity anisotropy in coal rock // *Shiyou Diqui Wuli Kantan /Oil Geophysical Prospecting*. – 2017. – Vol. 52. – No. 5. – P. 999–1004.
8. Rabbani A., Schmitt D.R., Nycz J., Gray K. Pressure and temperature dependence of acoustic wave speeds in bitumen-saturated carbonates: Implications for seismic monitoring of the Grosmont Formation // *Geophysics*. – 2017. – Vol. 82. – No. 5. – P. 133–151.
9. Kahraman S., Fener M., Kilic C.O. Estimating the Wet-Rock P-Wave Velocity from the Dry-Rock P-Wave Velocity for Pyroclastic Rocks // *Pure and Applied Geophysics*. – 2017. – Vol. 174. – No. 7. – P. 2621–2629.
10. Feng Z., Mingjie X., Zhonggao M., Liang C., Zhu Z., Juan L. An experimental study on the correlation between the elastic wave velocity and microfractures in coal rock from the Qingshui basin // *Journal of Geophysics and Engineering*. – 2012. – Vol. 9. – No. 6. – P. 691–696.
11. Gilyarov V.L., Damaskinskaya E.E., Kadomtsev A.G., Rasskazov I.Y. Analysis of statistic parameters of geoacoustic monitoring data for the Antey uranium deposit // *Journal of Mining Science*. – 2014. – Vol. 50. – No. 3. – P. 443–447.
12. Yaskevich S.V., Grechka V.Y., Duchkov A.A. Processing microseismic monitoring data, considering seismic anisotropy of rocks // *Journal of Mining Science*. – 2015. – Vol. 51. – No. 3. – P. 477–486.
13. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Kormnov A.A. Ultrasonic correlation logging for roof rock structure diagnostics // *Journal of Mining Science*. – 2015. – Vol. 51. – No. 3. – P. 456–461.
14. Voznesenskii A.S., Nabatov V.V. Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel surveys using the impulse-response method // *Tunnelling and Under-ground Space Technology*. – 2017. – Vol. 70. – P. 254–261.
15. Николенко П. В., Набатов В. В. Об обеспечении помехозащищенности геоакустического контроля критических напряжений в породном массиве // *Горный журнал*. – 2015. – № 9. – С. 33–35.
16. Feng X.-T., Yao Z.-B. Li S.-J., Wu S.-Y., Yang C.-X., Guo H.-S., Zhong S. In Situ Observation of Hard Surrounding Rock Displacement at 2400-m-Deep Tunnels // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2018. – Vol. 51. – No. 3. – P. 873–892.
17. Luo X., Hou M.Z. Automated wellbore stability systems: Determination of in-situ stresses using logging data // *Oil Gas European Magazine*. – 2016. – Vol. 42. – No. 1. – P. 20–23.
18. Hoang, D., Xu, G., Li, Z., Dong, J. Discriminant analysis of excavation damage zone at underground powerhouse with high in-situ ground stresses during construction // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2016. – Vol. 21. – No. 13. – P. 4627–4653.

19. Zhang G.-Z., Chen J.-J., Chen H.-Z., Ma Z.-G., Li C.-C., Yin X.-Y. Prediction for in-situ formation stress of shale based on rock physics equivalent model // *Acta Geophysica Sinica*. – 2015. – Vol. 58. – No. 6. – P. 2112–2122.
20. Nazarova L.A., Zakharov V.N., Shkuratnik V.L., Nazarov L.A., Protasov M.I., Nikolenko P.V. Use of Tomography in Stress-Strain Analysis of Coal-Rock Mass by Solving Boundary Inverse Problems // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 191. – P. 1048–1055.
21. Lu C.-P., Liu G.-J., Zhang N., Zhao T.-B., Liu, Y. Inversion of stress field evolution consisting of static and dynamic stresses by microseismic velocity tomography // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2016. – Vol. 87. – P. 8–22.
22. Sell K., Saenger E.H., Falenty A., Chaouachi M., Haberthür D., Enzmann F., Kuhs W.F., Kersten M. On the path to the digital rock physics of gas hydrate-bearing sediments – Processing of in situ synchrotron-tomography data // *Solid Earth*. – 2016. – Vol. 7. – No. 4. – P. 1243–1258.
23. Gómez-Luna L.A., Carvajal-Jiménez J.M., Ramírez-Silva L.F. Aplicación de la técnica de tomografía acústica para la visualización y estimación de la densidad de microfracturas en muestras de afloramiento // *Boletín de Geología*. – 2016. – Vol. 38. – P. 165–181.
24. Potapov A.I., Polyakov V.E., Syasko V.A., Popov A.A., Kurianova P.V. Low-frequency broadband ultrasonic transducers for testing articles manufactured of large-structure and composite materials. Part 1. complete and partial degeneracy of vibration modes in piezoelectric elements of different geometric shapes // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2015. – Vol. 51. – No. 6. – P. 338–351.

REFERENCES

1. Lokajiček, T., Svitek, T., & Petružálek, M. (2014). Laboratory approach to the study of dynamic and static bulk anisotropy in rock under high hydrostatic pressure by simultaneous P, S sounding and sample deformation measurements on spheres. *48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, 2, 988–994.
2. Ahrens, B., Duda, M., & Renner, J. (2018). Relations between hydraulic properties and ultrasonic velocities during brittle failure of a low-porosity sandstone in laboratory experiments. *Geophysical Journal International*, 212(1), 627–645.
3. Pimienta, L., Fortin, J., & Guéguen, Y. (2015). Bulk modulus dispersion and attenuation in sandstones. *Geophysics*, 80(2), 111–127.
4. Song, L., Gu, L., & Wei, S. P. (2014). Study of damage and acoustic emission properties of rocks under uniaxial cyclic load-unload. *Advanced Materials Research*, 887, 878–881.
5. Shkuratnik, V.L., Nikolenko, P.V., & Koshelev, A.E. (2016). Stress dependence of elastic P-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions. *Journal of Mining Science*, 52(5), 873–877.
6. Li, S.H., Zhu, W.C., Niu, L.L., Yu, M., & Chen, C.F. (2018). Dynamic Characteristics of Green Sandstone Subjected to Repetitive Impact Loading: Phenomena and Mechanisms. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1–16.
7. Zhao, Y., Zhang, Y., & Yu, H. (2017). Experimental research on effects of water absorption on acoustic velocity anisotropy in coal rock. *Shiyou Diqiu Wuli Kantan/Oil Geophysical Prospecting*, 52(5), 999–1004.
8. Rabbani, A., Schmitt, D.R., Nycz, J., & Gray, K. (2017). Pressure and temperature dependence of acoustic wave speeds in bitumen-saturated carbonates: Implications for seismic monitoring of the Grosmont Formation. *Geophysics*, 82(5), 133–151.
9. Kahraman, S., Fener, M., & Kilic, C.O. (2017). Estimating the Wet-Rock P-Wave Velocity from the Dry-Rock P-Wave Velocity for Pyroclastic Rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 174(7), 2621–2629.

10. Feng, Z., Mingjie, X., Zhonggao, M., Liang, C., Zhu, Z., & Juan, L. (2012). An experimental study on the correlation between the elastic wave velocity and microfractures in coal rock from the Qingshui basin. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(6), 691–696.
11. Gilyarov, V.L., Damaskinskaya, E.E., Kadomtsev, A.G., & Rasskazov, I.Y. (2014). Analysis of statistic parameters of geoacoustic monitoring data for the Antey uranium deposit. *Journal of Mining Science*, 50(3), 443–447.
12. Yaskevich, S.V., Grechka, V.Y., & Duchkov, A.A. (2015). Processing microseismic monitoring data, considering seismic anisotropy of rocks. *Journal of Mining Science*, 51(3), 477–486.
13. Shkuratnik, V.L., Nikolenko, P.V., & Kormnov, A.A. (2015). Ultrasonic correlation logging for roof rock structure diagnostics. *Journal of Mining Science*, 51(3), 456–461.
14. Voznesenskii, A.S., & Nabatov, V.V. (2017). Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel surveys using the impulse-response method. *Tunnelling and Under-ground Space Technology*, 70, 254–261.
15. Nikolenko, P.V., & Nabatov, V.V. (2015). Interference protection in geoacoustic control of critical stresses in rocks. *Gornyi Zhurnal [Mining Journal]*, 9, 33–35 [in Russian].
16. Feng, X.-T., Yao, Z.-B., Li, S.-J., Wu, S.-Y., Yang, C.-X., Guo, H.-S., & Zhong, S. (2018). In Situ Observation of Hard Surrounding Rock Displacement at 2400-m-Deep Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(3), 873–892.
17. Luo, X., & Hou, M.Z. (2016). Automated wellbore stability systems: Determination of in-situ stresses using logging data. *Oil Gas European Magazine*, 42(1), 20–23.
18. Hoang, D., Xu, G., Li, Z., & Dong, J. (2016). Discriminant analysis of excavation damage zone at underground powerhouse with high in-situ ground stresses during construction. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(13), 4627–4653.
19. Zhang, G.-Z., Chen, J.-J., Chen, H.-Z., Ma, Z.-G., Li, C.-C., & Yin, X.-Y. (2015). Prediction for in-situ formation stress of shale based on rock physics equivalent model. *Acta Geophysica Sinica*, 58(6), 2112–2122.
20. Nazarova, L.A., Zakharov, V.N., Shkuratnik, V.L., Nazarov, L.A., Protasov, M.I., & Nikolenko, P.V. (2017). Use of Tomography in Stress-Strain Analysis of Coal-Rock Mass by Solving Boundary Inverse Problems. *Procedia Engineering*, 191, 1048–1055.
21. Lu, C.-P., Liu, G.-J., Zhang, N., Zhao, T.-B., & Liu, Y. (2016). Inversion of stress field evolution consisting of static and dynamic stresses by microseismic velocity tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 87, 8–22.
22. Sell, K., Saenger, E.H., Falenty, A., Chaouachi, M., Haberthür, D., Enzmann, F., Kuhs, W.F., & Kersten, M. (2016). On the path to the digital rock physics of gas hydrate-bearing sediments – Processing of in situ synchrotron-tomography data. *Solid Earth*, 7(4), 1243–1258.
23. Gómez-Luna, L.A., Carvajal-Jiménez, J.M., & Ramírez-Silva, L.F. (2016). Application of a new technical of acoustic tomography for the visualization and estimation of the microfractures in outcrop samples | [Aplicación de la técnica de tomografía acústica para la visualización y estimación de la densidad de microfracturas en muestras de afloramiento]. *Boletín de Geología*, 38(1), 165–181.
24. Potapov, A.I., Polyakov, V.E., Syasko, V.A., Popov, A.A., & Kurianova, P.V. (2015). Low-frequency broadband ultrasonic transducers for testing articles manufactured of large-structure and composite materials. Part 1. complete and partial degeneracy of vibration modes in piezoelectric elements of different geometric shapes. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 51(6), 338–351.

© Л. А. Назарова, П. В. Николенко, В. Л. Шkuratник, 2018

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ КЛАСТЕРИЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА ПО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ С УДАЛЕНИЕМ ОТ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО УЗЛА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГОРНОЙ ШОРИИ И ХАКАСИИ

Виктор Николаевич Опарин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, зав. отделом экспериментальной геомеханики, тел. (383)205-30-30, доп. 113, e-mail: oparin@misd.ru

Татьяна Анатольевна Киряева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, тел. (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

В статье приведены детерминированные связи распределения выхода летучих веществ, удельной энергии релаксации угольных пластов Кузбасса различной стадии метаморфизма и их геологического возраста в зависимости от расстояния до Таштагола – географической привязки железорудного узла месторождений Горной Шории и Хакасии. С этой целью сформированы и отработаны специализированные информационные банки данных геологоструктурной, горно-тектонической и геомеханико-газодинамической информации по основным объектам недропользования Кузнецкого бассейна. Установленные зависимости позволили впервые количественно упорядочить и дать объяснение особенностям проявления крупных газодинамических событий и их кластеризации по угольным месторождениям Кузбасса на примере фактических данных о техногенных катастрофах за период 1947–2010 гг.

Ключевые слова: угольные и рудные месторождения Кузнецкого бассейна, температура, выбросоопасность, выход летучих, нелинейная геомеханика, геологический возраст, кластеризация, техногенные катастрофы.

FEATURES OF KUZBASS COAL DEPOSITS CLUSTERING ON GAS-DYNAMIC ACTIVITY IN A DISTANCE FROM GORNAYA SHORIA IRON ORE UNIT DEPOSITS

Victor N. Oparin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Corresponding Member RAS, Head of Laboratory of Experimental Geomechanics, phone: (383)205-30-30, extension 113, e-mail: oparin@misd.ru

Tatiana A. Kiryaeva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., phone: (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

The determined connection of the volatiles emission distribution, the specific energy of the relaxation of the Kuzbass coal seams with various metamorphism stages and their geological age are shown in the article depending on the distance to Tashtagol. Tashtagol is the geographic reference to the iron ore unit of Gornaya Shoria and Khakassia deposits. Therefore, specialized data banks containing geo-structural, mining-tectonic and geomechanical-gas-dynamic information on the main subsoil use objects of the Kuznetsk Basin have been formed and developed. The established dependencies provide the opportunity to quantitatively order and explain the features of the large

gas dynamic events and their clustering over coal deposits in Kuzbass using the actual data on man-made disasters in the 1947–2010 period.

Key words: coal and ore deposits of Kuznetsk Basin, temperature, outburst hazard, emission of volatiles, nonlinear geomechanics, geological age, clustering, man-made disasters.

Введение

Современные знания о физико-механических свойствах продуктивных пластов каменного угля, калийно-магниевых и других солей, рудных и нефтегазовых месторождений, несмотря на их существенное различие, тем не менее указывают на наличие и общих закономерностей в развитии крупномасштабных геомеханических процессов. Общность состава органического вещества осадочных пород и углеводородов – один из важных аргументов в пользу таких закономерностей биосферного источника нефти и газа. Очевидна и роль тепловой энергии для получения жидких и газовых углеводородов из твердого исходного вещества. В последнее время к механизму нефтегазообразования стало возможным подойти с позиции общих законов трансформации горных пород при нагреве, происходящем в процессе погружения [1]. Согласно этим представлениям, например генерация нефти протекает в очагах с температурой от 50 до 160 °С.

Природные породные растворы и расплавы возникают и при плавлении горных пород в условиях погружения на большие глубины в зоны высоких температур. Так, пласты каменной соли трансформируются в горизонты жидкой раппы, которая при дальнейшем прогреве приобретает высокую внутреннюю энергию и прорывает вышележащие слои, образуя соляные диапиры и купола.

В связи с этим, согласно существующим ныне взглядам на эволюцию Земли с позиций «осцилляционной геомеханики» [2], а также существования крупных тектоно-магматических эпох, можно сделать заключение о важной роли «геокрекингового» механизма формирования месторождений «углеводородного ряда». В рамках этой гипотезы «углеводородный ряд» месторождений должен быть сопряжен с крупными магматическими телами (месторождениями) в виде структурно тектонического «древа миграции и фракционирования» газообразных, жидких и твердых форм углеводородов. Оно формируется в условиях деформирования и разогрева магмой органогенно насыщенных слоев осадочных пород при практически полном отсутствии или существенной ограниченности доступа атмосферного кислорода в термодинамически и геохимически активную зону сложнейшего природного «реактора». Это зона влияния внедряющихся из глубины Земли магматических тел.

Жидкие и газообразные породы по мере остывания магматических тел должны проникать и в продуктивные толщи сопряженных с ними месторождений полезных ископаемых углеводородного ряда, создавая геохимически примесный фон, трендово ослабевающий с расстоянием от источника разогрева породных толщ.

Методы и материалы

В качестве объекта для проведения комплексных исследований по проверке отмеченной гипотезы нами выбраны крупные железорудные и угольные месторождения Кузбасса. Здесь ставилась и решалась основная задача – о возможном геодинамическом влиянии кластера железорудных месторождений Горной Шории и Хакасии в геологические времена их образования на метанодность и газодинамическую активность угольных месторождений с позиций представлений об основах «осцилляционной геодинамики» и ее следствии – «геокрекинговом механизме происхождения месторождений углеводородного ряда».

Высказанная В. Н. Опариным [2] гипотеза имеет для своей проверки достаточно обширный информационный банк геологоразведочных данных [3, 4] по 15 396 пластопересечениям 11 месторождений Кузбасса, охватывающая все стратиграфические структуры бассейна. В работе [5] показано, что в уравнение Ленгмюра необходимо ввести экспоненциальную поправку на геотермические условия залегания угольных пластов с глубиной в виде

$$X_s = \frac{abP}{1 + bP} \cdot e^{-0,02(15-t)}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (1)$$

где t – температура на глубине залегания угольного пласта, рассчитанная с учетом геотермального коэффициента по [6, 7], °C

Уточнена поправка и на влияние температуры угольного пласта с учетом среднего по Кузбассу геотермического градиента 0,025 C/100 м.

$$X_t = 0,012 \cdot \exp(-0,012 \cdot (t - 15)), \quad (2)$$

где t – температура пласта, °C.

Локальные температурные аномалии не учитывались. Согласно [8], они генетически связаны с вертикальными тектоническими подвижками, оказавшими влияние на степень метаморфизма углей.

Результаты

Трендовый анализ экспериментальных данных показывает, что выход летучих веществ с глубиной залегания угольного пласта преимущественно снижается. Было высказано предположение, что значительные отклонения (дисперсия) экспериментальных данных для линейных трендов связаны с особенностями проявления регионального метаморфизма углей (рис. 1). Ерунаковская и верхнебалахонская подсерии являются более «молодыми» по геологическому возрасту, но несмотря на то, что они принадлежат разным сериям (кольчугинской и балахонской), выход летучих веществ у них увеличивается с глубиной (рис. 1, а). Для более «старых» по геологическому возрасту ильинской и ниж-

небалахонской подсерий, выход летучих веществ с глубиной трендово уменьшается (рис. 1, б). Аналогичная зависимость и для всего Кузнецкого бассейна в целом, хотя и с невысокой степенью достоверности для соответствующей линии аппроксимации (рис. 1, в).

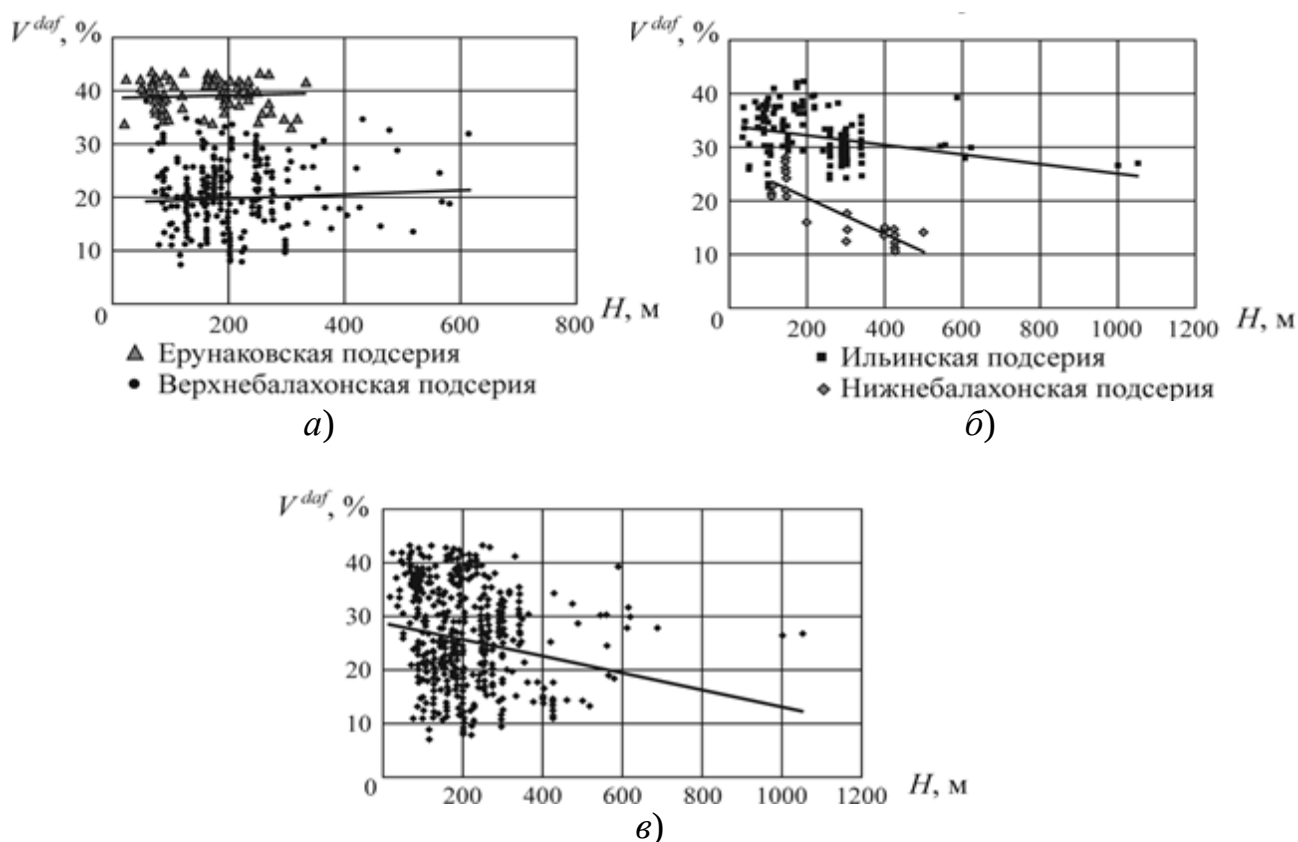


Рис. 1. Изменение выхода летучих веществ для различных: а, б) подсерий; в) углей Кузбасса в целом с глубиной залегания пластов (сплошной линией показаны их линейные тренды)

Для каждого угольного месторождения была найдена зависимость выхода летучих веществ от глубины залегания угольного пласта и, для единообразия обработки данных, определен выход летучих веществ на глубине 100 м. Обработанные таким образом данные, распределенные по шахтам и районам Кемеровской области приведены в табл. 1. Возраст каменноугольных отложений определен по [9].

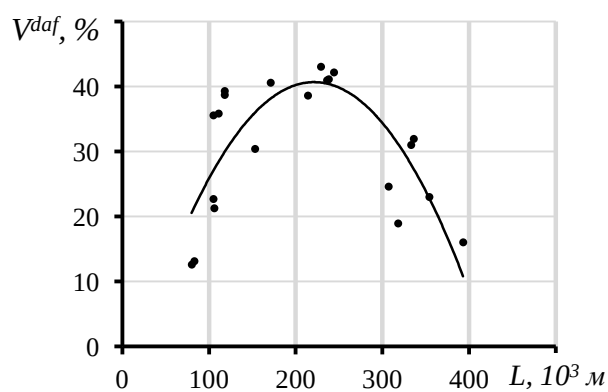
Затем построено распределение выхода летучих веществ и удельной энергии релаксации метанодности для угольных пластов месторождений Кузбасса в зависимости от расстояния до крупного железорудного узла Таштагольского месторождения (рис. 2, 3).

Таблица 1

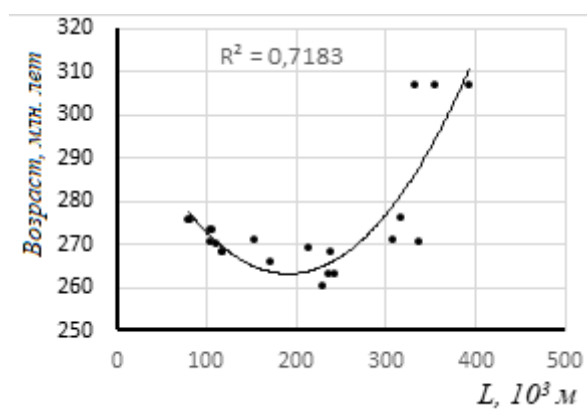
Стратиграфические структуры шахт Кузнецкого угольного бассейна

№ шах-ты	Район Кузбасса	Место-рождение	Подсерия	Свиты пластов шахты	V_{100}^{daf} , %	Возраст свит, млн лет	Расстоя-ние от Ташта-гола, км
1	Кондомский	Алардинское	Верхнебала-хонская	Кемеровская, Ишановская, Промежуточ-ная	13,1	275,4	83
2	Томь-Усинский	Ольжерасское	Верхнебала-хонская	Усятская, Кемеровская, Ишановская	22,7	273,5	105
3	Томь-Усинский	Ольжерасское	Верхнебала-хонская	Усятская, Кемеровская, Ишановская	21,3	273,5	106
4	Кемеровский	Березово-Бирюлинское	Верхнебала-хонская, Нижнебала-хонская	Промежу-точная, Алыкаевская	31,0	307,0	333
5	Кемеровский	Березово-Бирюлинское	Нижнебала-хонская	Алыкаевская	23,0	307,0	354
6	Прокопьев-ско-Киселевский	Киселевское	Верхнебала-хонская	Усятская, Кемеровская	30,4	271,0	153
7	Анжерский	Анжерское	Нижнебала-хонская	Алыкаевская	16,0	307,0	393
8	Кемеровский	Кедровско-Крохалевское	Верхнебала-хонская	Кемеровская	31,9	270,6	336
9	Томь-Усинский	Распадское	Ерунаковская, Ильинская	Ленинская, Казанково-маркинская	35,8	269,9	111
10	Осиниковский	Шелканское	Ильинская	Казанково-маркинская	35,6	270,6	105
11	Осиниковский	Алардинское	Верхнебала-хонская	Кемеровская, Ишановская, Промежуточ-ная	12,6	275,6	80
12	Беловский	Чертинское	Ильинская	Казанково-маркинская	38,6	268,9	214
13	Байдаевский	Байдаевское	Ерунаковская, Ильинская	Ленинская, Ускальская	38,7	268,0	118
14	Байдаевский	Байдаевское	Ерунаковская, Ильинская	Ленинская, Ускальская	39,3	268,0	118
15	Ерунаковский	Соколовское	Ерунаковская	Ленинская	40,6	265,8	171
16	Ленинский	Ленинское	Ерунаковская, Ильинская	Ленинская, Ускальская	41,1	268,0	238

№ шах-ты	Район Кузбасса	Место-рождение	Подсерия	Свиты пластов шахты	V_{100}^{daf} , %	Возраст свит, млн лет	Расстоя-ние от Ташта-гола, км
17	Ленинский	Ленинское	Ерунаковская, Ильинская	Грамотеин-ская, Ленинская, Ускатская	40,9	263,0	236
18	Ленинский	Ленинское	Ерунаковская	Грамотеин-ская, Ленинская	43,0	260,4	229
19	Ленинский	Егозово-Красноярское	Ерунаковская	Грамотеин-ская, Ленинская	42,2	263,0	244
20	Кемеровский	Кемеровское	Верхнебала-хонская	Кемеровская	24,6	271,0	307
21	Кемеровский	Кемеровское	Нижнебала-хонская	Промежу-точная	18,9	276,0	318



а)



б)

Рис. 2. Распределение для угольных пластов месторождений Кузбасса в зависимости от расстояния до Таштагола:

а) выхода летучих веществ; б) геологического возраста

Обсуждение

Установленные особенности поведения данной эмпирической зависимости на рис. 2, а согласуются с выбросоопасностью основных стратиграфических структур Кузбасса. На вершине параболы расположились сравнительно молодые бурые угли кольчугинской серии с выходом летучих веществ 38–43 %, имеющие минимальную удельную энергию релаксации метаноносности. Выбросоопасность этих угольных пластов минимальна.

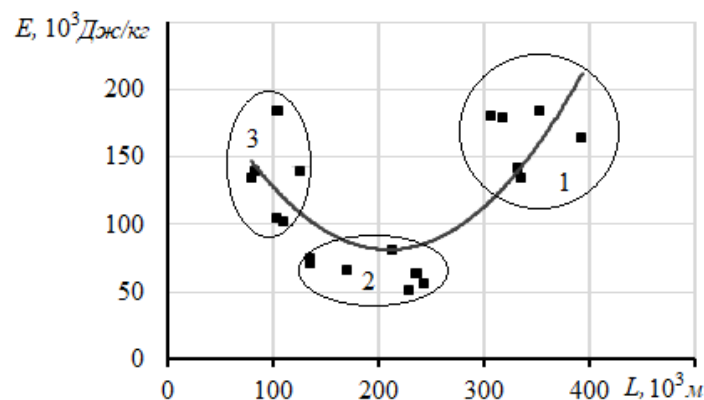


Рис. 3. Значения удельной энергии релаксации метаносности углей в зависимости от расстояния до рудного Таштагола

Ветви параболы соответствуют средней стадии метаморфизма углей. Здесь расположены наиболее выбросоопасные угольные пласты балахонской серии, причем на расстоянии около ~300–400 км от Таштагола залегают угольные пласты наиболее выбросоопасной и «старой» по геологическому возрасту нижнебалахонской подсерии. Угольные пласты, расположенные на расстоянии до ~150 км от Таштагола, также выбросоопасны. Это угли кольчугинской и балахонской серий, но менее «старых» – ильинской и верхнебалахонской подсерий (рис. 2, б).

Очевидно, что в соответствии с рис. 3 все районы Кузнецкого угольного бассейна можно разделить на 3 группы.

Первая – наиболее удаленные от Таштагола районы Кемеровский и Анжерский, имеющие максимальную удельную энергию релаксации метаносности ~130–180 кДж/кг. На этих территориях находились в середине и конце прошлого века (1947–1990 гг.) ныне закрытые, самые выбросоопасные шахты Кузбасса (табл. 2). Количество ГДЯ в них достигло 219 случаев.

Вторая группа – районы, имеющие минимальную удельную энергию релаксации метаносности ~50–80 кДж/кг. В настоящее время здесь сосредоточены все основные работающие шахты. Число ГДЯ на этих шахтах минимальное (70) из 3-х групп районов и в основном происходило в 70–90-х гг. прошлого века.

Третья группа – самые близлежащие к Таштаголу районы. Расположенные на них шахты также имеют высокую удельную энергию релаксации метаносности ~100–140 кДж/кг, но только 2 из них в Томь-Усинском районе имеют эту энергию в пределах 180 кДж/кг. Количество газодинамических явлений на шахтах этого района существенно меньше (113), чем на шахтах первой группы районов, но это были наиболее крупные (с количеством погибших 5 и более человек) аварии на шахтах Кузбасса [10]: ш. Ульяновская – 110 чел., Юбилейная – 39 чел., Распадская – 91 чел.

Таблица 2

Газодинамические явления (ГДЯ) на угольных месторождениях Кузбасса
с 1947 по 2010 г.

№ района	Месторождение	Шахта	Всего ГДЯ на 01.01.2010
1	Анжерское	Судженская	25
		Анжерская	15
	Березово- Бирюлинское	Первомайская	33
		Бирюлинская	10
		Березовская	12
	Кемеровское	Северная	112
		Ягуновская	27
Итого по 1 району			219
2	Чертинское		31
	Байдаевское		13
	Кемеровское		26
Итого по 2 району			70
3	Ольжерасское		10
	Распадское		1
	Щелканское		2
	Киселевское		13
	Прокопьевское		86
Итого по 3 району			113

Заключение

В ИГД СО РАН в последние годы в обсуждаемом направлении фундаментальных исследований достигнут ряд важных результатов, что в равной мере относится и к исследованиям, связанным с изучением и описанием механизмов накопления потенциальной упругой энергии в массивах горных пород, так и ее трансформации в кинетическую энергию разноуровневых структурных элементов, слагающих эти массивы. Практическую значимость решения этой чрезвычайно трудной и необыкновенно интересной проблемы нелинейной геомеханики трудно переоценить. Она важна не только с позиций создания теоретических основ безопасного освоения недр Земли на больших глубинах, но и для разработки принципиально новых технологических решений, опирающихся на фундаментальные знания механизмов протекания массообменных процессов в многофазных сильно напряженных геосредах [11–13]. С этих позиций рис. 2, 3 содержат информацию о геомеханико-геодинамических, термодинамических и физико-химических условиях формирования угольных пластов для конкретных угольных районов Земли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01282).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дьяконов А. И. и др. Теоретические основы и методы прогноза, поисков и разведки месторождений нефти и газа: учебник / А. И. Дьяконов, Б. А. Соколов, Ю. К. Бурлин. – Ухта: УГТУ, 2002. – 327 с.
2. Курленя М. В., Опарин В. Н. Осцилляционная геодинамика и эффект «зависания» горных систем / Труды межд. конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001. – С. 19–35.
3. Свидетельство № 2018620035 на БД. Российская Федерация. Каталог метаноносности углей Кузбасса / Киряева Т. А., Опарин В. Н.; зарегистр. 09.01.2018 г.
4. Свидетельство № 2018620264 на БД. Российская Федерация. Каталог метаноемкости углей Кузбасса / Киряева Т. А., Опарин В. Н.; зарегистр. 13.02.2018 г.
5. Полевщиков Г. Я. Особенности распределения газового потенциала участка углеметанового месторождения, разрабатываемого открытым способом / Г. Я. Полевщиков, Е. Н. Козырева, Т. А. Киряева // ГИАБ. – 2004. – № 2. – С. 146–148.
6. Угольная база России. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – Т. 6: Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России. – 779 с.
7. Яворский В. И. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР / В. И. Яворский. – М.: Недра, 1969. – Т. 7. – С. 305–311.
8. Полевщиков Г. Я. Физико-химические особенности метастабильных состояний углеметановых пластов / Г. Я. Полевщиков, Т. А. Киряева // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: материалы конф. (с участием иностр. ученых). – Новосибирск, 2007. – Т. 1. – С. 290–293.
9. Постановления межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. – СПб.: Изд. ВСЕГЕИ, 2008. – Вып. 38. – 151 с.
10. Свидетельство № 2018620036 на БД. Российская Федерация. Каталог внезапных выбросов угля и газа в Кузбассе / Киряева Т. А., Опарин В. Н.; зарегистр. 09.01.2018 г.
11. Oparin V. N. Interaction of geomechanical and physicochemical processes in Kuzbass coal / V. N. Oparin, T. A. Kiryaeva, V. Yu. Gavrillov et al. // J. Mining Sci. – 2014. – Vol. 50, Issue 2. – P. 191–214.
12. Oparin V. N. Initiation of underground fire sources / V. N. Oparin, T. A. Kiryaeva, V. Yu. Gavrillov et al. // J. Mining Sci. – 2016. – Vol. 52, No 3. – P. 576–592.
13. Oparin V. N. Nonlinear deformation-wave processes in various rank coal specimens loaded to failure under varied temperature / V. N. Oparin, T. A. Kiryaeva, O. M. Usol'tseva // J. Mining Sci. – 2015. – Vol. 51, No 4. – P. 641–658.

REFERENCES

1. Dyakonov A. I. (2002). Teoreticheskie osnovy I metodi prognoza, poiskov i razvedki mestorogdeni nefiti i gaza: uchebnik. Ukhta: UGTU. [in Russian].
2. Kurlenya M. V., Oparin V. N. (2001). Ostsillyatsionnaya geodinamika i effect “zavisaniya” gornikh system. *Trudi mezhdunarodnoi conference “Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie neдр Zemli”* Novosibirsk. IGD SO RAN. [in Russian].
3. Kiryaeva T. A. & Oparin V. N. (2018). *Patent RF No 2018620035*. Novosibirsk: IP Russian Federation.
4. Kiryaeva T. A. & Oparin V. N. (2018). *Patent RF No 2018620264*. Novosibirsk: IP Russian Federation.
5. Polevshchikov G. Ya. (2004). Osobennosti raspredeleniya gazovogo potentsiala uchastka uglemetanovogo mestorozhdeniya, razrabativaemogo otkritim. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2, 146–148 [in Russian].

6. Ugolnaya baza Russia. (2004). T. 6. Osnovnye zakonomernosti ugleobrazovaniya i razmeshcheniya uglenosnosti na territorii Russia. Moscow: ООО “Geoinformmark”. [in Russian].
7. Yavorskiy V. I. (1969). Geologiya mestorozhdeniy uglya I goryuchih slantsev SSSR. Moscow: Nedra. T.7. pp. 305–311.[in Russian].
8. Polevshchikov G. Ya. (2007). Fiziko-khimicheskie osobennosti metastabil’nykh sostoyaniy yglemetanovykh plastov. In *sbornik materialov conference s uchastiem inostr. uchyonykh: T. 1. Fundamental’nye problem formirovaniya technogennoy geosredy*. (pp. 290–293). Novosibirsk. [in Russian].
9. Postanovleniya mezhvedomstvennogo stratigraphicheskogo komiteta i ego postoyannykh komissiy. (2008). Saint Petersburg: VSEGEI. [in Russian].
10. Kiryaeva T. A. & Oparin V. N. (2018). *Patent RF No 2018620036*. Novosibirsk: IP Russian Federation.
11. Oparin V. N. (2014). Interaction of geomechanical and physicochemical processes in Kuzbass coal. *J. Mining Sci*, 50 (2), 191–214.
12. Oparin V. N. (2016). Initiation of underground fire sources. *J. Mining Sci*, 52 (3), 576–592.
13. Oparin V. N. (2015). Nonlinear deformation-wave processes in various rank coal specimens loaded to failure under varied temperature. *J. Mining Sci*, 51(4), 641–658.

© В. Н. Опарин, Т. А. Киряева, 2018

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИРОДНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА

Антон Владимирович Панов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

Александр Александрович Скулкин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 173, e-mail: chuppt@yandex.ru

Аркадий Васильевич Леонтьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 173, e-mail: leon@misd.ru

Леонид Анатольевич Назаров

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 337, e-mail: naz@misd.ru

Лариса Алексеевна Назарова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 335, e-mail: larisa@misd.ru

Нелли Александровна Мирошниченко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 174, e-mail: mna@misd.ru

Екатерина Владимировна Рубцова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 174, e-mail: rubth@misd.ru

Разработан метод реконструкции напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности подземных объектов, основанный на решении обратных задач определения составляющих внешнего поля напряжений по данным о параметрах геомеханических полей в дискретном множестве точек. В качестве входной информации могут, в частности, выступать результаты геодезических и деформографических *in situ* измерений. Метод апробирован с использованием данных измерительного гидроразрыва, полученных в ходе натурных экспериментов на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей. С учетом геологической и геотехнической информации о структуре вмещающего массива и конфигурации выработанного пространства построена и методом конечных элементов реализована геомеханическая модель месторождения. Показана разрешимость сформулирован-

ной обратной граничной задачи определения величины и ориентации горизонтальных компонент σ_1 и σ_2 природного поля напряжений. Численными экспериментами установлено, что минимальное напряжение σ_2 лежит в диапазоне от 13 до 15 МПа, а максимальное σ_1 – от 21 до 26 МПа.

Ключевые слова: породный массив, напряженно-деформированное состояние, Верхнекамское месторождение, измерительный гидроразрыв, геомеханическая модель, метод конечных элементов, обратная задача.

DETERMINATION OF HORIZONTAL COMPONENTS OF A NATURAL STRESS FIELD WITH MEASUREMENT HYDROFRAC DATA

Anton V. Panov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, Mining Information Science Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

Alexander A. Skulkin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, Mining Information Science Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 173, e-mail: chuptt@yandex.ru

Arkady V. Leontiev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Leading Researcher, Mining Information Technique Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 173, e-mail: leon@misd.ru

Leonid A. Nazarov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Head of Mining Information Science Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 337, e-mail: naz@misd.ru

Larisa A. Nazarova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Chief Researcher, Mining Information Science Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 335, e-mail: larisa@misd.ru

Nelly A. Miroschnichenko

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, Mining Information Science Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 174, e-mail: mna@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

A method used for the reconstruction of the stress-strain state of a rock mass in the vicinity of underground objects is developed, based on the solution of the inverse problems determining the components of the external stress field from the parameters of geomechanical fields in a discrete set of points. The results of geodetic and deformographic in situ measurements can serve as an input

information. The method has been tested with the use of hydraulic fracturing data obtained during field experiments at the Verkhnekamskoye deposit of potassium salts. Taking into account geological and geotechnical information on the structure of the enclosing mass and the configuration of the developed space, the geomechanical model of the field has been constructed and the finite element method has been implemented. The solvability of the formulated inverse boundary value problem for determining the magnitude and orientation of the horizontal components σ_1 and σ_2 of the natural stress field is shown. Numerical experiments have established that the minimum stress σ_2 lies in the range from 13 to 15 MPa, and the maximum σ_1 is from 21 to 26 MPa.

Key words: rock mass, stress-strain state, Verkhnekamskoye deposit, hydrofracturing, geomechanical model, finite element method, inverse problem.

Введение

Строительство и эксплуатацию современного горного предприятия трудно представить без комплекса геомеханических исследований, важная составная часть которых – оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях естественного залегания [1–3], без которой невозможно предложить правильные проектные решения и обосновать технологию выемки запасов. Несмотря на то, что существуют различные подходы к оценке состояния геомеханических объектов (например, физическое моделирование на макете процесса эволюции напряжения и обрушения кровли в шахте [4]; сейсмоакустический мониторинг напряженного состояния при подземной добыче [5]), натурный эксперимент является, по сути, единственным надежным средством количественной оценки действующих в породном массиве напряжений [6].

Преимущество измерительного гидроразрыва по сравнению с другими методами определения напряжений заключается, в первую очередь, в независимости результатов от деформационных свойств пород. При этом для уточнения информации предлагается одновременно проводить регистрацию акустической [7] или [8] микросейсмической эмиссии.

В процессе разведки и эксплуатации месторождения накапливается большой объем прямых и косвенных фактических данных о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород [9], которые интерпретируются с использованием простейших моделей. При этом часто теряется «полезная» информация [10,11].

В настоящей работе реализован универсальный подход, позволяющий в рамках детальной геомеханической модели объекта интегрально учесть результаты измерений напряжений во множестве пунктов, произвольно расположенных в пространстве. Для получения входных данных в 2015-2016 гг. по методике [12] проводился измерительный гидроразрыв на рудниках СКРУ-1, СКРУ-2, СКРУ-3 Верхнекамского месторождения калийных солей (ПАО «Уралкалий»). В основе измерений лежит классическая теория распространения трещин [13].

Постановка и решение прямой задачи

Разработана и методом конечных элементов реализована 2D геомеханическая модель горизонтального сечения (глубина 350 м) зоны отработки рудников. Расчетная область G – прямоугольник $\{0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y\}$ с размерами $L_x = 100$ км $L_y = 88$ км по соответствующим осям декартовой системы координат (x, y) , ось ординат ориентирована на север. На рис. 1 представлена центральная часть G и граничные условия, темной линией показана граница отработываемой зоны. Месторождение разрабатывается камерно-столбовой системой с оставлением целиков, ширина которых примерно равна ширине добычных выработок. Это было учтено при задании деформационных свойств (модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν) и плотности ρ «выработанного пространства» и «вмещающих пород», представленных в табл. 1.

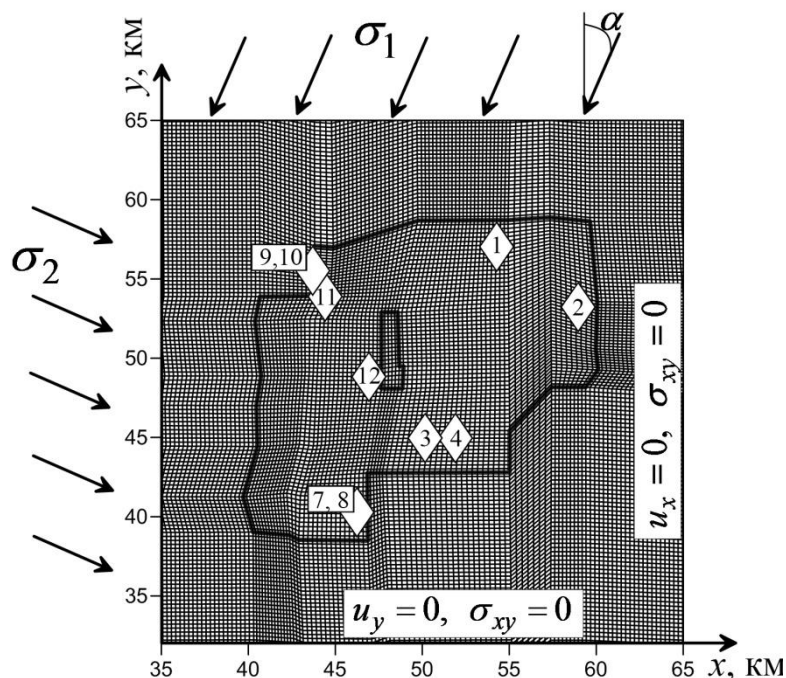


Рис. 1. Фрагмент дискретизации расчетной области на конечные элементы и граничные условия (ромбы – пункты, в которых измерялись напряжения методом гидроразрыва)

Таблица 1

Механические свойства пород

Порода	E , ГПа	ν	ρ , кг/м ³
Каменная соль	5.1	0.3	2050
Выработанное пространство	2.5	0.3	1000

В области G генерировалась сетка четырехугольных элементов, содержащая 400×352 узлов (рис. 1). На ∂G формулировались граничные условия:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}(0, y) &= \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_2 \cos^2 \alpha, & u_x(L_x, y) &= 0; \\ \sigma_{xy}(0, y) &= 0.5(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\alpha, & \sigma_{xy}(L_x, y) &= 0; \\ \sigma_{yy}(x, L_y) &= \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha, & u_y(x, 0) &= 0; \\ \sigma_{xy}(x, L_y) &= 0.5(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\alpha, & \sigma_{xy}(x, 0) &= 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где σ_1 и σ_2 – главные напряжения в естественном поле (вне зоны влияния горных работ); $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ – компоненты тензора напряжения; u_x, u_y – смещения; α – угол между направлением действия главного напряжения σ_1 и осью y .

Деформирование среды при ведении горных работ описывалось системой уравнений линейной теории упругости, состоящей из уравнений равновесия (2), закона Гука (3) и соотношений Коши для малых деформаций (4).

$$\sigma_{ij,j} = 0;\tag{2}$$

$$\sigma_{ij} = \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij};\tag{3}$$

$$\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}),\tag{4}$$

где λ, μ – параметры Ламе (выражаются через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν по известным формулам [14]), ε_{ij} – компоненты тензора деформаций, δ_{ij} – дельта Кронекера, $(i, j = x, y)$.

Прямая задача (1)-(4) решалась методом конечных элементов с использованием оригинального кода [15, 16].

Постановка и решение обратной задачи

Если для крупномасштабных геологических объектов (плиты и микроплиты) горизонтальные компоненты природного поля напряжений определяются косвенными методами [6], то для среднемасштабных (месторождения полезных ископаемых) – как правило, прямыми измерениями [6, 14]. В этом случае в массив горных пород вносится возмущение и по отклику оцениваются компоненты тензора напряжений. Подавляющее большинство таких методов в натурных условиях являются весьма трудоемкими и дорогостоящими, сами же измерения проводятся в зоне влияния горных выработок. Поэтому необходимы новые подходы, основанные на постановках и решении обратных задач [17], которые в последнее время получают все большее распространение. Так, в [18, 19] проводится оценка пористости и проницаемости коллектора по данным о деформации дневной поверхности, а в [20] с помощью многолетних измерений верти-

кальных и горизонтальных смещений на подземном газохранилище в Италии удалось уточнить деформационные характеристики вмещающего массива.

Сформулируем граничную обратную задачу: определить компоненты внешнего поля напряжений (σ_1, σ_2) и их ориентацию (угол α) по данным измерения напряжений в дискретном множестве точек.

В натуральных условиях методом гидроразрыва были определены минимальное S_2 и максимальное S_1 напряжения в $N=10$ пунктах с координатами (x_n, y_n) (рис. 1) [21].

Введем целевую функцию:

$$\Psi(\sigma_1, \sigma_2, \alpha) = \frac{\sqrt{N \sum_{n=1}^N [D_1^2 + D_2^2]}}{\sum_{n=1}^N [S_1(x_n, y_n) + S_2(x_n, y_n)]}, \quad (5)$$

где $D_m = s_m(x_n, y_n, \sigma_1, \sigma_2, \alpha) - S_m(x_n, y_n)$, ($m=1, 2$), а s_2 и s_1 – минимальное и максимальное главные напряжения тензора σ_{ij} , рассчитанные теоретически при некоторых значениях σ_1 , σ_2 и α . Минимум функции Ψ доставляет решение сформулированной обратной задачи. Последняя относится к граничному типу, что позволяет воспользоваться эффективным расчетным алгоритмом [22], основанном на разделении прямого и обратного хода при решении системы линейных уравнений относительно узловых смещений (глобальная матрица жесткости).

Рис. 2 демонстрирует изолинии Ψ в различных сечениях, которые показывают, что целевая функция – унимодальная и обратная задача разрешима. Темные зоны – области эквивалентности, где значение $\Psi < 0,5$.

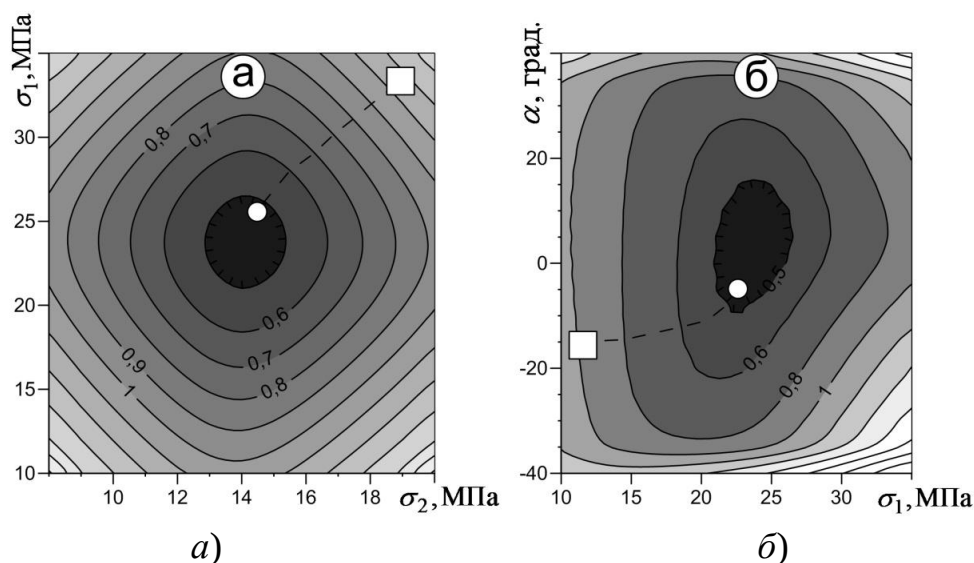


Рис. 2. Изолинии целевой функции Ψ в различных сечениях:

а) $\alpha = 5^\circ$; б) $\sigma_2 = 14$ МПа

Таким образом, искомые компоненты природного поля напряжений лежат в диапазонах: $13 \leq \sigma_2 \leq 15$ МПа, $21 \leq \sigma_1 \leq 26$ МПа, а угол α между направлением на север и σ_1 изменяется от -10 до 15° .

Результаты расчетов – линии уровня нормальных компонент тензора напряжений для $\sigma_2 = 15$ МПа, $\sigma_1 = 24$ МПа и $\alpha = -7^\circ$ (точка минимума целевой функции Ψ) представлены на рис. 3. Как и следовало ожидать, концентрация напряжений имеет место в краевых зонах очистного пространства, в отработанной части – закономерное уменьшение напряжений.

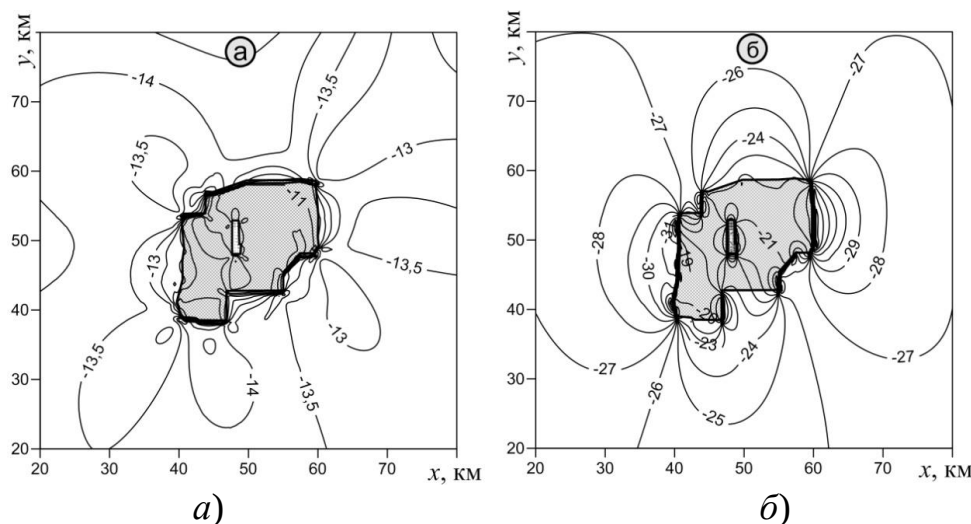


Рис. 3. Изолинии нормальных компонент (МПа) тензора напряжения:

а) σ_{xx} ; б) σ_{yy}

Заключение

Разработан и алгоритмически реализован подход к реконструкции напряженно-деформированного состояния массива горных пород, основанный на решении обратной граничной задачи определения горизонтальных составляющих природного поля напряжений по результатам измерения параметров геомеханических полей в зоне ведения горных работ. Подход апробирован на данных, полученных методом измерительного гидроразрыва на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей. Оказалось, что минимальная σ_2 и максимальная σ_1 горизонтальные компоненты лежат в диапазонах: $13 \leq \sigma_2 \leq 15$ МПа, $21 \leq \sigma_1 \leq 26$ МПа, а угол между направлением на север и σ_1 может варьироваться от -10 до 15° . Верифицированная таким образом геомеханическая модель месторождения может быть в дальнейшем использована для обоснования технологии выемки запасов.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090002-5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yang S. Q. et al. A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'Ancoal mine, China // *Engineering Geology*. – 2017. – Vol. 217. – P. 89–101.
2. Golik V. I., Efremkov A. B. Control of Rock Mechanics in Underground Ore Mining // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 221. – No. 1. – P. 012013-1–012013-12.
3. Lin C., Guo D., & Liang Y. Influence of Structural Elements and Stress on Mining-Induced Fault Slip // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2018. – Vol. 36. – No.1. – P. 439–453.
4. Bin Zhu, and Li Ge. Experimental Simulation of the Mine Pressure in Chuancao Gedan Coal Mine // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2016. – Vol. 21. – P. 44–47.
5. Cao Anye, et al. Case study of seismic hazard assessment in underground coal mining using passive tomography // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2015. – Vol. 78. – P. 1–9.
6. Zang A., Stephansson O. Stress Field of Earth's Crust. – London: Springer, 2010. – 322 pp.
7. Xinfang M. A., Ning L. I., Congbin Y. I. N., Yanchao L. I., Yushi Z. O. U., Shan W. U., ... & Tong Z. H. O. U. Hydraulic fracture propagation geometry and acoustic emission interpretation: A case study of Silurian Longmaxi Formation shale in Sichuan Basin, SW China // *Petroleum Exploration and Development*. – Vol. 44. – No.6. – P. 1030–1037.
8. Gischig Valentin Samuel, et al. On the link between stress field and small-scale hydraulic fracture growth in anisotropic rock derived from microseismicity // *Solid Earth*. – 2018. – Vol. 9. – No.1 – P. 39–61.
9. Yang Ke, et al. Experimental investigation into stress-relief characteristics with upward large height and upward mining under hard thick roof // *International Journal of Coal Science & Technology*. – 2015. – Vol. 2. – No.1. – P. 91–96.
10. Ptáček J., et al. Rotation of principal axes and changes of stress due to mine-induced stresses // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2015. – Vol. 52. – No.10. – P. 1440–1447.
11. Плаксин М. С. и др. Гидроразрыв угольного пласта в шахтных условиях как панацея решения газовых проблем шахт (основы разработки и внедрения) // *Уголь*. – 2015. – № 2. – С. 48–50.
12. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. Развитие методических основ измерительного гидроразрыва // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – № 5. – С. 188–191.
13. Sher E. N., & Kolykhalov I. V. Determination of hydrofracture geometry in a production reservoir // *Journal of Mining Science*. – 2015. – Vol. 51. – No.1. – P. 81–87.
14. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. Fundamentals of rock mechanics. – 4th ed. – John Wiley&Sons Inc., 2007. – 488 pp.
15. Nazarov L. A. et al. Estimation of state and properties of various-scale geomechanical objects using solutions of inverse problems // *Journal of Mining Science*. – 2014. – Vol. 50. – No. 5. – P. 831–840.
16. Djadkov P.G., Mel'nikova V.I., Nazarov L.A., Nazarova L.A., San'kov V.A. Increase of seismotectonic activity in the Baikal region in 1989-95: results of experimental observations and numerical modeling of changes in the stress-strained state // *Geologia i Geofizika*. – 1999. – Vol. 40. – No. 3. – P. 373–386.
17. Nazarova L. A., Nazarov L. A., Protasov M. I. Reconstruction of 3D stress field in coal-rock mass by solving inverse problem using tomography data // *Journal of Mining Science*. – 2016. – Vol. 52. – No. 4. – P. 623–631.
18. Jha B. et al. Reservoir characterization in an underground gas storage field using joint inversion of flow and geodetic data // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2015. – Vol. 39. – No. 14. – P. 1619–1638.

19. Comola F., Janna C., Lovison A., Minini M., Tamburini A., & Teatini P. Efficient global optimization of reservoir geomechanical parameters based on synthetic aperture radar-derived ground displacements // *Geophysics*. – 2016. – Vol. 81. – No. 3. – P. M23–M33.
20. Zoccarato C. et al. Data assimilation of surface displacements to improve geomechanical parameters of gas storage reservoirs // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2016. – Vol. 121. – No. 3. – P. 1441–1461.
21. Скулкин А.А. Экспериментальное определение параметров поля напряжений на соляном руднике в Соликамске // IX Междунар. конф. мол. уч. и студ. «Современные техника и технологии в научных исследованиях»: сб. материалов (Бишкек, Кыргызстан, 27–28 марта 2017 г.). – Бишкек: НС РАН, 2017. – С. 168–174.
22. Панов А. В., Назаров Л. А. Метод определения горизонтального напряжения и свойств массива горных пород путем решения обратной задачи // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск: Дальний Восток. – 2013. – № ОБ4. – С. 61–72.

REFERENCES

1. Yang, S. Q., Chen, M., Jing, H. W., Chen, K. F., & Meng, B. (2017). A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'An coal mine, China. *Engineering Geology*, 217, 89–101. doi: 10.1016/j.enggeo.2016.12.012.
2. Golik, V. I., & Efremkov, A. B. (2017, July). Control of Rock Mechanics in Underground Ore Mining. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 221, No. 1, p. 012013). IOP Publishing. doi: 10.1088/1755-1315/221/1/012013.
3. Lin, C., Guo, D., & Liang, Y. (2018). Influence of Structural Elements and Stress on Mining-Induced Fault Slip. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(1), 439–453. doi: 10.1007/s10706-017-0338-1.
4. Bin, Z., & Ge, L. (2016). Experimental Simulation of the Mine Pressure in Chuancao Gedan Coal Mine. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21, 44–47.
5. Cao, A., Dou, L., Cai, W., Gong, S., Liu, S., & Jing, G. (2015). Case study of seismic hazard assessment in underground coal mining using passive tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 78, 1–9. doi: 10.1016/j.ijrmms.2015.05.001.
6. Zang, A., & Stephansson, O. (2009). *Stress field of the Earth's crust*. Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-1-4020-8444-7.
7. Xinfang, M. A., Ning, L. I., Congbin, Y. I. N., Yanchao, L. I., Yushi, Z. O. U., Shan, W. U., ... & Tong, Z. H. O. U. (2017). Hydraulic fracture propagation geometry and acoustic emission interpretation: A case study of Silurian Longmaxi Formation shale in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(6), 1030–1037.
8. Gischig, V. S., Doetsch, J., Maurer, H., Krietsch, H., Amann, F., Evans, K. F., ... & Wiemer, S. (2018). On the link between stress field and small-scale hydraulic fracture growth in anisotropic rock derived from microseismicity. *Solid Earth*, 9(1), 39–61. doi: 10.5194/se-9-39-2018.
9. Yang, K., He, X., Dou, L., Liu, W., Sun, L., & Ye, H. (2015). Experimental investigation into stress-relief characteristics with upward large height and upward mining under hard thick roof. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2(1), 91–96. doi: 10.1007/s40789-015-0066-1.
10. Ptáček, J., Konicek, P., Staš, L., Waclawik, P., & Kukutsch, R. (2015). Rotation of principal axes and changes of stress due to mine-induced stresses. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10), 1440–1447.
11. Plaksin, M. S., Rodin, R. I., Rjabcev, A. A., Al'kov, V. I., Leont'eva, E. V., & Nepeina, E. S. (2015). Hydrofracture of a coal seam in mine conditions as a panacea for solving gas problems of mines (the basis for development and implementation). *Ugol' [Coal]*, 2, 48–50 [in Russian].

12. Rubcova, E. V., & Skulkin, A. A. (2013). Development of the methodological basis for measuring hydraulic fracturing. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]*, 5, 188–191 [in Russian].
13. Sher, E. N., & Kolykhalov, I. V. (2015). Determination of hydrofracture geometry in a production reservoir. *Journal of Mining Science*, 51(1), 81–87. doi: 10.1134/S1062739115010111.
14. Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., Zimmerman, R. Fundamentals of rock mechanics. – John Wiley & Sons Inc., 2007. – 488 pp.
15. Nazarov, L. A., Nazarova, L. A., Usol'tseva, O. M., & Kuchai, O. A. (2014). Estimation of state and properties of various-scale geomechanical objects using solutions of inverse problems. *Journal of Mining Science*, 50(5), 831–840. doi: 10.1134/S1062739114050020.
16. Djadkov, P.G., Mel'nikova, V.I., Nazarov, L.A., Nazarova, L.A., San'kov, V.A. (1999). Increase of seismotectonic activity in the Baikal region in 1989–95: results of experimental observations and numerical modeling of changes in the stress-strained state. *Geologia i Geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 40(3), 373–386 [in Russian].
17. Nazarova, L. A., Nazarov, L. A., & Protasov, M. I. (2016). Reconstruction of 3D stress field in coal–rock mass by solving inverse problem using tomography data. *Journal of Mining Science*, 52(4), 623–631. doi: 10.1134/S1062739116041010.
18. Jha, B., Bottazzi, F., Wojcik, R., Coccia, M., Bechor, N., McLaughlin, D., & Juanes, R. (2015). Reservoir characterization in an underground gas storage field using joint inversion of flow and geodetic data. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39(14), 1619–1638. doi: 10.1002/nag.2427.
19. Comola, F., Janna, C., Lovison, A., Minini, M., Tamburini, A., & Teatini, P. (2016). Efficient global optimization of reservoir geomechanical parameters based on synthetic aperture radar-derived ground displacements. *Geophysics*, 81(3), M23–M33. doi: 10.1190/geo2015-0402.1.
20. Zoccarato, C., Baù, D., Ferronato, M., Gambolati, G., Alzraiee, A., & Teatini, P. (2016). Data assimilation of surface displacements to improve geomechanical parameters of gas storage reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3), 1441–1461. doi: 10.1002/2015JB012090.
21. Skulkin, A. A. (2017). Experimental determination of the stress field parameters at a salt mine in Solikamsk. In *Sovremennye tekhnika i tekhnologii v nauchnyh issledovaniyah [Modern engineering and technology in scientific research]*, 168–174 [in Russian].
22. Panov, A. V., & Nazarov, L. A. (2013). Method for determining the horizontal stress and rock properties by solving the inverse problem. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]*, 4, 61–72 [in Russian].

© А. В. Панов, А. А. Скулкин, А. В. Леонтьев, Л. А. Назаров,
Л. А. Назарова, Н. А. Мирошниченко, Е. В. Рубцова, 2018

О НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ГИДРОРАСПОРНЫХ АНКЕРОВ

Евгений Павлович Русин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник группы прикладной геомеханики, отдел горной и строительной геотехники, тел. (383)205-30-30, доп. 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

Гил Нам Хан

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник группы прикладной геомеханики, отдел горной и строительной геотехники, тел. (383)205-30-30, доп. 193, e-mail: gmmlab@misd.ru

Известен способ повышения несущей способности анкеров с гибкой тягой за счет выполнения их криволинейными. При приложении осевой выдергивающей силы к изогнутому элементу возникает нормальная сила, направленная к центру кривизны. Поэтому на контакте тяги с массивом развивается сила трения, которая согласно формуле Эйлера экспоненциально возрастает с увеличением угла охвата массива тягой. Благодаря этому несущая способность конструкции существенно повышается. В статье оценивается возможность использования аналогичного приема для повышения несущей способности широко применяемых в горном деле трубчатых гидрораспорных анкеров. Для этого аналитически решено дифференциальное уравнение равновесия трубки, размещенной в криволинейной скважине и находящейся под действием давления и выдергивающей силы, и получена формула для расчета сопротивления выдергиванию. Результаты расчетов показывают, что выполнение гидрораспорного анкера криволинейным, даже при изгибе его на угол 90° , дает несущественное увеличение его несущей способности. Причиной этого является двоякое действие упомянутой нормальной силы. По внутреннему радиусу кривизны анкера она увеличивает нормальное давление на трубку. В то же время, по внешнему радиусу кривизны она действует на отрыв трубки от стенки скважины, снижая нормальное давление, нивелируя прирост силы трения и, соответственно, несущей способности анкера.

Ключевые слова: массив горных пород, крепление, гидрораспорный анкер, криволинейный, формула Эйлера, сила трения, несущая способность.

BEARING CAPACITY OF CURVILINEAR HYDRAULIC EXPANSION ROCK BOLTS

Evgeny P. Rusin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Applied Geomechanics Group, Mining and Construction Geotechnics Dept., phone: (383)205-30-30, extension 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

Guil N. Khan

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Applied Geomechanics Group, Mining and Construction Geotechnics Dept., phone: (383) 205-30-30, extension 193, e-mail: gmmlab@misd.ru

There is a method for increasing the load-bearing capacity of anchors having flexible tendon by means of making it curvilinear. When an axial pullout force is applied to the bent element, a normal force appears, directed toward the center of curvature. Therefore, the frictional force develops at the interface between the base and the tendon wrapped around it. The frictional force, according to Euler's formula, exponentially grows with the increase in the wrap angle. Due to this, the bearing capacity of the structure builds up significantly. The article assesses the possibility of using a similar approach to enhance the bearing capacity of tubular hydraulic expansion rock bolts widely used in mining. To do this, the differential equation of equilibrium of a tube placed in a curved borehole, the tube being under the action of pressure and pullout force, is analytically solved, and a formula is derived for calculating the pullout resistance limiting value. The calculation results show that making a hydraulic expansion rock bolt curvilinear, even if it is bent at 90° , gives an insignificant increase in its pullout resistance. The reason for this is the twofold action of the said normal force. It increases the normal pressure on the tube along the internal radius of the rock bolt curvature. At the same time, along the external radius of curvature, it tends to detach the tube off the borehole wall thus reducing the normal pressure, leveling the augment of the frictional force and, accordingly, of the anchor bearing capacity.

Key words: rock mass, support, hydraulic expansion rock bolt, curvilinear, Euler's formula, friction force, bearing capacity.

Введение

Для поддержания подземных выработок, включая горные, тоннели и другие виды инженерных полостей широко используются анкеры [1]. Их конструкции разнообразны [1–5], а диапазон условий использования обширен [1–16]. Одной из основных характеристик анкеров является их несущая способность. В ИГД СО РАН разработаны грунтовые анкеры с гибкой тягой и с повышенной в 1,5 и более раз несущей способностью [17–20]. Это достигается путем нагружения анкера под углом к оси его монтажной скважины, искривленная при этом тяга взаимодействует в радиальном направлении с грунтовым основанием. Сила трения на их контакте с увеличением угла охвата основания тягой экспоненциально возрастает в соответствии с формулой Эйлера [21] (поэтому для краткости данный эффект будем далее называть эйлеровским) и существенно повышает сопротивление анкера выдергиванию. Анкер может быть снабжен промежуточной опорой [19, 20], которая имеет развитую площадь контакта с основанием и размещается в нем на участке перегиба тяги. Это позволяет применять такой анкер в слабых грунтах. Представляется целесообразным оценить результативность использования эйлеровского эффекта в анкерах, устанавливаемых в горных породах.

Методы и материалы. Результаты

Для реализации эйлеровского эффекта в горных породах требуется придание анкерной скважине криволинейной формы. Первое из технических решений такого плана предложено в ИГД СО РАН, его принципиальная схема представлена на рис. 1 [22]. При установке данного анкера его гибкая тяга 1 получает два разнонаправленных изгиба и по своей боковой поверхности входит

в контакт со стенками скважины 3. Предельная сила P выдергивания может быть рассчитана по формуле Эйлера [21]:

$$P = Q \cdot e^{f\alpha},$$

где Q – несущая способность замковой части 2 анкера, e – основание натурального логарифма, f – коэффициент трения материала тяги по стенке скважины, α – накопленный тягой суммарный угол изгиба (рад). Экспоненциальная зависимость в правой части формулы – ключ к существенному превышению P над Q . Так, например, при величине коэффициента трения стали по горной породе $f = 0.4$ и $\alpha = 40^\circ$ отношение P/Q составляет 1.32. То есть предельное сопротивление анкера выдергиванию возрастает на 32 %, что весьма существенно.

Проиллюстрируем изложенное выше с помощью физического эксперимента, схема которого приведена на рис. 2.

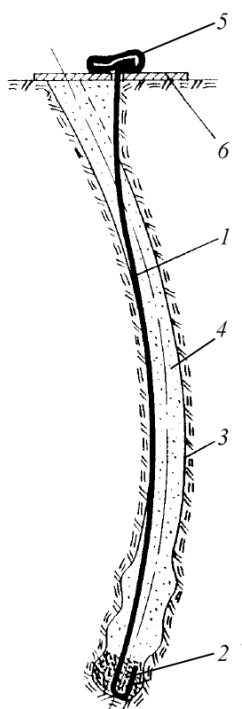


Рис. 1. Криволинейный анкер [22]:

1 – гибкая тяга; 2 – замковая часть;
3 – криволинейная скважина в горной породе; 4 – сыпучий заполнитель скважины; 5 – оголовок; 6 – подхват

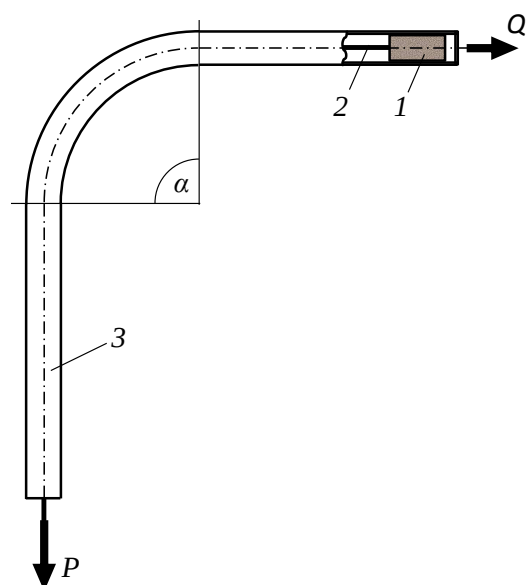


Рис. 2. Схема нагружения криволинейного анкера:

1 – замок (резиновый цилиндрик);
2 – тросовая тяга; 3 – металлическая трубка; α – угол изгиба «скважины»;
 Q – сила сопротивления замка анкера выдергиванию; P – выдергивающая сила

Опыт проводился на лабораторном макете тросового анкера, который состоял из резинового цилиндрика 1, выполняющего функцию замка, и закрепленной в нем стальной тросовой тяги 2. Анкер размещался в металлической

трубке 3, имитирующей скважину в горной породе и имеющей внутренний диаметр 6 мм. Сопротивление замковой части анкера выдергиванию обеспечивалось за счет сил трения между стенкой трубки 3 и цилиндром 1, поперечный размер которого несколько превышал диаметр «скважины» и потому входил в нее с некоторым натягом. Выдергивающая сила P прикладывалась вручную и измерялась посредством динамометра. Нагружение анкера велось с постепенным увеличением усилия выдергивания до момента страгивания замка; фиксировались страгивающие значения P , т. е., несущая способность анкера. Сначала был проведен эксперимент с прямой трубкой, т. е. при $\alpha = 0^\circ$, таким образом была установлена несущая способность Q замка. Затем трубка изгибалась с шагом 15° до достижения углом α значения 90° . Значения выдергивающей силы замерялись на каждом шаге изгиба. Результаты эксперимента представлены на графике (рис. 3), из которого следует, что при увеличении угла изгиба скважины от 0° до 90° величина страгивающей силы возросла на 56 %. Это подтверждает полезность использования эйлеровского эффекта в анкерах, устанавливаемых в горных породах.

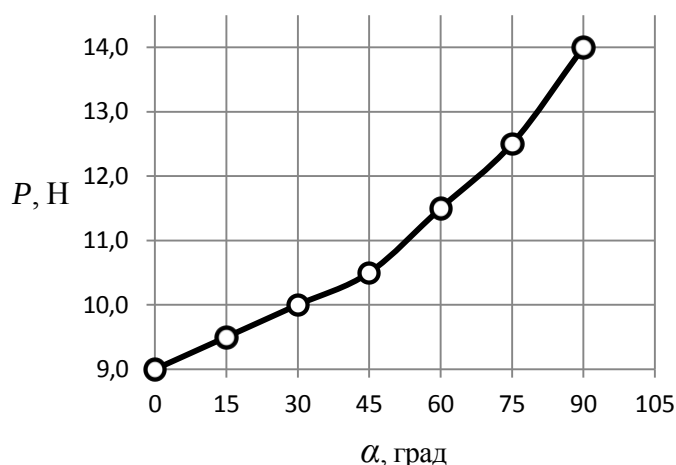


Рис. 3. Зависимость несущей способности P макета тросового анкера от угла α изгиба скважины

Целесообразно оценить эффективность реализации обсуждаемого подхода для массово применяемых современных типов анкеров, процедура установки которых может быть легко механизирована и автоматизирована. К таковым, в частности, относятся гидрораспорные анкера, которые уже более 30 лет используются на подземных горных предприятиях [23–25]. Устройство и принцип работы гидрораспорного анкера показаны на рис. 4 [26] на примере продукта Swellex [23]. Представляет он собой трубку с исходным внешним диаметром 42 мм, которую при изготовлении сворачивают, придавая в поперечном сечении С-образную форму и диаметр 25–28 мм. Скважина для такого анкера имеет поперечник 32–39 мм, поэтому трубка вставляется в нее без усилия. Активиру-

ется анкер путем закачки в него воды под высоким (~ 300 бар) давлением, которое раздувает свернутую трубку до ее тесного контакта со стенками скважины. После этого давление сбрасывают и анкер удерживается в скважине контактными напряжениями между трубкой и горной породой, возникающими под действием ее упругого восстановления, а также благодаря неровностям стенки скважины. По нашим оценкам, полученным на основании известных результатов испытаний анкеров Swellex [5], остаточные контактные напряжения составляют ~ 10 бар.

На настоящий момент известен ряд публикаций, которые посвящены проведенным различными методами и для различных условий исследованиям механического поведения гидрораспорных анкеров [6, 27–31]. Однако во всех из них рассматриваются стандартные прямолинейные конструкции. Оценим эффект от выполнения гидрораспорного анкера криволинейным. На рис. 5 представлена схема расчета страгивающего значения выдергивающей силы T , которая приложена к трубке, имеющей поперечный радиус r , радиус пространственной кривизны R ($R \gg r$), и нагруженной изнутри гидростатическим давлением p . Рассмотрим равновесие кольцевого элемента $d\Omega$ трубки, имеющего бесконечно малую длину dl (см. рис. 5). Для удобства вывода разделим трубку на нижнюю и верхнюю части по кольцу, проходящему через ось трубки (на рис. 5 показано штриховой линией).

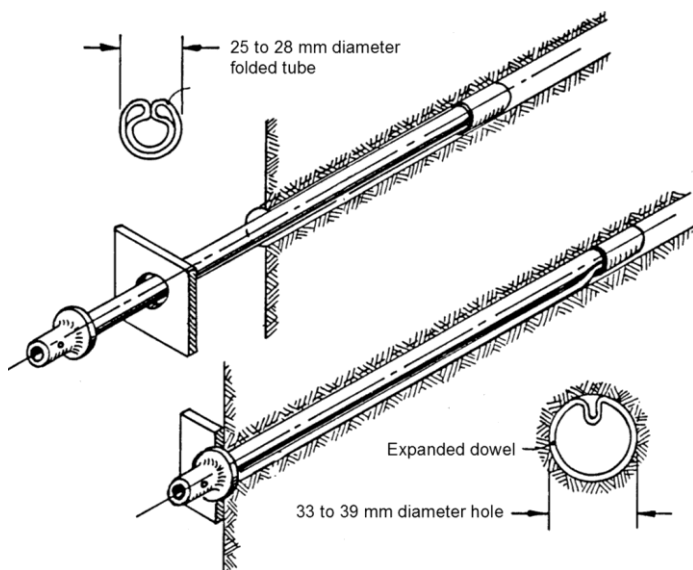


Рис. 4. Устройство и принцип работы гидрораспорного анкера Swellex [26]

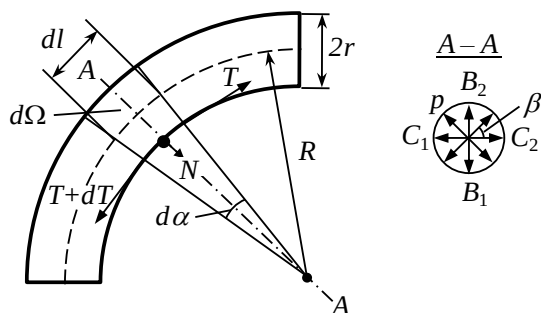


Рис. 5. Схема расчета выдергивающего усилия для криволинейного гидрораспорного анкера

При этом силы, действующие на эти части трубки, обозначим верхними индексами « b » (bottom, низ) и « t » (top, верх) соответственно. Также введем нижние индексы, указывающие на причины возникновения сил: « e » – эйлеровский эффект, « p » – давление p .

При данной постановке задачи страгивающая выдергивающая сила T представляет собой сумму выдергивающих сил, приложенных к нижней и верхней частям трубки T^b и T^t соответственно:

$$T = T^b + T^t. \quad (1)$$

Для их нахождения рассмотрим нормальные силы, действующие на рассматриваемый элемент. К его нижней части приложена нормальная сила

$$N^b = N_e^b + N_p^b, \quad (2)$$

где N_e^b – ее эйлеровская компонента, N_p^b – гидростатическая компонента.

Для вывода формул этих компонент спроецируем действующие элементарные давления на плоскость изгиба трубки. Рассмотрим нижнюю часть трубки. В сечении А–А трубки (см. рис. 5) кривизна образующих трубки по отношению к нормальям, проведенным к ее поверхности, меняется от $d\alpha$ в нижней точке B_1 сечения трубки до нуля в точках C_1 и C_2 по закону $\sin \beta d\alpha$. С учетом этого получим:

$$N_e^b = (2 / \pi) T^b d, \quad (3)$$

где T^b – касательная компонента силы, действующая на нижнюю часть $d\Omega$. На нее же действует сила от давления p :

$$N_p^b = pds, \quad (4)$$

где $ds = \pi r dl$ – площадь поверхности нижней части $d\Omega$, $dl = R d\alpha$.

С учетом (2)–(4) бесконечно малое приращение силы T^b , действующей на рассматриваемый элемент, может быть выражено как

$$dT^b = fN^b = (2 / \pi) f(T^b + 0,5\pi^2 rRp) d. \quad (5)$$

Решением дифференциального уравнения (5) является

$$T^b = (T_0^b + 0,5\pi^2 rRp) e^{(2/\pi) f \alpha} - 0,5\pi^2 rRp,$$

где T_0^b – внешняя удерживающая сила, приложенная к нижней части трубки. При стандартной схеме установки анкера Swellex в скважину эта компонента отсутствует. Приравняв ее нулю ($T_0^b = 0$) получим

$$T^b = 0,5\pi^2 rRp (e^{(2/\pi) f \alpha} - 1). \quad (6)$$

Проведем аналогичные выкладки для верхней части трубки. Учитывая, что кривизна образующих трубки по отношению к нормальям, проведенным к ее поверхности, меняется от 0 в точках C_1 и C_2 сечения трубки А–А до $-d\alpha$ в точке B_2 по закону $\sin \beta d\alpha$ получим

$$N^t = N_p^t - N_e^t,$$

где N_p^t – гидростатическая компонента, N_e^t – эйлеровская компонента.

Далее, опустив выкладки, аналогичные проведенным при выводе формулы для T^b , получим

$$T^t = (T_0^t - 0,5\pi^2 rRp) e^{-(2/\pi)f\alpha} + 0,5\pi^2 rRp,$$

где T^t – выдергивающая сила, действующая на верхнюю часть трубки. Приравняв внешнюю удерживающую силу, приложенную к верхней части трубки, нулю ($T_0^t = 0$), имеем

$$T^t = 0,5\pi^2 rRp (1 - e^{-(2/\pi)f\alpha}). \quad (7)$$

Принимая во внимание (1), сложив (6) и (7), получим окончательную формулу для расчета выдергивающей силы T :

$$T = 0,5\pi^2 rRp \left[\left(e^{(2/\pi)f\alpha} - 1 \right) + \left(1 - e^{-(2/\pi)f\alpha} \right) \right]. \quad (8)$$

Обсуждение

Расчеты по формуле (8) приводят к неожиданному на первый взгляд результату: изгиб гидрораспорного анкера даже на такой большой угол как 90° практически не дает приращения его несущей способности. Например, для прямолинейного анкера типа Swellex, устанавливаемого в скважину диаметром 39 мм и имеющего стандартную длину 3 м, при $f = 0,3$ и $p = 10$ бар (принято значение эквивалентное остаточным контактным напряжениям), несущая способность составляет 11,3 т. Тот же анкер, но установленный в скважину, изогнутую на 90° , имеет несущую способность 11,5 т. В данном случае ее прирост составляет всего 0,2 т, т. е. около 1,8 %. Причина этого в том, что при искривлении анкера нормальное давление на стенки скважины по внутреннему радиусу кривизны увеличивается, а по внешнему радиусу уменьшается, в результате чего приращение сопротивления выдергиванию нивелируется.

Заключение

Установлено, что искривление гидрораспорного анкера не приводит к желаемому увеличению его предельного сопротивления выдергиванию. Это явля-

ется следствием двоякого действия нормальной силы, возникающей при осевом растяжении искривленного трубчатого элемента. По внутреннему радиусу кривизны анкера она увеличивает нормальное давление на трубку. В то же время, по внешнему радиусу кривизны она действует на отрыв трубки от стенки скважины, снижая нормальное давление и, соответственно, силу трения. Вследствие этого прирост сопротивления конструкции выдерживанию нивелируется. Таким образом, с точки зрения повышения несущей способности гидрораспорного анкера, выполнение его криволинейным, в отличие от анкера с гибкой тягой, является мерой неэффективной и, соответственно, нецелесообразной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Li, C. Rockbolting. Principles and Applications. – Cambridge, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2017. – 271 p.
2. Wang, S., Hagan, P.C., Cao, C. Advances in rock support and geotechnical engineering. – Cambridge, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2016. – 412 p.
3. De la Vergne, J.N. Hard rock miner's handbook. – 5th edition. – Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2014. – 314 p.
4. Darling, P. (ed.). SME Mining Engineering Handbook. – Littleton, CO, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. – 2011. – 2083 p.
5. Stillborg B. Professional users handbook for rock bolting. – Series on rock and soil mechanics, No.18. – Germany, Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1994. – 164 p.
6. Performance of the Swellex bolt in hard and soft rocks / Li, C. // Villaescusa, E., Windsor, C.R., Thompson, A.G. (eds). Rock Support and Reinforcement Practice in Mining. Proceedings of the International Symposium on Ground Support, Kalgoorlie, Western Australia, 15–17 March, 1999. – Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema, 1999. – Pp. 103–108.
7. Razumov, E.A., Klishin, V.I., Opruk, G.Y. et al. Rockbolting improvement in coal mines in permafrost regions // Journal of Mining Science. – 2016. – Vol. 52. – No. 5. – Pp. 949–955.
8. Li, C. Principles of rockbolting design // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2017. – Vol. 9. – No. 3. – Pp. 396–414.
9. Waclawik, P., Snuparek, R., Kukutsch, R. Rock bolting at the room and pillar method at great depths // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 191. – Pp. 575–582.
10. Masoudi, R., Sharifzadeh, M. (в печати). Reinforcement selection for deep and high-stress tunnels at preliminary design stages using ground demand and support capacity approach // International Journal of Mining Science and Technology.
11. Selecting an optimal ground support system for rockbursting conditions / Louchnikov, V., Sandy, M.P. // Wesseloo, J. (ed.) Deep Mining 2017: Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining. Perth, Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2017. – Pp. 613–624.
12. Shirzadegan, S., Nordlund, E., Zhang, P. Large scale dynamic testing of rock support at Kiirunavaara – Improved test design // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2016. – Vol. 59. – Pp. 183–198.
13. Shirzadegan, S., Nordlund, E., Zhang, P. Large scale dynamic testing of rock support system at Kiirunavaara underground mine // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2016. – Vol. 49. – No. 7. – Pp. 2773–2794.
14. Islam, M.K., Islam, M.R. Stress characterization and support measures estimation around a coalmine tunnel passing through jointed rock masses: constraints from BEM simulation // International Journal of Advanced Geosciences. – 2016. – Vol. 4. – No. 2. – Pp. 21–27.

15. Zhang, Z., Wang, W., Li, S. et al. Analysis on rockbolt support interaction with roof dilatancy above roadside backfill area in gob-side entry retaining // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2018.
16. Nicholson, L., Hadjigeorgiou, J. Interpreting the results of in situ pull tests on Friction Rock Stabilizers (FRS) // *Mining Technology*. – 2018. – Vol. 127. – No. 1. – Pp. 12–25.
17. Стажевский С.Б., Крамаджян А.А., Русин Е.П., Хан Г.Н. Пат. 2457293 Российская Федерация, МПК E02D 5/80. Способ сооружения грунтового анкера; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Сибирского отделения РАН. – № 2011101239/03; заявл. 12.01.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.
18. Kramadzhyan, A. A., Rusin, E. P., Stazhevsky, S. B., Khan, G. N. Enhancement of load-bearing capacity of ground anchors with flexible tendon // *Journal of Mining Science*. – 2015. – Vol. 51. – No. 2. – Pp. 314–322.
19. Крамаджян А.А., Русин Е.П., Стажевский С.Б., Хан Г.Н. Об улучшении нагрузочной характеристики грунтовых анкеров с гибкой тягой // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. – 2015. – Т.2. – № 3. – С. 107–111.
20. Русин Е. П., Хан Г. Н. Грунтовые анкеры с гибкой тягой и промежуточной опорой: технология установки, метод расчета // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. – 2017. – Т.2. – № 2. – С. 117–120.
21. Meriam, J.L., Kraige, L.G., Bolton, J. N. *Engineering Mechanics: Statics*. 8th SI edition. – New York, NY, USA: J. Wiley & Sons, 2016. – 528 p.
22. Стажевский С.Б., Колимбас Д., Крамаджян А.А., Кашин Ю.М. Пат. 2061872 Российская Федерация, МПК E21D 20/00. Способ установки анкера; заявитель и патентообладатель Институт горного дела СО РАН. – № 5032403/03; заявл. 16.03.1992; опубл. 10.06.1996, Бюл. № 16.
23. Wijk, G. M., & Skogberg, B. Mining improvement with Swellex // Stephansson, O. (ed.) *Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting*, Abisko, Sweden, August 28 – September 2, 1983. – Rotterdam: A.A. Balkema, 1984. – P. 439–443.
24. Panet M. Two case histories of tunnels through squeezing rocks // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 1996. – Vol. 29. – Pp. 155–164.
25. Sandbak, L.A., Rai, A.R. Ground support strategies at the Turquoise Ridge joint venture, Nevada // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2013. – Vol. 46. – Pp. 437–454.
26. Hoek, E., Wood, D.F. Support in underground hard rock mines // Udd, J. (ed.) *Underground Support Systems*. – Montreal, Canada: Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1987, Sp. Vol. 35. – Pp. 1–6.
27. Li, C. Analysis of inflatable rock bolts // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2016. – Vol. 49. – No. 1. – Pp. 273–289.
28. Kim, S., Youn, H., Kim, K. Analytical analysis of pullout resistance of the hydraulic expansion rockbolts on a frictionally coupled model // *Journal of Mountain Science*. – 2016. – Vol. 13. – No. 12. – Pp. 2249–2259.
29. Chang, Q., Zhou, H., Xie, Z, et al. Anchoring mechanism and application of hydraulic expansion bolts used in soft rock roadway floor heave control // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2013. – Vol. 23. – P. 323–328.
30. Dynamic inflatable, friction rockbolt for deep mining / Scolari, F., Brandon, M., Krekula, H. // Wesseloo, J. (ed.) *Deep Mining 2017: Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. – Perth, Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2017. – Pp. 763–772.
31. Wang, G., Liu, C., Jiang, Y. et al. Rheological model of DMFC rockbolt and rockmass in a circular tunnel // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Vol. 48. – Pp. 2319–2357.

REFERENCES

1. Li, C. (2017). *Rockbolting. Principles and Applications*. Cambridge, MA, USA: Butterworth-Heinemann.
2. Wang, S., Hagan, P.C., Cao, C. (2016). *Advances in rock support and geotechnical engineering*. Cambridge, MA, USA: Butterworth-Heinemann.
3. de la Vergne, J.N. (2014). *Hard rock miner's handbook. Edition 5*. Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting.
4. Darling, P. (ed.) (2011). *SME Mining Engineering Handbook*. Littleton, CO, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
5. Stillborg, B. (1994). *Professional users handbook for rock bolting*. Series on rock and soil mechanics, No.18. Germany, Clausthal-Zellerfelt: Trans Tech Publications.
6. Li, C. (1999). Performance of the Swellex bolt in hard and soft rocks. *Villaescusa, E., Windsor, C.R., Thompson, A.G. (eds). Rock Support and Reinforcement Practice in Mining. Proceedings of the International Symposium on Ground Support, Kalgoorlie, Western Australia, 15–17 March, 1999*. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema. – Pp. 103-108.
7. Razumov, E.A., Klishin, V.I., Opruk, G.Y. et al. (2016). Rockbolting improvement in coal mines in permafrost regions. *Journal of Mining Science*, 52(5), 949–955. doi: 10.1134/S1062739116041453.
8. Li, C. (2017). Principles of rockbolting design. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(3), 396-414. doi: 10.1016/j.jrmge.2017.04.002.
9. Waclawik, P., Snuparek, R., Kukutsch, R. (2017). Rock bolting at the room and pillar method at great depths. *Procedia Engineering*, 191, 575 – 582. doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.220
10. Masoudi, R., Sharifzadeh, M. (in press). Reinforcement selection for deep and high-stress tunnels at preliminary design stages using ground demand and support capacity approach. *International Journal of Mining Science and Technology*. doi: 10.1016/j.ijmst.2018.01.004.
11. Louchnikov, V., Sandy, M.P. (2017). Selecting an optimal ground support system for rockbursting conditions. In Wesseloo, J. (ed.) *Deep Mining 2017: Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining* (613–624). Perth, Australia: Australian Centre for Geomechanics.
12. Shirzadegan, S., Nordlund, E., Zhang, P. (2016). Large scale dynamic testing of rock support at Kiirunavaara – Improved test design. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 59, 183–198. doi: 10.1016/j.tust.2016.07.005.
13. Shirzadegan, S., Nordlund, E., Zhang, P. (2016). Large scale dynamic testing of rock support system at Kiirunavaara underground mine. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (7), 2773–2794. doi: 10.1007/s00603-016-0939-7.
14. Islam, M.K., Islam, M.R. (2016). Stress characterization and support measures estimation around a coalmine tunnel passing through jointed rock masses: constraints from BEM simulation. *International Journal of Advanced Geosciences*, 4(2), 21–27. doi: 10.14419/ijag.v4i2.6196.
15. Zhang, Z., Wang, W., Li, S. et al. (2018). Analysis on rockbolt support interaction with roof dilatancy above roadside backfill area in gob-side entry retaining. *Geotechnical and Geological Engineering*. doi: 10.1007/s10706-018-0484-0.
16. Nicholson, L., Hadjigeorgiou, J. (2018). Interpreting the results of in situ pull tests on Friction Rock Stabilizers (FRS). *Mining Technology*, 127(1), 12–25. doi: 10.1080/14749009.2017.1296669.
17. Stazhevsky, S. B., Kramadzhyan, A. A., Rusin, E. P., Khan, G. N. (2012). Technique for construction of a soil anchor. *Patent RF No. 2457293*. Novosibirsk: IP Russian Federation [in Russian].
18. Kramadzhyan, A. A., Rusin, E. P., Stazhevsky, S. B., Khan, G. N. (2015) Enhancement of load-bearing capacity of ground anchors with flexible tendon // *Journal of Mining Science*, 51(2), 314-322. doi: 10.1134/S1062739115060320.

19. Kramadzhyan, A. A., Rusin, E. P., Stazhevsky, S. B., Khan, G. N. (2015). On improvement of load-displacement diagram of ground anchors with flexible tendon // *Interexpo GEO-Siberia 2*(3), 107–111 [in Russian].
20. Rusin, E. P., Khan, G. N. (2017). Ground anchors with a flexible tendon and an intermediate support: installation procedure, engineering calculation method // *Interexpo GEO-Siberia 2*(2), 117–120 [in Russian].
21. Meriam, J.L., Kraige, L.G., Bolton, J. N. (2016). *Engineering Mechanics: Statics* (8th SI Edition). New York, NY, USA: J. Wiley & Sons.
22. Stazhevsky, S. B., Kolymbas, D., Kramadzhyan, A. A., Kashin Yu.M. (1996). Technique for installation of an anchor. *Patent RF No. 2061872*. Novosibirsk: IP Russian Federation.
23. Wijk G, Skogberg B (1982) The inflatable rock bolting system. *Proceedings of the 14th Canadian Rock Mechanics Symposium*. Montreal, Canada: Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 106–115.
24. Panet M (1996). Two case histories of tunnels through squeezing rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29, 155–164.
25. Sandbak, L.A., Rai, A.R. (2013). Ground support strategies at the Turquoise Ridge joint venture, Nevada. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 437–454.
26. Hoek, E., Wood, D.F. (1987). Support in underground hard rock mines. In Udd, J. (ed.) *Underground Support Systems*. Montreal, Canada: Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Sp. Vol. 35, 1–6.
27. Li, C. (2016). Analysis of inflatable rock bolts. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(1), 273–289. doi: 10.1007/s00603-015-0735-9.
28. Kim, S., Youn, H., Kim, K. (2016). Analytical analysis of pullout resistance of the hydraulic expansion rockbolts on a frictionally coupled model. *Journal of Mountain Science* 13 (12), 2249–2259. doi: 10.1007/s11629-015-3708-2.
29. Chang, Q., Zhou, H., Xie, Z, et al. (2013). Anchoring mechanism and application of hydraulic expansion bolts used in soft rock roadway floor heave control. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23, 323–328. doi: 10.1016/j.ijmst.2013.05.017.
30. Scolari, F., Brandon, M., Krekula, H. (2017). Dynamic inflatable, friction rockbolt for deep mining. In Wesseloo, J. (ed.) *Deep Mining 2017: Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining* (763–772). Perth, Australia: Australian Centre for Geomechanics.
31. Wang, G., Liu, C., Jiang, Y. et al. (2015). Rheological model of DMFC rockbolt and rock mass in a circular tunnel. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 2319–2357. doi: 10.1007/s00603-014-0697-3.

© Е. П. Русин, Г. Н. Хан, 2018

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ НА СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА

Леонид Алексеевич Рыбалкин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com

Аркадий Николаевич Дробчик

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: a.n.drobchik@gmail.com

В данной работе описаны экспериментальные исследования с целью установить зависимость изменения скоростей фильтрации в проницаемой горной породе от параметров вибросейсмического поля приложенного к ней. Авторами предложен подход, заключающийся в серии воздействии на образец проницаемой горной породы при постоянном осевом и всестороннем сжатии, фильтрационном потоке упругими вибрационными колебаниями. В каждой серии изменяется амплитуда и частота колебаний, длительность одного эксперимента зависит от времени фильтрации определенного объема газа. Зная изначальный коэффициент проницаемости, а также рассчитанный для каждой частоты и амплитуды, получают зависимость скорости фильтрации газа от параметров вибросейсмического воздействия. Для проведения серий экспериментов авторами разработан специальный стенд, в качестве проницаемой горной породы выбран уголь. Осевое и всестороннее сжатие составляло 10 Атм, перепад давления при фильтрации составлял 3 Атм. Вибрационное воздействие долговременное (сезоны до суток каждый, вся серия – несколько месяцев); монохроматическое частотой 40–240 Гц; интенсивность 0,2–130 Вт/м²; поперек фильтрационного потока азота в угле. Полученные результаты показывают перспективность вибросейсмического воздействия для ускорения фильтрации газа в углях, что может быть полезным для интенсификации дегазации угольных пластов в шахтных условиях.

Ключевые слова: вибровоздействие, проницаемость, упругие колебания, уголь, стенд, фильтрация газа, дегазация.

EXPERIMENTAL STAND AND RESULTS OF RESEARCH ON ELASTIC OSCILLATIONS DEPENDENCE ON GAS FILTRATION VELOCITY

Leonid A. Rybalkin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D. Student, Junior Researcher, phone: (383)335-96-42, e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com

Arkasy N. Drobchik

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, phone: (383)335-96-42, e-mail: a.n.drobchik@gmail.com

The article describes experimental studies aimed at determination of the dependence of filtration rate changes in permeable rock on the applied to it vibroseismic field parameters. The authors have proposed an approach involving a series of impacts on the sample of a permeable rock with constant axial and triaxial compression and filtration flow by elastic vibration oscillations. In each

series, the amplitude and frequency of oscillations vary; the duration of an experiment depends on the filtration time of a certain gas volume. With the help of the initial permeability coefficient and calculated for each frequency and amplitude, the dependence of the gas filtration rate on the parameters of the vibroseismic impact is obtained. The authors have developed a special stand to carry out a series of the experiments. Coal has been chosen as a sample of a permeable rock. The axial and triaxial compression has been equal to 10 Atm, the pressure drop during filtration has been equal to 3 Atm. Vibration effect is long-term (each session duration is up to 24 hours, the whole series of the experiments takes several months); monochromatic effect has frequency of 40–240 Hz; intensity of 0,2–130 W/m², and it acts across the filtration flow of nitrogen in the coal. The obtained results show the prospectivity of vibroseismic action for accelerating the filtration of gas in coals, which can be useful for intensifying degassing of coal seams in mine conditions.

Key words: vibration effect, permeability, elastic oscillations, coal, stand, gas filtration, degassing.

Введение

При разработке углепородного массива шахтным способом, одной из важнейших задач экономически выгодной и безопасной работы горного предприятия является своевременное удаление каптированного в угольном пласте газа метана. Достижение необходимой степени дегазации в неразгруженном углепородном массиве осложняется такими факторами, как слаборазвитая сеть естественных трещин, блокировка пластовой воды в микротрещинах пласта и др. [1, 2].

Повышение эффективности предварительной дегазации угольных пластов предполагает интенсификацию десорбции метана, что экономически оправданно при использовании малоэнергетических нетепловых физических воздействий. Одним из перспективных методов является воздействие на углепородный массив вибросейсмическими колебаниями[3].

В настоящее время многие работы посвящены изучению возможного положительного влияния акустического воздействия частотой 1–3 КГц за счет ослабления связей между скелетом породы и молекулами газа, теплового эффекта [4–6]. Исследования на более низких частотах проводятся крайне редко и не имеют надежной теоретической основы. Развитие подходов и технических средств в области изучения вибросейсмического воздействия на углепородный массив позволит создать теоретическую основу для новых методов и средств повышения предварительной дегазации.

Проведение исследований влияния вибросейсмических колебаний на фильтрационную способность угля предполагают решение следующих технических задач:

- приложение к исследуемому образцу напряженного состояния и постоянного потока газа, имитирующих процесс метаноотдачи из неразработанного пласта;
- обеспечение непрерывного вибросейсмического воздействия с возможностью изменения амплитуды и частоты колебаний в процессе исследований;
- разработка системы контроля времени и объема профильтрованного газа для определения коэффициента проницаемости.

Для проведения серии исследований влияния вибросейсмического воздействия на скорости фильтрации газа в образце проницаемой горной породы был разработан экспериментальный стенд, который состоит из нескольких частей: блок вибрационного воздействия, фильтрационная камера, блок регистрации, пневматическая линия.

Экспериментальный стенд

Фильтрационная камера (рис. 1) сделана из нержавеющей стали и рассчитана на давление до 300 Атм. Она состоит из обоймы и пневмоцилиндра с манжетой 1, шайбы 2, фторопластовых прокладок 3, корпуса 4, крышки 5, стопорных колец 6.

В полной сборке, вес камеры вместе с образцом не превышает 800 грамм, что позволяет проводить виброобработку маломощными источниками колебаний. Фильтрация газа через образец организована следующим образом. Камера имеет 4 линии, не сообщающиеся между собой, линии соединяются рукавами высокого давления с редукторами газовых балонов. Газ поступает в линию на крышке 5, далее фильтруется через горную породу и выходит через пневмоцилиндр в боковую линию обоймы 1. Линия в корпусе камеры позволяет создавать всестороннее сжатие образца. В торце обоймы пневмоцилиндра расположена линия, подача газа через которую приводит в движение пневмоцилиндр и обеспечивает осевое сжатие образца. Контроль за темпом подачи газа осуществляют редукторами и стрелочными манометрами.

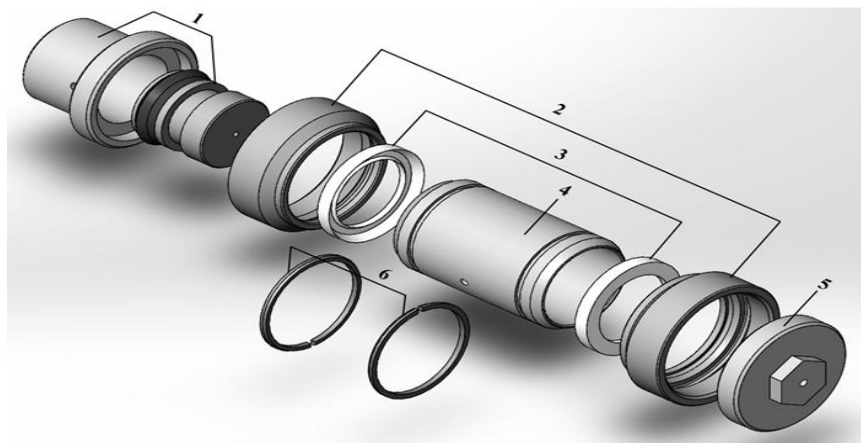


Рис. 1. Общий вид камеры:

1 – обойма и пневмоцилиндр с манжетой; 2 – шайбы; 3 – фторопластовые прокладки; 4 – корпус; 5 – крышка; 6 – стопорные кольца

При накручивании шайбы на крышку 5 и обойму 1 происходит поджатие резиновой оболочки закрепленной на корпусе камеры. Фторопластовые прокладки не позволяют порваться резине и обеспечивают герметичное соединение по всей окружности торца корпуса.

Сборка камеры и подготовка ее к работе осуществляется следующим образом. Перед проведением исследований выбранный образец помещается в резиновую оболочку, таким образом, чтобы края выступали на 15 мм с каждой стороны. Далее керн в резиновой оболочке помещают в корпус камеры и с каждой стороны наносят герметик, как показано на рисунке 3. После полной полимеризации герметика, надевают шайбы с каждой стороны и монтируют стопорные кольца. Излишки резиновой оболочки заворачивают на корпус камеры и закрепляют с помощью суперклея. Фторопластовые прокладки размещают на крышке 5 и обойме с пневмоцилиндром 1. Проверяют надежную фиксацию шайб стопорными кольцами и с помощью ключей накручивают на них крышку 5 и обойму 1. После сборки рекомендуется проверить герметичность при нагнетании давления в линию бокового обжима и осевого сжатия. После полной сборки, камеру размещают на специальной платформе генератора колебаний.

Блок вибрационного воздействия (рис. 2) включает в себя: генератор сигналов специальной формы, генератор вибросейсмических колебаний, систему регистрации колебаний в составе трех геофонов, подключенных к аналого-цифровому преобразователю DaqPad 6015 National instruments. Через модули сбора, данные поступают на АЦП устройства, затем посредством USB передаются на компьютер.

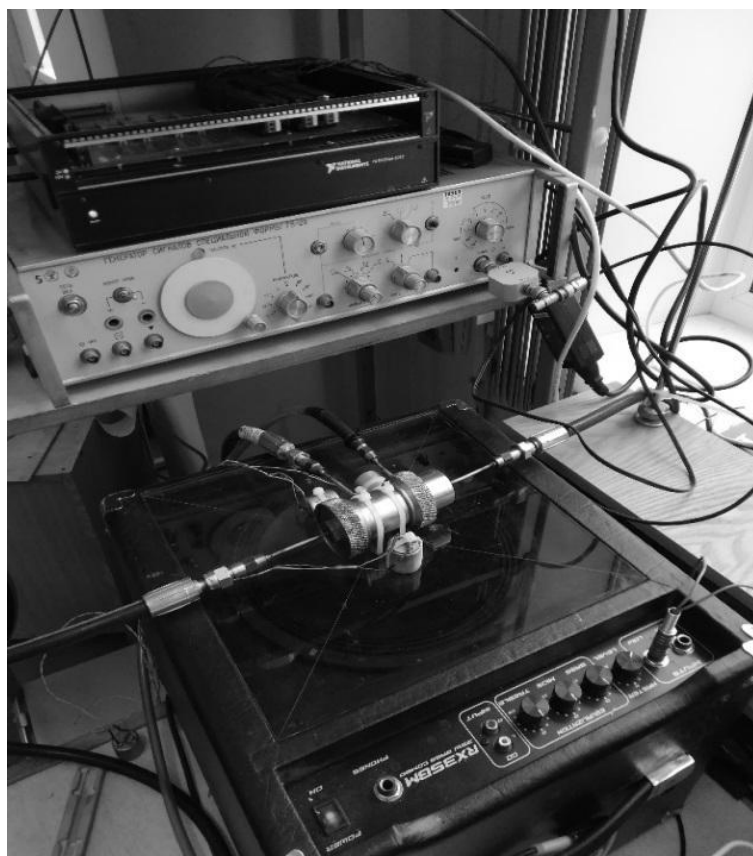


Рис. 2. Общий вид блока вибрационного воздействия с размещенной и подключенной фильтрационной камерой

Работа блока осуществляется следующим образом. На генераторе сигналов устанавливается необходимый уровень, форма и частота колебаний. На блоке генератора задается амплитуда. В среде Labview написана программа в которой происходит визуализация сигналов, отображается частота, амплитуда и амплитудный спектр сигналов. Данные могут быть экспортированы в Excel для дальнейшей обработки. Программа может быть запущена однократно или несколько раз в течении эксперимента для контроля вибрационного воздействия.

Регистрация профильтрованного объема газа осуществляется следующим образом. На мерный сосуд предварительно монтируют светодиодную ленту и гирлянду последовательно расположенных оптических датчиков. Датчики располагаются на специальной рейке, где отмечены места расположения светочувствительных элементов. В экспериментах использовалось 5 датчиков с 4 проверочными интервалами. Внешняя поверхность сосуда искусственно затемняется, жидкость, используемая в эксперименте – подкрашивается. Это необходимо для корректной работы светочувствительных элементов датчиков. Общий вид блока регистрации представлен на рис. 3.



Рис. 3. Блок регистрации объема профильтрованного газа

Применение датчиков на платформе ARDUINO позволяет исключить необходимость постоянного контроля за объемами вытесняемой жидкости. Так, гирлянда датчиков подключается к компьютеру и по средствам программного обеспечения LabView происходит запись не только показаний всех датчиков в формате «00000» и «11111», но также даты и времени начала эксперимента, времени срабатывания каждого датчика, изменении температуры.

Ход экспериментов и результаты

Серии экспериментальных исследований проводились на керне низкопроницаемого угля при параметрах осевого и всестороннего сжатия – 10 Атм., перепад давления фильтрации газа составлял 3 Атм. Параметры вибросейсмического воздействия были выбраны следующим образом. Частотный диапазон составил от 40 до 240 Гц, причем на частотах с 40 до 80 Гц шаг составлял 20 Гц, а на частотах с 80 до 240 Гц он составил 40 Гц. На каждой частоте было решено провести по три исследования с минимальной, медиальной и максимальной амплитудой смещения геофонов. Результатом серии исследований на одной частоте являются:

- три таблицы в формате Excel с записанными сигналами смещений геофонов для каждой амплитуды соответственно;
- три текстовых файла с временами срабатывания оптических датчиков на блоке регистрации;
- значения всестороннего и осевого сжатия, перепада давления фильтрации, для каждого эксперимента постоянны.

Обработка результатов проводилась следующим образом. Из сигнала с вертикального геофона для определенной частоты и амплитуды колебаний, с помощью преобразования Фурье, получали амплитудный спектр. После рассчитывали спектр смещения и с его помощью получали значения интенсивности колебаний. Определение коэффициента абсолютной газопроницаемости – один из стандартных видов лабораторных исследований свойств горных пород, применяемых при решении задач горного дела и подземного строительства. Времена фильтрации газа через керн угля записываются с помощью программы в текстовый файл, из него берутся значения времени для каждого интервала между светочувствительными датчиками. Усредненное значение времени используется для расчета коэффициента проницаемости K [7, 8]. На рис. 4 представлены зависимости приведенного значения коэффициента проницаемости от частоты и амплитуды вибрационного воздействия. На рис. 5 представлен трехмерный график зависимости приведенного значения коэффициента проницаемости от частоты и интенсивности вибрационного воздействия.

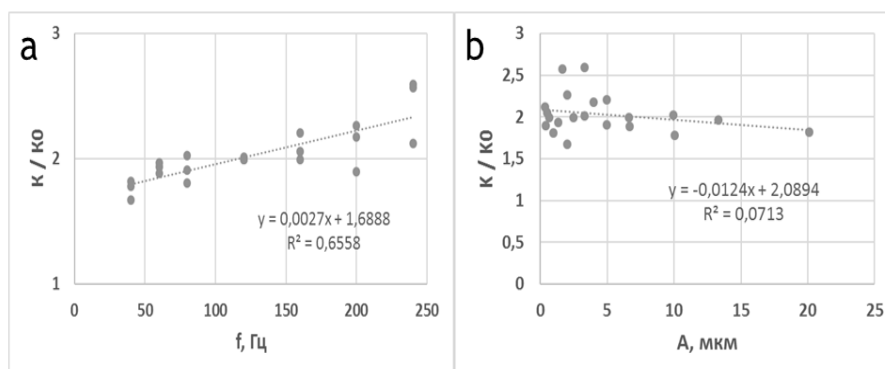


Рис. 4. Зависимость приведенного значения коэффициента проницаемости от (a) частоты и (b) амплитуды вибрационного воздействия

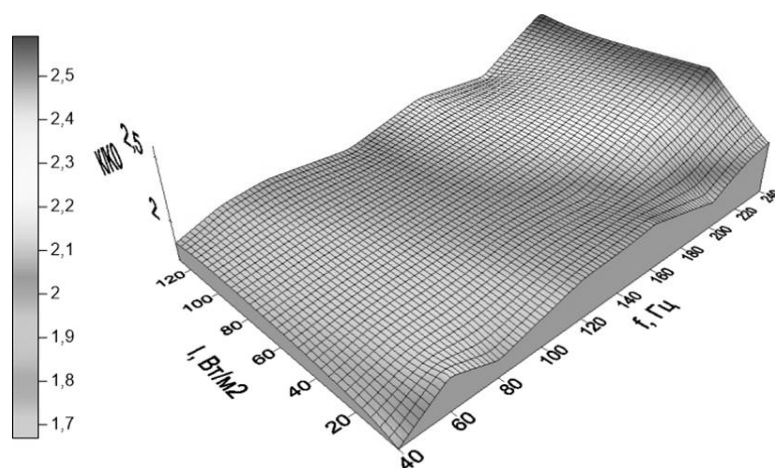


Рис. 5. Трехмерное изображение изменения приведенного коэффициента проницаемости в ходе всей серии экспериментов

Заключение

Исходя из полученных результатов, по проведению исследования влияния долговременного монохроматическоговибрационного воздействия (сеансы до суток каждый, вся серия – несколько месяцев) частотой 40–240 Гц с интенсивностью 0,2–130 Вт/м², направленного поперек фильтрационного потока газа азота в угле, можно заключить следующее:

- вибрационное воздействие увеличивает проницаемость угля до 2,6 раз, эффект зависит от частоты вибрации;
- зависимость эффекта от амплитуды колебаний в диапазоне 0,1–20 мкм не выявлена;
- положительное долговременное последствие вибрации (несколько месяцев). Увеличение проницаемости до 2 раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патутин А. В., Тимонин В. В., Кондратенко А. С., Рыбалкин Л. А. Комплексные исследования угольных пластов в глубоких скважинах // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 23–26.
2. Сердюков С. В., Дегтярева Н. В., Патутин А. В., Рыбалкин Л. А. Скважинный прецизионный дилатометр с интегрированной системой транспортирования вдоль ствола скважины // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2015. – № 4. – С. 198–203.
3. Сердюков С. В., Рыбалкин Л. А., Азаров А. В., Дергач П. А., Сердюков А. С. Скважинный вибрационный источник для сейсмического воздействия на призабойную зону породного массива // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2016. – № 5. – С. 186–204.
4. Jiang, Y., Song, X., Liu, H., Cui, Y. Laboratory measurements of methane desorption on coal during acoustic stimulation // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2013. – Vol. 78. – P. 10–18.

5. Wang, Z., Ma, X., Wei, J., Li, N. Microwave irradiation's effect on promoting coalbed methane desorption and analysis of desorption kinetics // *Fuel*. – 2018. – Vol. 222. – P. 56–63.
6. Zhang, J., Li, Y. Ultrasonic vibrations and coal permeability: Laboratory experimental investigations and numerical simulations // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27. – №. 2. – P. 221–228.
7. Sander R., Pan Z., Connell L. D. Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: a review of experimental methods, *J. of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, Vol. 37. – P. 248–279.
8. Heller R., Vermylen J., Zoback M. Experimental investigation of matrix permeability of gas shales, *AAPG bulletin*, 2014, Vol. 98, No. 5. – P. 975–995.

REFERENCES

1. Patutin A.V., Timonin V.V., Kondratenko A.S., Rybalkin L.A. Integrated deep-borehole study of coal beds // *Journal of Fundamental and Applied Mining Sciences*. – 2014. – Vol. 1. – № 2. – P. 23–26.
2. Serdyukov S.V., Degtyareva N.V., Patutin A.V., Rybalkin L.A. Precision dilatometer with built-in system of advance along the borehole // *Journal of Mining Science*. – 2015. – Vol. 51. – № 4. – P. 860–864.
3. Serdyukov S.V., Rybalkin L.A., Dergach P.A., Serdyukov A.S., Azarov A.V. Down-the-hole unbalance vibration exciter for seismic treatment of bottom-hole zone // *Journal of Mining Science*. 2016. T. 52. № 5. C. 1024–1030.
4. Jiang, Y., Song, X., Liu, H., Cui, Y. Laboratory measurements of methane desorption on coal during acoustic stimulation // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2013. – Vol. 78. – P. 10–18.
5. Wang, Z., Ma, X., Wei, J., Li, N. Microwave irradiation's effect on promoting coalbed methane desorption and analysis of desorption kinetics // *Fuel*. – 2018. – Vol. 222. – P. 56–63.
6. Zhang, J., Li, Y. Ultrasonic vibrations and coal permeability: Laboratory experimental investigations and numerical simulations // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27. – №. 2. – P. 221–228.
7. Sander R., Pan Z., Connell L. D. Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: a review of experimental methods, *J. of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, Vol. 37. – P. 248–279.
8. Heller R., Vermylen J., Zoback M. Experimental investigation of matrix permeability of gas shales, *AAPG bulletin*, 2014, Vol. 98, No. 5. – P. 975–995.

© Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик, 2018

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ ДЕБАЛАНСА В ЖИДКОСТИ***Андрей Владимирович Савченко***

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, научно-инженерный центр горных машин и геотехнологий, тел. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

Дмитрий Сергеевич Евстигнеев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, научно-инженерный центр горных машин и геотехнологий, тел. (983)127-88-52, e-mail: rdx0503@gmail.com

Михаил Николаевич Цупов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, ведущий инженер НИЦ, тел. (383)217-05-25, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

Разрабатывается источник дебалансного типа, способный работать с заполненной жидкостью камерой. Показана актуальность его применения на нефтяных месторождениях глубокого залегания. Источник может работать с винтовыми насосами на глубине залегания нефтяного пласта. В программном комплексе ANSYS Fluid Flow (Fluent) проведено численное моделирование вращения дебаланса в жидкости. Рассчитано стационарное распределение давления жидкости на миделево сечение лопасти дебаланса в стандартных условиях, из которого определен коэффициент лобового сопротивления. Из решения уравнений гидродинамики с вращающейся подобластью найдена величина максимальной мощности, которой должен обладать привод для вращения дебаланса в жидкости. Расчеты выполнены для частоты вращения источника 5 Гц. Для определения турбулентной вязкости использована стандартная двухпараметрическая модель турбулентности.

Ключевые слова: источник дебалансного типа, вращение в жидкости, нефть.

NUMERICAL MODELING OF DEBALANCE ROTATION IN A FLUID***Andrey V. Savchenko***

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Mining Machinery and Geotechniques Research Center, phone: (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

Dmitry S. Evstigneev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher of Mining Machinery and Geotechniques Research Center, phone: (983)127-88-52, e-mail: rdx0503@gmail.com

Mikhail N. Tsupov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Principal Engineer, Research and Development Center, phone: (383)217-05-25, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

The unbalanced-type source capable to operate with a fluid-filled chamber is being developed. The urgency of its application in oil fields of deep occurrence is shown. This source can be used with screw pumps at depth of oil-reservoir occurrence. Numerical modeling for unbalance rotation in fluid is carried out in ANSYS Fluid Flow (Fluent) software system. Steady-state distribution of fluid pressure on the midship section of unbalance blade under standard conditions is calculated. The drag coefficient is determined from the fluid pressure distribution. The value of maximum power, which the drive for unbalance rotation should possess, is found from the equations of hydrodynamics with rotating subdomain. Calculations are performed for the source rotation frequency of 5 Hz. A standard two-parameter model of turbulence is used to determine turbulent viscosity.

Key words: debalance source, rotation in fluid, oil.

Введение

Проблеме интенсификации притока нефти, при скважинном способе ее добычи, уделено много внимания в работах [1–4]. Наибольшую эффективность показал метод вибровоздействия на призабойную зону скважинными источниками, с целью ее очистки и увеличения дебита нефти [5–8]. Его неоспоримым преимуществом является длительное воздействие на пласт низкочастотными гармоническими колебаниями и автономность использования, особенно совместно со штанговыми насосами, глубина применения которых ограничена 1 400 метрами. Добыча нефти с больших глубин осуществляется электроцентробежными или винтовыми насосами. Нами был разработан виброисточник дебалансного типа [9,10], способный работать на глубинах свыше 1 400 метров с имеющимися видами насосов. Гармонические колебания, возникающие при вращении груза, выполненного в форме полуцилиндра, создаются за счет дисбаланса центра масс относительно оси вращения вала. Источник передает колебания непосредственно в продуктивный пласт. Предполагается использовать скважинный виброисточник с приводом от того же двигателя что и насос. Большая глубина и высокое давление флюида, не позволяет обеспечить надежную герметизацию внутренней камеры генератора колебаний. Проблему можно решить – полностью отказавшись от герметизации внутренней камеры. В таком случае в камеру попадет флюид и следует ожидать увеличение нагрузки на привод, возрастания потребляемой мощности электродвигателя и снижения продуктивности насоса. Возникает потребность оценить величину дополнительной мощности, затрачиваемой приводом для вращения дебаланса в жидкости. Для этого необходимо рассчитать момент сил, который можно найти, проинтегрировав распределение давления, рассчитанное для гребущей лопасти дебаланса [11]. Решив уравнения гидродинамики с вращающейся подобластью, определим распределение давления жидкости на дебалансе.

При расчете момента силы вращения дебаланса используются методы числительной гидродинамики, применяемые при проектировании миксеров, помп, насосов, турбин и других устройств с вращающимся ротором [12–19]. Методы решения уравнений гидродинамики с вращающейся подобластью и развитым режимом турбулентности приведены в работах [20–28]. Сравнению

результатов численного моделирования с экспериментом посвящены работы [29–32].

Основные уравнения движения жидкости во внутренней камере источника

Уравнение движения жидкости в векторной форме с учетом моментов конвекции, диффузии и массовых сил [33,34]:

$$\frac{\partial(\rho \vec{u}_r)}{\partial t} + \rho(\vec{u}_r \cdot \nabla) \vec{u}_r = -\nabla p - \nabla \cdot (\tau_L + \tau_T) + \vec{F}. \quad (1)$$

В левой части (1) стоят конвективные члены, а в правой ∇p – градиент давления; $\nabla \cdot \tau$ – дивергенция тензора напряжений, учитывающая момент диффузии; $\vec{F}$ – гравитационная и другие силы инерции. Замыкает систему – уравнение несжимаемости жидкости, которое с учетом постоянной плотности ρ имеет вид:

$$\nabla \cdot \vec{u}_r = 0. \quad (2)$$

Турбулентные свойства движущейся жидкости учитываются стандартной двухпараметрической $k - \varepsilon$ моделью, в которой τ – задается выражением:

$$\tau = \tau_L + \tau_T = -(\mu + \mu_T) \left[\nabla \vec{u}_r + \nabla \vec{u}_r^T \right] - \frac{2}{3} k \rho \mathbf{I}, \quad (3)$$

Здесь τ – сумма тензоров напряжений для ламинарного $\tau_L = \mu \nabla \vec{u}_r$ и турбулентного τ_T потоков; μ – молекулярная и μ_T – турбулентная вязкости; k – турбулентная кинетическая энергия; $\mathbf{I}$ – единичный тензор.

В области занятой жидкостью, в которой вращается дебаланс, действуют центробежная $\vec{F}_c$ и Кориолисова $\vec{F}_K$ силы инерции. Величина центробежной силы может быть определена из выражения:

$$\vec{F}_c = -\rho \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}). \quad (4)$$

Поскольку вращение дебаланса в жидкости осуществляется с угловой скоростью $\vec{\omega}$, величину силы Кориолиса, действующую на бесконечно малый объем жидкости на расстоянии $|\vec{r}|$ от оси вращения, можно определить из соотношения:

$$\vec{F}_K = -2\rho (\vec{\omega} \times \vec{u}_r). \quad (5)$$

Модель турбулентности

Условием существования ламинарного, переходного и турбулентного режимов течений служит коэффициент отношения кинетической энергии жидкости к ее потерям на характерную длину. Мера отношения сил инерции к силам вязкости в гидродинамике называют числом Рейнольдса и обозначают символом Re . Для потока жидкости в трубе круглого сечения число Рейнольдса определяется выражением [11]:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu}, \quad (6)$$

где ρ , μ – плотность и динамическая вязкость жидкости, u – осевая скорость потока, d – диаметр трубы. Если в трубу помещен дебаланс, вращающийся с угловой скоростью $\vec{\omega}$ в плоскости ортогональной направлению потока, то уравнение (6) заменится на [33]:

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega \cdot D^2}{\mu}, \quad (7)$$

в котором ω – величина угловой скорости вращения, рад/с, D – диаметр дебаланса.

Для переходного режима течения жидкости в трубе, диапазон изменения чисел Рейнольдса варьируется от 2 000 до 4 000, а для потока флюида в трубе с перемешиванием дебалансом $Re = 50 - 5\,000$ и зависит от числа Ньютона, N_p . Безразмерное число мощности или число Ньютона [15, 30, 35] можно определить зная потребляемую мощность двигателя (P , Вт), вращающего вал на котором смонтирован дебаланс, плотность перемешиваемой жидкости (ρ , кг/м³), величину угловой скорости вращения (ω , рад/с) и диаметр дебаланса (D , м):

$$N_p = \frac{P}{\rho \omega^3 D^5}. \quad (8)$$

Обычно значение числа Ньютона лежит в пределах 0,75–2,0 и уменьшается с увеличением числа Рейнольдса.

Оценить значение мощности (P , Вт), необходимой для вращения дебаланса в жидкости, можно вычислив произведение угловой скорости вращения ($\omega = 2\pi f$, рад/с) на момент силы (T_q , Н·м), полученный интегрированием распределения давления на миделево сечение лопасти дебаланса:

$$P = 2\pi \cdot f \cdot T_q. \quad (9)$$

С увеличением частоты вращения дебаланса возрастает скорость потока жидкости и число Рейнольдса. Характерный размер образовавшихся вихревых структур уменьшается, а временной масштаб пульсаций скорости и давления становится столь коротким, что численное решение уравнений Навье – Стокса практически невозможно. Развивается турбулентный режим течений. В таком случае отказываются от решения уравнений Навье – Стокса на разномасштабных сетках и применяют статистический подход, известный как усреднение по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS) [11, 12, 30, 33, 34]. Согласно подхода RANS скорость $\mathbf{u}$ и другие скалярные величины ϕ : давление, температуру, плотность –представляют суммой осредненных и пульсирующих компонент:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}', \quad \phi = \bar{\phi} + \phi'.$$

Полагают, что уравнение неразрывности (2) выполняется только для усредненной скорости, а в уравнении движения (1) вводят турбулентную вязкость μ_T , кинетическую энергию k и ее диссипативную часть ε , которые подлежат определению.

В стандартной двухпараметрической $k-\varepsilon$ модели турбулентности вязкость μ_T находят из решения уравнения [30, 33, 36]:

$$\mu_T = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon, \quad (10)$$

в котором C_μ – безразмерная константа. Для вычисления напряжений Рейнольдса τ уравнение (8) необходимо дополнить уравнением переноса для k и ε :

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_r \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon; \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_r \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{cases} \quad (11)$$

В системе уравнений (10-11) коэффициенты C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k и σ_ε – эмпирические константы, которые для стандартной $k-\varepsilon$ модели равны $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$. Коэффициент P_k – обобщенный источник турбулентности, который связан с инвариантом тензора деформаций $S = \sqrt{2S_{ij} \cdot S_{ij}} = \left| \nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right|$ выражением:

$$P_k = \mu_T S^2.$$

Метод решения уравнений гидродинамики с вращающейся подобластью

В работе [20] впервые был предложен метод расчета полей скоростей и давлений жидкости в миксере, который в последующем получил название замороженного ротора (frozen rotor) [22] или метода составных связанных областей (Multiple Reference Frame – MRF) [21, 23, 26, 28]. Область внутри сосуда, где происходит перемешивание жидкости дебалансом, условно разделяют на две подобласти: вращающуюся и неподвижную. В области, в которой вращается дебаланс, в решении уравнений движения жидкости (1) и неразрывности (2) учитывают угловую скорость $\vec{\omega}$. Напротив, в неподвижной области, в уравнении (1) силами инерции $\vec{F}$ пренебрегают, и полагают, что потоки здесь формируются вследствие массопереноса между подобластями. Относительная скорость $\vec{u}_r$ и абсолютная $\vec{u}$ в стационарной системе координат связаны соотношением: $\vec{u} = \vec{u}_r + \vec{\omega} \times \vec{r}$. Уравнения гидродинамики с установившимся режимом течений решаются одним из численных методов. Сеточная область остается статичной и в процессе счета сетка не меняется. В работах [20, 30] авторы приводят экспериментальные данные по смешиванию жидкости в сосуде и указывают на хорошее согласование с результатами численного моделирования на основе приведенного подхода.

Расчетная область. Начальные и граничные условия

Скважинный виброисточник для создания сейсмических колебаний, способный работать без герметизации в жидкости, состоит из внутренней камеры, вала и дебаланса. Дебаланс изготовлен из стали в форме полуцилиндра и приводится во вращение валом, на котором он закреплен. Такая геометрическая форма ему необходима для создания дисбаланса центра масс относительно оси вращения вала и эффективного перемешивания жидкости, находящейся внутри камеры. Расчеты выполнялись для плоского случая, т. е. расчетная область расположена перпендикулярно оси вращения вала, поскольку длина вала, дебаланса и камеры много больше ее диаметра. На рис. 1 приведена схема размещения дебаланса во внутренней камере источника заполненного жидкостью. Вся расчетная область $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ разбита на две подобласти: Ω_1 – в которой вращается дебаланс и неподвижную – Ω_2 . Дебаланс вращается по часовой стрелке с угловой скоростью $\vec{\omega}$ вокруг точки О, через которую проходит ось вращения.

Ось вращения дебаланса проходит через точку О, миделево сечение лопасти дебаланса – ОР, в точках М и N скорости потока жидкости направлены вдоль векторов $\vec{u}_r$ и $\vec{u}$, соответственно, точки О и М соединены радиус-вектором $\vec{r}$. Линия  определяет границу области Ω_1 , в которой происходит вращение дебаланса  и области Ω_2 , расположенной между стенкой камеры .

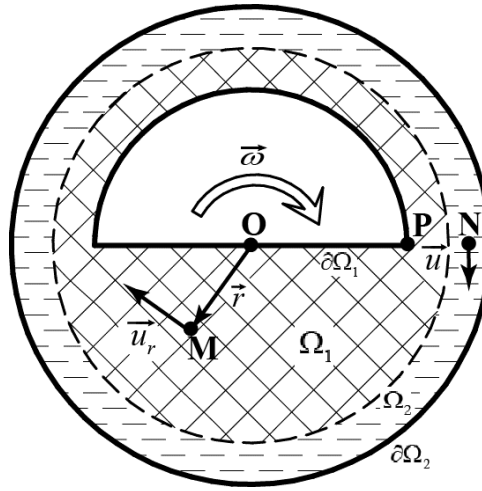


Рис. 1. Схема размещения дебаланса в камере источника, заполненного жидкостью

В начальный момент времени относительная скорость $\vec{u}_r$ равна нулю, давление жидкости 1 атм. и угловая скорость $\omega = 6,28$ рад/с.

На границе неподвижной подобласти Ω_2 задано условие проскальзывания: нормальная составляющая скорости $\vec{u}_r$ и градиентов турбулентной кинетической энергии ∇k и ее диссипативной части $\nabla \varepsilon$ равны нулю

$$\vec{u}_r|_{\mathbf{n}} = 0, \nabla k|_{\mathbf{n}} = 0, \nabla \varepsilon|_{\mathbf{n}} = 0, \quad (12)$$

также равна нулю тангенциальная составляющая тензора деформации

$$(\mu + \mu_T) \left[\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right] \Big|_{\text{tang}} = 0. \quad (13)$$

Для моделирования течений в пограничном слое вблизи твердой поверхности дебаланса использованы пристеночные функции. Обозначим суммарную толщину вязкого и буферного слоя через $\delta^+ \leq 11,06$. Сдвиговую скорость u_τ определим по методике изложенной в [36]:

$$u_\tau = C_\mu^{1/4} \sqrt{k}. \quad (14)$$

Диссипативную часть кинетической энергии вычислим по формуле [36]:

$$\varepsilon = \rho \frac{C_\mu \cdot k^2}{\kappa \cdot \delta^+ \cdot \nu}, \quad (15)$$

в которой $\kappa = 0,41$ – константа Кармана, $\nu = \mu / \rho$ – кинематическая вязкость.

Нормальная составляющая скорости $\vec{u}_r$ и градиента турбулентной кинетической энергии ∇k равны нулю:

$$\vec{u}_r|_{\mathbf{n}} = 0, \nabla k|_{\mathbf{n}} = 0, \quad (16)$$

а тангенциальная составляющая $\vec{u}_r$ пропорциональна тензору деформации:

$$-\rho \frac{u_\tau}{\delta^+} \vec{u}_r \Big|_{\text{tang}} = (\mu + \mu_T) \left[\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right] \Big|_{\mathbf{n}}. \quad (17)$$

Результаты моделирования работы источника в воде

Зададим диапазон изменения частоты вращения вала источника 1–5 Гц с шагом в 1 Гц. Вода, заполняющая внутреннюю камеру источника, находится при температуре 20 °С, ее плотность $\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$, молекулярная вязкость $\mu = 1,002 \times 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ [37]. Внутренний диаметр камеры виброисточника – 105 мм, диаметр дебаланса – 95 мм, а ее длина 900 мм. Диапазон изменения числа Рейнольдса, рассчитанный по формуле (7): $5,65 \times 10^4 - 2,82 \times 10^5$, указывает на развитый режим турбулентности в потоке.

Расчеты полей скорости и давления при вращении дебаланса в камере выполнены в программном комплексе ANSYS Fluid Flow (Fluent). Вычислительная область была покрыта сеткой, адаптивной к физической модели, с числом разбиений 7 732 элементов внутри области и 850 граничных элементов. Был использован метод усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса со стандартной двухпараметрической $k-\varepsilon$ моделью турбулентности. Задача решалась для установившегося режима течений, т. е. время t в уравнениях гидродинамики входило как параметр. На рис. 2, а, б приведены изолинии относительной скорости и давления, полученные из решения задачи в узловых точках элементов, при вращении вала по часовой стрелке с частотой 1 Гц, угловая скорость $\omega = 6,28 \text{ рад/с}$. Максимальная величина относительной скорости $0,29 \text{ м/с}^2$ наблюдается на кромках лопасти дебаланса.

В гидродинамике для расчета силы лобового сопротивления набегающему потоку жидкости используют простую зависимость [11,14,16,19]:

$$R = \zeta \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (18)$$

где ζ – коэффициент лобового сопротивления; S – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную к направлению движения – «миделево сечение»; ρ – плотность жидкости; v – линейная скорость движения тела в жидкости.

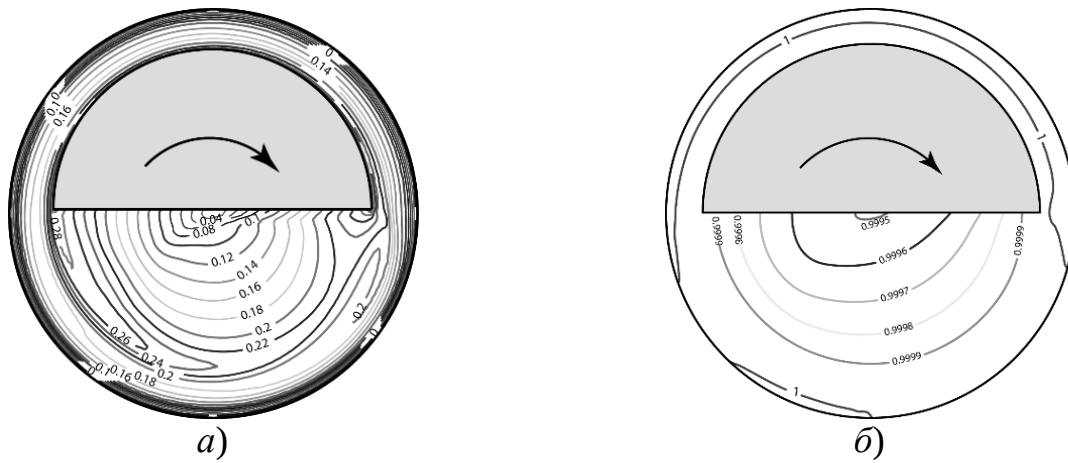


Рис. 2. Расчетные поля скорости:

а) и давления воды; б) в камере при установившемся режиме работы источника с частотой 1 Гц

Если необходимо вычислить распределение давления на миделево сечение лопасти дебаланса в направлении от оси вращения О до точки Р, находящейся на кромке лопасти, рис. 1, то из (18) получим:

$$p(x) = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot (v(x))^2}{2}. \quad (19)$$

Подставляя в (19) линейную скорость вращения лопасти дебаланса $v = \omega \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot r$ для диапазона частот 1–5 Гц с шагом в 1 Гц и численно решая уравнения гидродинамики, получим распределение давления на миделево сечение, из которого методом наименьших квадратов определим коэффициент лобового сопротивления ζ . Расчеты показывают, что $\zeta = 1,035$ и не меняется в частотном диапазоне 1–5 Гц, рис. 3.

Момент силы (T_q) на миделево сечение лопасти дебаланса от точки О до точки Р определим проинтегрировав распределение давления (19) по всей площади S [11].

$$T_q = \iint_S \vec{r} \times p(x, y) d\vec{\sigma} = L \int_0^{D/2} p(x) x dx = \frac{1}{32} \cdot \zeta \cdot \rho \cdot L \left(\pi \cdot D^2 \cdot f \right)^2, \quad (20)$$

где f – частота вращения вала, Гц; D , L – диаметр и длина дебаланса.

Подставляя выражение (20) в (9) оценим очень приблизительно мощность двигателя, необходимую для преодоления сопротивления воды, вращающегося в нем дебаланса:

$$P = \frac{1}{16} \cdot \zeta \cdot \rho \cdot L \cdot D \cdot (\pi \cdot D \cdot f)^3. \quad (21)$$

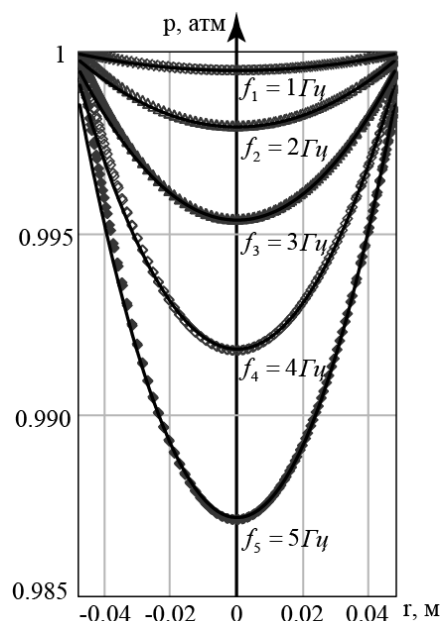


Рис. 3. Профиль давления на миделево сечение лопасти дебаланса: сплошная черная линия – расчет по формуле (19); точки – результат численного решения уравнений гидродинамики

Подставим в (21) геометрические размеры дебаланса, плотность, начальное давление воды, коэффициент лобового сопротивления и найдем зависимость оценки максимальной мощности от частоты вращения вала:

$$P(f) = 0,147 \cdot f^3. \quad (22)$$

Обсуждение

Используемый в статье метод решения уравнений гидродинамики с вращающейся подобластью, позволил получить распределение давления жидкости на стенки камеры и лопасти вращающегося дебаланса. Имея распределение давления на миделево сечение лопасти дебаланса можно достаточно точно определить значение коэффициента лобового сопротивления набегающему потоку. Эксперименты по исследованию сопротивления потоку различных форм тел, погруженных в воду [19], показывают, что коэффициент лобового сопротивления зависит от чисел Рейнольдса и Фруда, которые учитывают скорость, плотность, вязкость жидкости и геометрические размеры тела. При частоте вращения вала в 17 Гц число Рейнольдса составляет 10^6 . Сравнивая результаты расчетов давления полученных из решения уравнений гидродинамики и по формуле (19), приходим к выводу, что коэффициент лобового сопротивления не меняется, следовательно, можно применять приближенную формулу (22) для оценки мощности в данном частотном диапазоне.

В формуле (20) не учтен вклад касательных компонент тензора напряжений Рейнольдса, ввиду малой величины силы Кориолиса, возникающей при работе источника. Для расчета суммарного момента сил по формуле (20) в подынтегральном выражении необходимо брать разность давлений на миделево сечение лопасти дебаланса набегающего и противоположного потока, тогда как для оценки максимальной величины T_q в (20), давление противотока считается постоянным, равным $p_0 - p(D/2)$, где p_0 – давление жидкости в отсутствии вращения дебаланса, $p(D/2)$ – давление в точке **P**, максимально удаленной от оси вращения, рассчитанному по формуле (19).

Заключение

Из численного решения уравнений гидродинамики с вращающейся подобластью была получена оценка величины максимальной мощности, необходимой двигателю для преодоления силы сопротивления воды при вращении скважинного дебалансного виброисточника с заполненной жидкостью внутренней камерой. В ходе решения был применен метод составных связанных областей (MRF) и усреднение по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS). Для расчета турбулентной вязкости использована стандартная двухпараметрическая $k - \varepsilon$ модель турбулентности.

Для перекачки нефти из скважины диаметром 146 мм применяются винтовые насосы с приводом мощностью от 5 до 35 кВт. Виброисточник устанавливается совместно с насосом и работает на частоте 5 Гц. Следовательно, суммарная нагрузка на привод должна возрасти. Мощность двигателя, потребляемая источником, для дебаланса возрастет на 0,9 кВт (2,5–18 % от полной мощности) и еще 0,018 кВт (0,05–0,36 %) потребуется для преодоления силы сопротивления воды.

Работа выполнена в рамках научного проекта ФНИ № 0321-2016-0005.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дыбленко В. П. Волновые методы воздействия на нефтяные пласты с трудноизвлекаемыми запасами. Обзор и классификация. – М. : ОАО «ВНИИОЭНГ», 2008. – 80 с.
2. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений / Клишин В. И., Зворыгин Л. В., Лебедев А. В., Савченко А. В. Институт горного дела СО РАН. – Новосибирск : Новосибирский писатель, 2011. – 524 с.
3. Шевченко А. А. Сейсмические исследования в скважинах. – М. : РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2007. – 136 с.
4. Нескоромных В. В. Проектирование скважин на твердые полезные ископаемые: Учебное пособие. – Красноярск : СФУ, 2015. – 327 с.
5. Comparison of multiphase pumping technologies for subsea and downhole applications. / Hua G., Falcone G., Teodoriu C., and Morrison G.L. // Oil and Gas Facilities, 2012. – pp. 36–46.
6. Снарев А. И. Расчеты машин и оборудования для добычи нефти и газа: учебно-практическое пособие – М. : Инфра-Инженерия, 2010. – 232 с.

7. Kostrov S., Wooden W. In seismic stimulation shows promise for revitalizing mature fields. // *Oil & Gas Journal*. Vol: 103, Issue: 15, 2005. – pp. 43–49.
8. Westermarck R. V., Brett J. F., Maloney D. R. Enhanced oil recovery with downhole vibration stimulation. SPE/DOE Thirteenth Symposium on Improved Oil Recovery held in Tulsa, Oklahoma, 13–17 April 2002. – pp. 1–8. DOI: doi.org/10.2118/67303-MS.
9. Разработка скважинных дебалансных виброисточников и стендов для их исследования. / Савченко А. В., Ступин В. П., Тюгаев Р. А., Сергеев А. А. // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»*: сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГГА, 2016. Т. 4. – С. 3–7.
10. Цупов М. Н., Савченко А. В. Разработка сейсмических виброисточников для воздействия на массив горных пород. // *Машиноведение*. Т. 4. 2016. – С. 62–67.
11. Gülich J. F. *Centrifugal Pumps*. –2nd ed. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – P. 964. DOI: 10.1007/978-3-642-12824-0.
12. Rielly C. D. and Gimbum J. Computational fluid mixing. // P.J. Cullen (ed.). *Food Mixing: Principles and Applications*. Chichester: Wiley Blackwell, 2009. – pp. 125–174.
13. Cullen P. J. *Food mixing: principles and applications*. – John Wiley & Sons, 2009. – P. 304.
14. Nienow A. W., Edwards M. F., Harnby N. *Mixing in the process industries* – Butterworth-Heinemann, 2001. – P. 432.
15. *Advances in industrial mixing: A companion to the handbook of industrial mixing*. / Kresta S.M., Etchells III, A.W., Atiemo-Obeng V.A. and Dickey D.S. – John Wiley & Sons, 2016. – P. 1044. DOI:10.1595/205651317x696225
16. Dick E. *Fundamentals of turbomachines*. – Springer Netherlands, 2015. – P. 564. DOI: 10.1007/978-94-017-9627-9.
17. Carravetta A., Houreh Sh. D., Ramos H. M. *Pumps as turbines: Fundamentals and applications*. – Springer Int. Publ., 2018. – P. 218. DOI: 10.1007/978-3-319-67507-7.
18. Khalafallah M. G., Elsheshtawy H. A., El-Rahman Ah. Flow simulation in radial pump impellers and evaluation of slip factor. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. Vol.: 229 Issue: 8, 2015. – pp. 1032–1041. DOI: 10.1177/0957650915594953.
19. Som S. K., Biswas G., Chakraborty S. *Introduction to Fluid Mechanics and Fluid Machines*. – McGraw Hill Education, 2017. – P. 836.
20. Luo J. Y., Issa R. I., Gosman A. D. Prediction of impeller induced flows in mixing vessels using multiple frames of reference // *European Conference on Mixing*, Univ. Cambridge, UK, IChemE Symp Series. – 1994. – No. 136, – pp. 549–556.
21. New simplified algorithm for the multiple rotating frame approach in computational fluid dynamics. / Remaki L., Ramezani A., Blanco J.M., Garcia I. // *Journal of Fluids Engineering*. Vol. 139 Issue 8. August, 2017. – pp. 1–10. DOI: 10.1115/1.4036300.
22. Frozen rotor and sliding mesh models applied to the 3D Simulation of the Francis-99 Tokke turbine with Code_Saturne. / Tonello N., Eude Y., Meux B., Ferrand M. // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 782. 2017. – pp. 1-12. DOI: 10.1088/1742-6596/782/1/012009.
23. Wilhelm D. Rotating Flow Simulations with OpenFOAM. // *Int J Aeronautics Aerospace Res*. S1:001, 2015. – pp. 1-7. DOI: dx.doi.org/10.19070/2470-4415-SI01001.
24. Numerical investigation of the performance of contra-rotating propellers for a remotely piloted aerial vehicle. / Giorgi M.G., Donato T., Ficarella A., Fontanarosa D., Morabito A.E., Scalinci L. // *72-nd Conf. of the Italian thermal machines engineering association*, Lecce, Italy. 2017. – pp. 1101–1018.

25. Wang Z., Zhu Ch. Numerical simulation of three-dimensional rotor icing in hovering flight. // Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part G: Journal of aerospace engineering. Vol.: 232 Issue: 3, 2016. – pp. 545–555. DOI: 10.1177/0954410016682273.
26. Dogruoz M.B., Shankaran G. Computations with the multiple reference frame technique: Flow and temperature fields downstream of an axial fan. // An International Journal of Computation and Methodology. Numerical heat transfer, Part A. Vol. 71, No. 5. 2017. – pp. 488–510. DOI: doi.org/10.1080/10407782.2016.1277930.
27. Numerical analysis on non-equilibrium steam condensing flow in rotating machinery. / Kim Ch., Park J., Kim D., Baek J. // ASME 28th Symposium on fluid machinery. July 10-14, 2016, – Washington. 2016. – pp. 1–11. DOI: 10.1115/FEDSM2016-7588.
28. Lopes Jr. G.B., Gómez L.C., Bock E.G.P. Mesh independency analyses and grid density estimation for ventricular assist devices in Multiple Reference Frames simulations. // Technische mechanik, Vol.: 36, No 3, 2016. – pp. 190–198.
29. Computational fluid dynamics modeling of low pressure steam turbine radial diffuser flow by using a novel multiple mixing plane based coupling – simulation and validation. / Stein P., Pfoster Ch., Sell M., Galpin P. and Hansen Th. // J. Eng. Gas Turbines Power. 2015. 138(4):041604-041604-10. DOI:10.1115/1.4031388.
30. Edward L.P., Atiemo-Obeng V.A., Kresta S.M. Handbook of industrial mixing: science and practice. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. – P. 1440.
31. Heinrich M., Friebe C., Schwarze R. Experimental and numerical investigation of a gearless one-motor contra-rotating fan. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy Vol.: 230 Issue: 5, 2016. – pp. 467–476. DOI: 10.1177/0957650916633014.
32. Kutty H.A., Rajendran P. 3D CFD simulation and experimental validation of small APC slow flyer propeller blade. // Technical Note. Aerospace 4, 10. 2017. – pp. 1–11. DOI:10.3390/aerospace4010010.
33. Cengel Y.A., Cimbala J.M. Fluid Mechanics. – McGraw Hill Education, 2017. – P. 1016.
34. Звягин В., Турбин М. Математические вопросы гидродинамики вязкоупругих сред. – Москва: Красанд, 2017. – 416 с.
35. Chudacek M. W. Impeller power numbers and impeller flow numbers in profiled bottom tanks. // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 24 (3). 1985. – pp. 858–867. DOI: 10.1021/i200030a056.
36. Schlichting H., Gersten K. Boundary-layer theory. (9th ed.). – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2017. – P. 805.
37. Технология переработки нефти. Часть первая. Первичная переработка нефти / под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина. – М. : Химия, Колос, 2007. – 400 с.

REFERENCES

1. Dyblenko, V.P. (2008). Volnovye metody vozdeystviya na neftjanye plasty s trudnoizvlekaemymi zapasami. Obzor i klassifikacija. [Wave methods of impact on oil reservoirs with hard-to-recover reserves. Review and classification]. Moscow: VNIIOENG, P. 80. [in Russian].
2. Klishin, V.I., Zvorygin, L.V., Lebedev, A.V., Savchenko, A.V. (2011). *Problemy bezopasnosti i novye tehnologii podzemnoj razrabotki ugol'nyh mestorozhdenij*. [Problems of safety and new technologies for underground mining of coal deposits]. Institute of Mining SB RAS. Novosibirsk: Novosibirskij pisatel, P. 524. [in Russian].
3. Shevchenko, A.A. (2007). *Sejsmicheskie issledovaniya v skvazhinah*. [Seismic investigation in boreholes]. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas. P. 136. [in Russian].

4. Neskoromnyh, V.V. (2015). *Proektirovanie skvazhin na tverdye poleznye iskopaemye: Uchebnoe posobie. [Planning of well on solid minerals: tutorial]*. Krasnoyarsk: SFU, P. 327. [in Russian].
5. Hua, G., Falcone, G., Teodoriu, C., and Morrison, G.L. (2012). Comparison of multiphase pumping technologies for subsea and downhole applications. *Oil and Gas Facilities*. pp. 36–46.
6. Snarev, A.I. (2010). *Raschety mashin i oborudovaniya dlja dobychi nefi i gaza: uchebno-prakticheskoe posobie. [Machines calculations and equipment for oil and gas production: tutorial]*. Moscow: Infra-Engineering, P. 232. [in Russian].
7. Kostrov, S. and Wooden, W. (2005). In seismic stimulation shows promise for revitalizing mature fields. *Oil & Gas Journal*. Vol: 103, Issue: 15. pp. 43–49.
8. Westermarck, R.V., Brett, J.F., Maloney, D.R. (2002). Enhanced oil recovery with downhole vibration stimulation. *SPE/DOE Thirteenth Symposium on Improved Oil Recovery held in Tulsa, Oklahoma, 13–17 April 2002*, – pp. 1–8. DOI: doi.org/10.2118/67303-MS.
9. Savchenko, A.V., Stupin, V.P., Tjugaev, R.A., Sergeev, A.A. (2016). *Razrabotka skvazhinnyh debalansnyh vibroistochnikov i stendov dlja ih issledovaniya. [Development of bore-hole unbalance vibrosources and test benches for their research]*. In *Sbornik materialov Interexpo Geo-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: Vol. 4. Gornoe delo. [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 4. Mining]* (pp. 13–20). Novosibirsk: SSGA [in Russian].
10. Tsupov, M.N., Savchenko, A.V. (2016). *Razrabotka sejsmicheskikh vibroistochnikov dlja vozdejstviya na massiv gornyh porod [Development of seismic vibration sources effecting a rock mass]*. Vol. 4. pp. 62–67. [in Russian].
11. Gülich, J.F. (2010). *Centrifugal Pumps*. (-2nd ed.) Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, P. 964. DOI: 10.1007/978-3-642-12824-0.
12. Rielly, C.D. and Gimbun, J. (2009). Computational fluid mixing. *P.J. Cullen (ed.). Food Mixing: Principles and Applications*. Chichester: Wiley Blackwell, pp. 125–174.
13. Cullen, P.J. (2009). *Food mixing: principles and applications*. John Wiley & Sons, P. 304.
14. Nienow, A.W., Edwards, M.F., Harnby, N. (2001). *Mixing in the process industries*. Butterworth-Heinemann, P. 432.
15. Kresta, S.M., Etchells III, A.W., Atiemo-Obeng, V.A. and Dickey, D.S. (2016). *Advances in industrial mixing: A companion to the handbook of industrial mixing*. John Wiley & Sons, P. 1044. DOI:10.1595/205651317x696225
16. Dick, E. (2015). *Fundamentals of turbomachines*. Springer Netherlands, P. 564. DOI: 10.1007/978-94-017-9627-9
17. Carravetta, A., Houreh, Sh.D., Ramos, H.M. (2018). *Pumps as turbines: Fundamentals and applications*. Springer Int. Publ., P. 218. DOI: 10.1007/978-3-319-67507-7
18. Khalafallah, M.G., Elsheshtawy, H.A., El-Rahman, Ah. (2015). Flow simulation in radial pump impellers and evaluation of slip factor. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. Vol.: 229 Issue: 8, pp. 1032–1041. DOI: 10.1177/0957650915594953.
19. Som, S.K., Biswas, G., Chakraborty, S. (2017). *Introduction to Fluid Mechanics and Fluid Machines*. McGraw Hill Education, P. 836.
20. Luo, J.Y., Issa, R.I., Gosman, A.D. (1994). Prediction of impeller induced flows in mixing vessels using multiple frames of reference. *European Conference on Mixing, Univ. Cambridge, UK, IChemE Symp Series No. 136*, pp. 549–556.
21. Remaki, L., Ramezani, A., Blanco, J.M., Garcia, I. (2017). New simplified algorithm for the multiple rotating frame approach in computational fluid dynamics. *Journal of Fluids Engineering*. Vol. 139 Issue 8. August, pp. 1–10. DOI: 10.1115/1.4036300.

22. Tonello, N., Eude, Y., Meux, B., Ferrand, M. (2017). Frozen rotor and sliding mesh models applied to the 3D Simulation of the Francis-99 Tokke turbine with Code_Saturne. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 782. pp. 1–12. DOI: 10.1088/1742-6596/782/1/012009.
23. Wilhelm, D. (2015). Rotating Flow Simulations with OpenFOAM. *Int J Aeronautics Aerospace Res.* S1:001, pp. 1-7. DOI: dx.doi.org/10.19070/2470-4415-SI01001.
24. Giorgi M.G., Donateo T., Ficarella A., Fontanarosa D., Morabito A.E., Scalinci L. (2017). Numerical investigation of the performance of contra-rotating propellers for a remotely piloted aerial vehicle. *72-nd Conf. of the Italian thermal machines engineering association, Lecce, Italy.* pp. 1101–1018.
25. Wang, Z., Zhu, Ch. (2016). Numerical simulation of three-dimensional rotor icing in hovering flight. *Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part G: Journal of aerospace engineering.* Vol.: 232 Issue: 3, pp. 545–555. DOI: 10.1177/0954410016682273.
26. Dogruoz, M.B., Shankaran, G. (2017). Computations with the multiple reference frame technique: Flow and temperature fields downstream of an axial fan. *An International Journal of Computation and Methodology. Numerical heat transfer, Part A.* Vol. 71, No. 5. pp. 488–510. DOI: doi.org/10.1080/10407782.2016.1277930.
27. Kim, Ch., Park, J., Kim, D., Baek, J. (2016). Numerical analysis on non-equilibrium steam condensing flow in rotating machinery. ASME 28th Symposium on fluid machinery. July 10-14, 2016, – Washington. pp. 1–11. DOI: 10.1115/FEDSM2016-7588.
28. Lopes Jr., G.B., Gómez, L.C., Bock, E.G.P. (2016). Mesh independency analyses and grid density estimation for ventricular assist devices in Multiple Reference Frames simulations. *Technische mechanik, Vol.:* 36, No 3, pp. 190–198.
29. Stein, P., Pfoster, Ch., Sell, M., Galpin, P. and Hansen, Th. (2015). Computational fluid dynamics modeling of low pressure steam turbine radial diffuser flow by using a novel multiple mixing plane based coupling – simulation and validation. *J. Eng. Gas Turbines Power.* 138(4): 041604-041604-10. DOI:10.1115/1.4031388.
30. Edward, L.P., Atiemo-Obeng, V.A., Kresta, S.M. (2004). Handbook of industrial mixing: science and practice. New Jersey: John Wiley & Sons, P. 1440.
31. Heinrich, M., Friebe, C., Schwarze, R. (2016). Experimental and numerical investigation of a gearless one-motor contra-rotating fan. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* Vol.: 230 Issue: 5, pp. 467–476. DOI: 10.1177/0957650916633014.
32. Kuty, H.A., Rajendran, P. (2017). 3D CFD simulation and experimental validation of small APC slow flyer propeller blade. *Technical Note. Aerospace* 4, 10. pp. 1–11. DOI:10.3390/aerospace4010010.
33. Cengel, Y.A. and Cimbala, J.M. (2017). Fluid Mechanics. – McGraw Hill Education, P. 1016.
34. Zvjagin, V., Turbin, M. (2017). *Matematicheskie voprosy gidrodinamiki vjaskouprugih sred. [Mathematical problems hydrodynamics of viscoelastic media]*. Moscow: Krasand, P. 416. [in Russian].
35. Chudacek, M.W. (1985). Impeller power numbers and impeller flow numbers in profiled bottom tanks. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 24 (3). pp. 858–867. DOI: 10.1021/i200030a056
36. Schlichting, H., Gersten, K. (2017). Boundary-layer theory. (9-th ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. P. 805.
37. Glagolevoj, O.F. (Ed.) and Kapustina, V.M. (Ed.), (2007). *Tehnologija pererabotki nefi. Chast' pervaja. Pervichnaja pererabotka nefi. [Technology for oil refining. Part one. Primary oil processing]*. Moscow: Chemistry, Kolos. P. 400. [in Russian].

© А. В. Савченко, Д. С. Евстигнеев, М. Н. Цупов, 2018

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИННОГО ДЕБАЛАНСНОГО ВИБРОИСТОЧНИКА

Андрей Владимирович Савченко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, зав. отделом научно-инженерного центра горных машин и геотехнологий, тел. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

Михаил Николаевич Цупов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, ведущий инженер научно-инженерного центра горных машин и геотехнологий, тел. (383)217-05-25, (952)935-19-66, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

Артем Дмитриевич Флянтиков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, конструктор научно-инженерного центра горных машин и геотехнологий, тел. (913)768-22-92, e-mail: flardm001@gmail.com

Арсений Валерьевич Козлов

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Россия, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, магистрант, тел. (953)875-97-95, e-mail: voou@list.ru

Рассмотрены конструктивные особенности создания скважинного источника гармонических колебаний, обоснованы горно-геологические условия его применения и предложены технологические схемы работы в продуктивной скважине. Сформулированы технические требования для дебалансного источника, работающего при высоком давлении в жидкости, содержащей механические примеси. Произведены расчеты конструктивных параметров источника, определены напряжения и деформации его элементов, возникающие в процессе эксплуатации и найдены критические частоты. Обоснован выбор материалов его узлов и показаны преимущества в работе создаваемого источника.

Ключевые слова: скважинный дебалансный источник, моделирование, вибровоздействие, нефть, углеметан.

SUBSTANTIATION OF DESIGN AND ENERGY PARAMETERS OF A BOREHOLE DEBALANCE VIBRATION SOURCE

Andrey V. Savchenko

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Mining Machinery and Geotechniques Research Center, phone: (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

Mikhail N. Tsupov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Leading Engineer, Research and Development Center, phone: (383)217-05-25, (952)935-19-66, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

Artyom D. Flyantikov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Designer, Principal Engineer, Research and Development Center, phone: (913)768-22-92, e-mail: flardm001@gmail.com

Arseny V. Kozlov

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113, Leningradskaya St., Novosibirsk, 630008, Russia, Graduate, phone: (953)875-97-95, e-mail: voou@list.ru

The design features used for the creation of harmonic oscillations borehole source are considered, the mining and geological conditions of its application are substantiated. Technological operating schemes in the productive borehole are proposed. The technical requirements for a debalance source operating at high pressure in a fluid containing mechanical impurities are formulated. Calculations of the design parameters of the source have been made, stresses and deformations of its elements that arise during operation and critical frequencies have been determined. The choice of the materials of its nodes is justified. The advantages of the created source operating mode are shown.

Key words: borehole debalance source, modeling, vibration impact, oil, coal-seam methane.

Введение

Работы по вибросейсмическому воздействию на нефтепродуктивные пласты, с целью увеличения нефтеотдачи, поверхностными сейсмическими источниками дебалансного типа проводились ИГД СО РАН в период с 1988 по 2003 г. [1]. Как выяснилось в ходе промысловых испытаний поверхностных источников, их существенным недостатком является: большое затухание волн в толще горных пород, высокая стоимость, сложность технического обслуживания и постоянное присутствие обслуживающего персонала. Наименьшими энергетическими потерями обладают скважинные системы. Основное развитие на практике получили технические решения, осуществляющие гидравлическое [2] или механическое [3–10] воздействие на пласт. Такая обработка призабойной зоны скважины носит периодический характер, при этом скважина выводится из эксплуатации. Дальнейшее развитие вибросейсмических методов привело к созданию гидроударных систем [11]. Их действие основано на создании пониженного давления в герметизированной камере, при разгерметизации которой в нее устремляется струя жидкости и наносит гидроудар, создавая сейсмические колебания. Генераторы виброволнового воздействия размещаются в скважине на уровне продуктивного пласта, работают совместно с штанговым глубинным насосом и непрерывно откачивают жидкость. Применение их ограничено прочностью насосных штанг и составляет 1 400 м. Глубина залегания продуктивных пластов нефтяных месторождений крайнего севера превышает три километра, и использовать гидроударные генераторы на этих скважинах невозможно. В эти скважины устанавливаются электроцентробежные или винтовые насосы. В России 27,4 % [12] всех добывающих скважин эксплуатируются центробежными или винтовыми насосами. Чтобы охватить воздействием такие скважины, нами был предложен погружной дебалансный виброисточник,

[13, 14] способный работать совместно с центробежными или винтовыми насосами. Для его создания необходимо определить максимальную силу, развиваемую вращающейся секции источника при заданной частоте с учетом геометрической формы и массы присоединенных грузов [15–17], а также выполнить расчеты на прочность основных элементов конструкции. Следовательно, на основе статического анализа конструкции вала с присоединенными грузами необходимо получить поле напряжений и деформаций, а из модального анализа – информацию о критических частотах.

Модальный и статический анализ конструкции дебаланса

Представим уравнения теории упругости в матричной форме, применяемой в методе конечных элементов [18]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}, \quad (1)$$

где $\{u\}$ – вектор узловых перемещений, $\{\ddot{u}\}, \{\dot{u}\}$ – векторы ускорений и скоростей узловых точек конструкции, $[M], [C], [K]$ – матрица массы, демпфирования и жесткости, $\{F\}$ – вектор эквивалентных узловых сил для всей конструкции.

Под модальным анализом понимается задача определения собственных частот и форм (мод) собственных колебаний конструкции. Модальный анализ предполагает, что система является линейной. Пренебрежем в уравнении (1) матрицей демпфирования $[C] = [0]$ и вектором сил $\{F\} = \{0\}$, тогда получим:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}. \quad (2)$$

Решение (2) будем искать в виде:

$$\{u\} = \{\varphi\}_i \cos(\omega_i t), \quad (3)$$

где $\{\varphi\}_i$ – i -й собственный вектор, представляющий форму (моду) колебаний на i -й собственной частоте, ω_i – i -я собственная круговая частота, t – время.

Подставляя (3) в (2) приходим к системе линейных алгебраических уравнений n -го порядка для i -й собственной частоты:

$$(-\omega_i^2 [M] + [K])\{\varphi\}_i = \{0\}. \quad (4)$$

Решая (4) находим собственные частоты ω_i^2 и собственные вектора $\{\varphi\}_i$ с n -м общим числом степеней свободы конструкции.

Собственные вектора нормируют к матрице масс, кроме того они M -ортогональны [19, 20].

Для вычисления мод в программном комплексе ANSYS Modal спроектирован вал с присоединенными массами (дебалансами). Левый конец вала опирается на шарнирно-неподвижную опору, правый на шарнирно-подвижную. Выбран метод решения задачи на обобщенные собственные значения – Power Dynamics, предназначенный для расчета мод в количестве не более 20 [20]. Материал детали – сталь 40Х.

Для определения перемещений, напряжений, деформаций и усилий, которые возникают в конструкции в результате приложения внешних механических сил применяется статический анализ.

Определяющим при проведения статического анализа является пренебрежение скоростью $\{\dot{u}\} = \{0\}$ и ускорением $\{\ddot{u}\} = \{0\}$ узловых точек конструкции. Из (1) имеем:

$$[K]\{u\} = \{F\}, \quad (5)$$

Компоненты вектора сил $\{F\}$ представляют сосредоточенные силы, распределенные на оси вала, как показано на рис. 1.

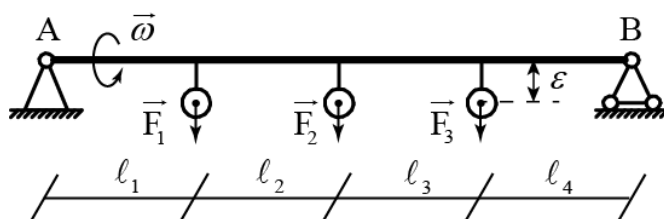


Рис. 1. Расчетная схема вала с присоединенными массами

Общая длина вала АВ – 1,2 м, эксцентриситет $\varepsilon = 0,022\ 25$ м, угловая скорость вращения ω – 300 об/мин, $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 0,3$ м.

Сосредоточенные силы одинаковы $\vec{F}_1 = \vec{F}_2 = \vec{F}_3$, а их величина определяется из уравнения [15–17]:

$$F_i = m_i \cdot \varepsilon \cdot \omega^2, \quad (6)$$

где m_i – масса i -го дебаланса, 7,14 кг.

Для получения распределения статического напряженно-деформированного состояния конструкции вала с приложенными к нему силами $\vec{F}_i$ использован программный модуль Static Structural комплекса ANSYS. В нем была построена модель вала с распределенными силами, как показано на рис. 1.

Результаты моделирования

Для определения степени опасности возможных резонансных режимов, в ходе проектирования виброисточника, был проведен модальный анализ. На

рис. 2 приведены первые две моды собственных колебаний конструкции дебаланса с резонансными частотами 86,6 Гц и 103,5 Гц. В расчетах принимался диапазон изменения скорости вращения вала от 0 до 10 000 об/мин. На основе первых 10-ти собственных мод, была построена диаграмма Кэмпбелла, рис. 3, представляющая отклик конструкции как функции от осцилляций. Наклонная прямая с углом $0,955^\circ$, пересекающая две первые собственные частоты 86,6 Гц и 103,5 Гц, определяет две критические скорости вращения вала – 5 197 об/мин и 6 211 об/мин. Поскольку резонансные гармоники не попадают в рабочий диапазон действующих внешних нагрузок, конструкцию виброисточника можно считать прочной и устойчивой к вибрациям, так как частоты внешних сил не совпадают с ее собственными частотами.

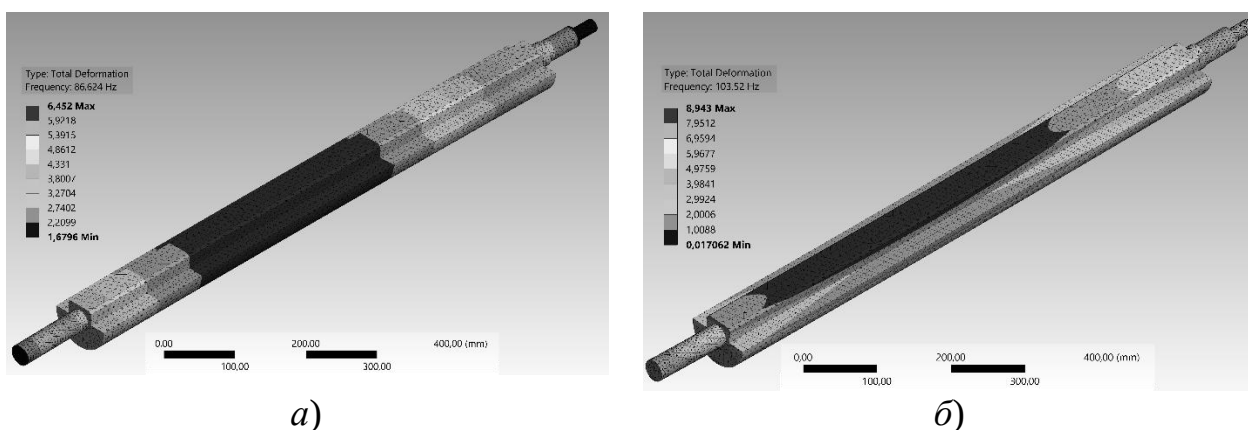


Рис. 2. Расчетные поля собственных колебаний дебаланса (приведены первые две моды колебаний с резонансными частотами):
а) 86,6 Гц; б) 103,5 Гц



Рис. 3. Диаграмма Кэмпбелла

Максимальная деформация приходится на центральную часть вала и не превышает 0,5 мм, рис. 4, а, при этом эквивалентные напряжения по Мизесу не более 17 МПа, рис. 4, б (предел текучести стали 40Х – 175 МПа). Был рассчитан коэффициент запаса прочности, обеспечивающий дополнительную надежность конструкции дебаланса, чтобы избежать его разрушения при эксплуатации.

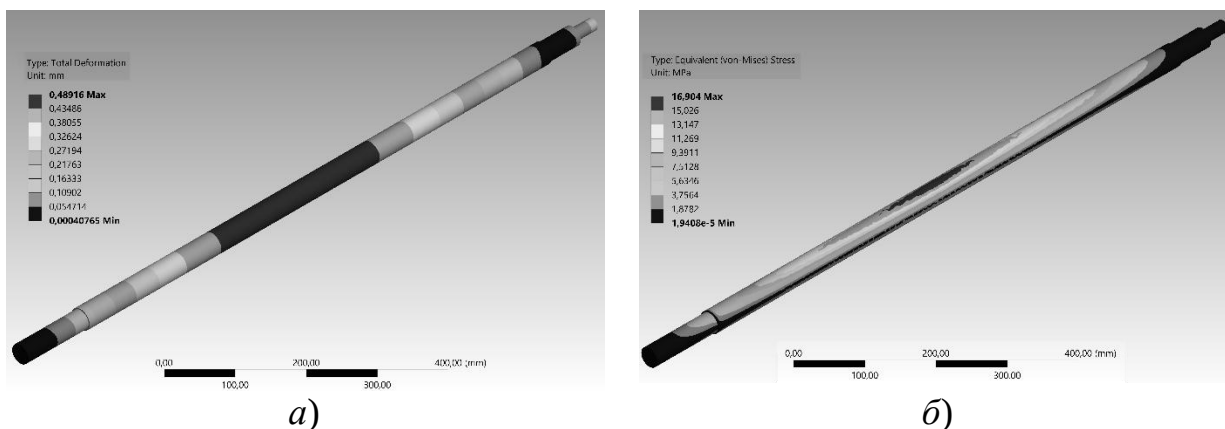


Рис. 4. Расчетное поле деформаций (а) и напряжений (б) вала, нагруженного присоединенной массой при вращении с угловой скоростью 300 об/мин

Для увеличения межремонтного периода виброисточника его расчетный запас прочности увеличен в пять раз, рис. 5, и соответствует времени периода эксплуатации винтового насоса.

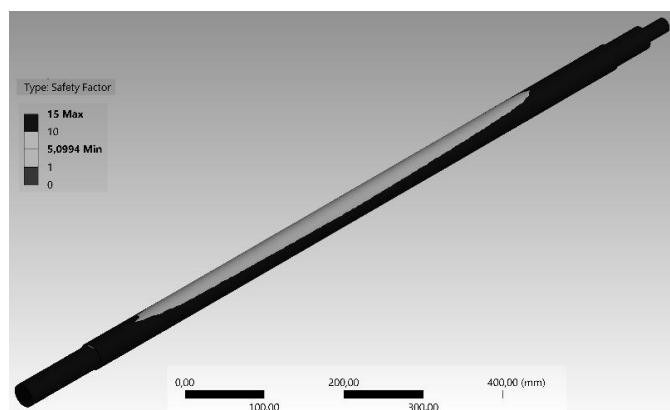


Рис. 5. Расчетное поле коэффициента запаса прочности вала, нагруженного присоединенной массой при вращении с угловой скоростью 300 об/мин

Расчет зависимости силы, развиваемой источником от частоты вращения вала, рис. 6, выполнен по формуле (6), в которой суммарная масса присоединенного груза составила 21,42 кг.

Обсуждение

Виброисточник работает в скважине и его размеры ограничены внутренним диаметром скважины. Дебаланс размещается во внутренней камере генератора колебаний и его эксцентриситет центра масс также ограничен габаритными размерами корпуса. Сила, развиваемая источником, зависит от частоты вращения вала, геометрической формы и массы присоединенных грузов.

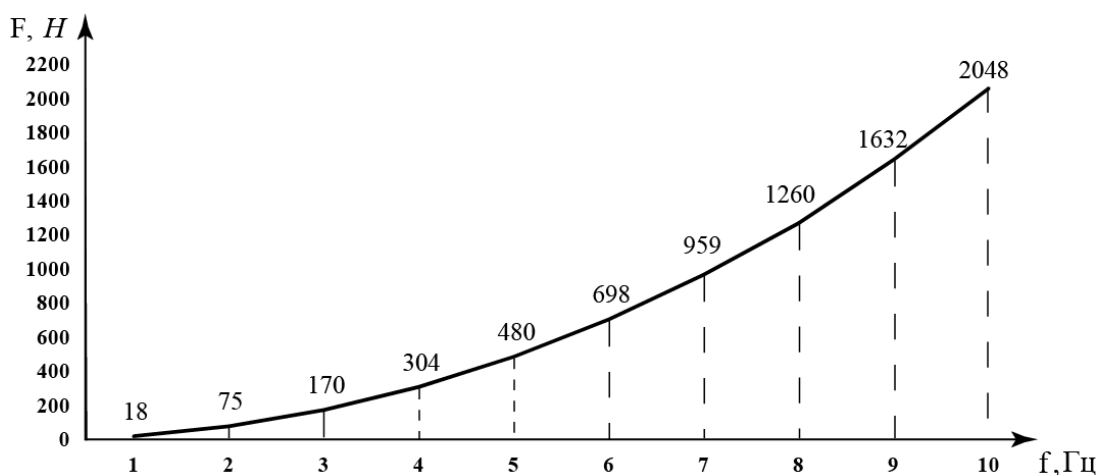


Рис. 6. Зависимость силы ($F, Н$), развиваемой источником от частоты ($f, Гц$)

Следовательно, наибольшим статическим моментом обладает дебаланс, выполненный в форме полуцилиндра. Так как предусмотрена эксплуатация виброисточника совместно с винтовым насосом, – частота вращения привода не превышает пяти герц. Единственная возможность влиять на силу, развиваемую источником, – изменение массы присоединенных грузов. Материал, из которого изготовлен дебаланс – сталь 40Х и изменить его массу можно только выбором высоты полуцилиндра. Выбор длины секции дебаланса ограничен расстоянием между подшипниками, через которые передается усилие и величиной деформации вала. Присоединенные грузы равномерно размещены по всей длине вала виброисточника. Диаметр вала, выбран таким образом, чтобы выдерживать заданные нагрузки на него при частоте вращения до 12 Гц, что более чем вдвое превышает рабочую частоту вращения вала. Расчет полей напряжений и деформаций вала с присоединенными грузами показал, что вал обладает достаточной прочностью и создание такого источника возможно. Коэффициент запаса прочности равен пяти. Из исследования на резонансные частоты, с применением модального анализа, получили, что первые две ближайшие резонансные частоты 86,6 Гц и 103,5 Гц лежат далеко за пределами диапазона частот вращения привода, вращающего дебаланс. Расчеты подтверждают, что предложенная конструкция виброисточника может использоваться в скважинах и эксплуатироваться совместно с винтовыми насосами.

Заключение

Численное моделирование прочностных характеристик дебалансного виброисточника показало, что предельные значения максимальной деформации и напряжений вала не превышают предела текучести стали 40Х (175 МПа). Максимальная деформация (0,5 мм) и напряжения (17 МПа) приходятся на центральную часть вала, вращающегося с угловой скоростью 300 об/мин. Из модального анализа получены две резонансные частоты 86,6 Гц и 103,5 Гц, кото-

рые определяют две критические скорости вращения вала – 5 197 об/мин и 6 211 об/мин.

Винтовые насосы работают на частотах до 5 Гц, и резонансные частоты виброисточника не попадают в этот диапазон, поэтому их совместная работа в скважине – возможна. Конструкция виброисточника позволяет ему развивать силу воздействия на пласт до 480 Н, а его вращающиеся части имеют пятикратный запас прочности.

Работа выполнена в рамках научного проекта ФНИ № 0321-2016-0005.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клишин В. И. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений / В. И. Клишин, Л. В. Зворыгин, А. В. Лебедев, А. В. Савченко, Институт горного дела СО РАН. – Новосибирск : Новосибирский писатель, 2011. – 524 с.
2. Дыбленко В. П. Волновые методы воздействия на нефтяные пласты с трудноизвлекаемыми запасами. Обзор и классификация. – М. : ОАО «ВНИИОЭНГ», 2008. – 80 с.
3. Дуган Т., Арнольд Э. GAS! Страницы истории добычи угольного метана в бассейне Сан-Хуан. – М. : GBM Pftners. 2008. – 186 с.
4. Гадиев С.М. Использование вибрации в добыче нефти. – М. : Недра, 1977. – 159 с.
5. Интенсификация нефтедобычи методом вибросейсмического воздействия заглубленными источниками упругих волн: монография / Ю. А. Бурьян [и др.]; – Омск : ОмГТУ, 2014. – 212 с.
6. Снарев А. И. Расчеты машин и оборудования для добычи нефти и газа: учебно-практическое пособие – М. : Инфра-Инженерия, 2010. – 232 с.
7. Kostrov S., Wooden W. In seismic stimulation shows promise for revitalizing mature fields. // Oil & Gas Journal. Vol: 103, Issue: 15, 2005. – pp. 43-49.
8. Westermarck R.V., Brett J.F., Maloney D.R. Enhanced oil recovery with downhole vibration stimulation. SPE/DOE Thirteenth Symposium on Improved Oil Recovery held in Tulsa, Oklahoma, 13–17 April 2002. – pp. 1–8. DOI: doi.org/10.2118/67303-MS
9. Пат. №2107930 РФ, МПК G01V1/153 Скважинный сейсмический вибратор / Кулаков В.Ф., Зуев А.А. – Опубл. 27.03.1998.
10. Comparison of multiphase pumping technologies for subsea and downhole applications. / Hua G., Falcone G., Teodoriu C., and Morrison G.L. // Oil and Gas Facilities, 2012. – pp. 36-46.
11. Пат. №2490422 РФ, МПК E21B28/00 E21B43/25 Установка для импульсного воздействия на продуктивный пласт / Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Савченко А. В. – Опубл. 20.08.2013. – Бюл. №2
12. Добыча нефти с помощью насосов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ngfr.ru/ngd.html?neft14>
13. Савченко А. В. Разработка скважинных дебалансных виброисточников и стендов для их исследования / А. В. Савченко, В. П. Ступин, Р. А. Тюгаев, А. А. Сергеев // Интерэкс-по ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГГА, 2016. Т. 4. – С. 3–7.
14. Цупов М. Н., Савченко А. В. Разработка сейсмических виброисточников для воздействия на массив горных пород // Машиноведение. – 2016. – Т. 4. – С. 62–67.
15. Белокобыльский С. В., Елисеев С. В., Ситов И. С. Динамика механических систем. Рычажные и инерционно-упругие связи. – СПб. : Политехника, 2015. – 319 с.

16. Dick E. Fundamentals of turbomachines. – Springer Netherlands, 2015. – P. 564. DOI: 10.1007/978-94-017-9627-9
17. Som S.K., Biswas G., Chakraborty S. Introduction to Fluid Mechanics and Fluid Machines. – McGraw Hill Education, 2017. – P. 836.
18. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М. : Недра, 1987, – 246 с.
19. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. – М.: Машиностроение, 1985. – 474 с.
20. Леонтьев Н. В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа: учебно-методическое пособие. – Н. Новгород : ННГУ, 2006. – 101 с.

REFERENCES

1. Klishin, V.I., Zvorygin, L.V., Lebedev, A.V., Savchenko, A.V. (2011). *Problemy bezopasnosti i novye tehnologii podzemnoj razrabotki ugol'nyh mestorozhdenij. [Problems of safety and new technologies for underground mining of coal deposits]*. Institute of Mining SB RAS. Novosibirsk: Novosibirskij pisatel, P. 524. [in Russian].
2. Dyblenko V.P. (2008). *Volnovye metody vozdeystviya na nef tjanye plasty s trudnoizvlekaemymi zapasami. Obzor i klassifikacija. [Wave methods of impact on oil reservoirs with hard-to-recover reserves. Overview and classification]*. Moscow: OAO «VNII OJeNG», P. 80. [in Russian].
3. Dugan T., Arnol'd Je. (2008). *GAS! Stranicy istorii dobychi ugol'nogo metana v bassejne San-Huan. [GAS! Pages of the history of coal methane production in the San Juan basin]*. Moscow: GBM Pfrtners, P.186. [in Russian].
4. Gadiev, S.M. (1977). *Ispol'zovanie vibracii v dobyche nef ti. [Use of a vibration in oil production]*. Moscow: Nedra, P.159. [in Russian].
5. Ju.A. Bur'jan [i dr.] (2014). *Intensifikacija nef tedobychi metodom vibroseismicheskogo vozdeystviya zaglublennymi istochnikami uprugih voln [Intensification of oil production by the method of vibroseismic action by buried sources of elastic waves]*. Omsk: OmGTU, P. 212. [in Russian].
6. Snarev, A.I. (2010). *Raschety mashin i oborudovaniya dlja dobychi nef ti i gaza: uchebno-prakticheskoe posobie. [Machines calculations and equipment for oil and gas production: tutorial]*. Moscow: Infra-Engineering, P. 232. [in Russian].
7. Kostrov, S. and Wooden, W. (2005). In seismic stimulation shows promise for revitalizing mature fields. *Oil & Gas Journal*. Vol: 103, Issue: 15. pp. 43-49.
8. Westermarck, R.V., Brett, J.F., Maloney, D.R. (2002). Enhanced oil recovery with downhole vibration stimulation. SPE/DOE Thirteenth Symposium on Improved Oil Recovery held in Tulsa, Oklahoma, 13–17 April 2002, – pp. 1–8. DOI: doi.org/10.2118/67303-MS
9. Kulakov, V.F., Zuev, A.A. (2013). Borehole seismic vibrator. R.F. Patent No: 2107930.
10. Comparison of multiphase pumping technologies for subsea and downhole applications. / Hua G., Falcone G., Teodoriu C., and Morrison G.L. // *Oil and Gas Facilities*, 2012. – pp. 36–46.
11. Oparin, V.N., Simonov, B.F., Savchenko, A.V. (2013). Equipment for impulse influence on reservoir. R.F. Patent No: 2490422
12. Dobycha nef ti s pomoshh'ju nasosov. [Oil production with pumps.] (n.d.). *ngfr.ru* Retrieved from <http://www.ngfr.ru/ngd.html?neft14>.
13. Savchenko, A.V., Stupin, V.P., Tjugayev, R.A., Sergeev, A.A. (2016). *Development of borehole unbalance vibrosources and test benches for their research*. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: Vol. 4. Gornoe delo. [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 4. Mining]*. Novosibirsk: SSGA, pp. 13–20. [in Russian].

14. Tsupov, M.N., Savchenko, A.V. (2016). *Razrabotka sejsmicheskikh vibroistochnikov dlja vozdejstviya na massiv gornyh porod [Development of seismic vibration sources effecting a rock mass]*. Science of Machines. Vol. 4. pp. 62–67. [in Russian].
15. Belokobyl'skij S.V., Eliseev S.V., Sitov I.S. (2015). *Dinamika mehanicheskikh sistem. Rychazhnye i inercionno-uprugie svyazi. [Dynamics of mechanical systems. Lever and inertial-elastic connections]*. Sankt-Peterburg: Politehnika, P. 319. [in Russian].
16. Dick, E. (2015). *Fundamentals of turbomachines*. Springer Netherlands, P. 564. DOI: 10.1007/978-94-017-9627-9.
17. Som, S.K., Biswas, G., Chakraborty, S. (2017). *Introduction to Fluid Mechanics and Fluid Machines*. McGraw Hill Education, P. 836.
18. Fadeev, A.B. (1986). *Metod konechnyh jelementov v geomehanike. [Finite element method in geomechanics.]*. Moscow: Nedra, P. 246. [in Russian].
19. Timoshenko S.P., Jang D.H., Uiver U. (1985). *Kolebanija v inzhenernom dele. [Fluctuations in Engineering]*. Moscow: Mashinostroenie, P. 474. [in Russian].
20. Leont'ev N.V. (2006). *Primenenie sistemy ANSYS k resheniju zadach modal'nogo i garmonicheskogo analiza: uchebno-metodicheskoe posobie. [Application of the ANSYS system to solving modal and harmonic analysis problems: a teaching aid]*. Nizhnij Novgorod: NNGU, P. 101. [in Russian].

© А. В. Савченко, М. Н. Цупов, А. Д. Флянтиков, А. В. Козлов, 2018

СПОСОБ ШАХТНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ МОСТОВ

Сергей Владимирович Сердюков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, зав. лабораторией физических методов воздействия на массив горных пород, тел. (383)335-96-42, e-mail: ss3032@yandex.ru

Антон Витальевич Азаров

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: antonazv@mail.ru

Андрей Владимирович Патутин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: andrey.patutin@gmail.com

В работе рассматривается способ шахтного гидравлического разрыва необсаженных скважин, характеризующихся значительной изменчивостью поперечного сечения. Герметизация заданного интервала выполняется несъемными мостами из полимерного материала. Для этого предложено использовать две трубные колонны, одна из которых вложена в другую. Внешняя колонна, оборудованная центраторами и кольцевой фрезой, обеспечивает очистку и промывку скважины, доставку технических средств гидроразрыва в заданный интервал. Внутренняя колонна содержит пять отдельных гидравлических каналов, а также многоточечный инжектор, что позволяет независимо подавать необходимые химические компоненты для формирования полимерных мостов и рабочей жидкости для разрыва. После формирования трещины мосты разбуhrиваются кольцевой фрезой. Это обеспечивает связь дренажной системы и забойного интервала скважины с ее устьем. С помощью математического моделирования исследовано поле напряжений в окрестности изолированного интервала скважины при подаче в него жидкости под давлением. Полученные результаты показывают возможность создания поперечной трещины разработанным способом.

Ключевые слова: угольный пласт, множественный интервальный гидроразрыв, интервал разрыва, герметизация, несъемный мост, полимерные материалы, математическое моделирование.

A METHOD OF UNDERGROUND HYDRAULIC FRACTURING BASED ON POLYMER BRIDGES

Sergey V. Serdyukov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Head of Laboratory on the Physical Methods of Impact on the Rock Mass, phone: (383)335-96-42, e-mail: ss3032@yandex.ru

Anton V. Azarov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D. Student, Junior Researcher, phone: (383)335-96-42, e-mail: antonazv@mail.ru

Andrey V. Patutin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)335-96-42, e-mail: andrey.patutin@gmail.com

The paper studies a method of hydraulic fracturing performed in uncased boreholes characterized by a considerable variability of cross section. Sealing of the determined interval is performed by fixed polymer bridges. Therefore, it is proposed to employ two pipe strings put one into another. The external string is equipped with centralizers and a ring cutter. It provides borehole cleaning out and delivers tool into the fracturing interval. The internal string contains five separated hydraulic channels and a multipoint injector. Accordingly, it is possible to supply required chemical components to form polymer bridges and working agent for the fracture independently. After the crack is formed, the bridges are drilled by the ring cutter. It provides the connection of the drainage system and bottom interval to the borehole mouth. With the help of mathematical modeling a stress field is studied in the vicinity of the borehole interval, when the fluid under pressure is supplied into it. The obtained results show the possibility of the transverse crack formation by the developed method.

Key words: coal seam, multiple hydraulic fracturing, fracturing interval, sealing, fixed bridge, polymer materials, mathematical modeling.

Введение

Развитие технологий направленного бурения из подземных выработок привело к значительному росту количества протяженных скважин длиной от 400 до 1 000 метров, используемых для дегазации угольного массива [1]. Применение подобных скважин при продолжительности предварительной дегазации выемочного участка около одного года обеспечивает степень дегазации до 70 % и безопасную выемку угля современным высокопроизводительным очистным оборудованием [2]. Однако, несмотря на достигнутые успехи, опыт эксплуатации современных дегазационных систем показывает проблемы, связанные с извлечением метана угольных пластов. К ним относится постепенное снижение концентрации извлекаемого метана за счет нарушения исходного состояния массива вследствие увеличения плотности сетки дегазационных скважин и их взаимного влияния друг на друга. В этом случае применение метода гидравлического разрыва пласта (ГРП) в шахтных условиях позволит сохранить общий дебит метана при снижении объемов бурения близкорасположенных скважин [3–4]. Проведение дополнительных скважинных исследований позволит эффективно выбрать интервалы для создания трещин, в том числе, за счет оценки деформационных характеристик углепородного массива [5–7].

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) представляет собой процесс формирования и распространения трещины в горной породе за счет давления жидкости, нагнетаемой в изолированный интервал [8–9]. Одна из основных проблем его применения – это герметизации интервала разрыва в скважине, размеры и форма поперечного сечения которой значительно меняются вдоль оси. Стандартные надувные пакеры при этом малопригодны, поскольку их расширяемые армированные кордом оболочки не способны полностью перекрыть скважину, в которой максимальный и минимальный размеры поперечного сечения могут

отличаться до 3 раз [10]. Увеличение длины надувных пакеров до 3–5 метров осложняет проведение работ в шахтных условиях и не гарантируют надежную герметизацию интервала разрыва, давление жидкости в котором может достигать нескольких сотен атмосфер.

Технология интервального гидроразрыва

Единственным способом проведения интервальных гидроразрывов в такой ситуации, по нашему мнению, является герметизация скважины несъемными мостами из твердеющего материала. Отчасти это возврат к способам гидроразрыва, применявшимся в начальный период его истории в нефтедобыче, но на основе современных технических решений и полимеров.

Реализация этого подхода предполагает решение следующих технических вопросов:

- доставка скважинного оборудования и полимерных материалов в заданный интервал скважины, склонной к обрушению;
- герметизация интервала разрыва в скважине с переменным сечением;
- нагнетание в интервал разрыва под давлением рабочих жидкостей (суспензий), содержащих проппант;
- разрушивание полимерных мостов по завершению работ для восстановления сообщения интервала разрыва и призабойного участка скважины с ее устьем.

Предлагаемый вниманию способ герметизации несъемными мостами включает предварительную изоляцию интервалов установки мостов с помощью опалубки из фенольных смол, быстро вспенивающихся при смешивании с катализатором. Сами несъемные мосты создаются за счет полимеризации двухкомпонентного состава на основе жестких полиуретанов или органоминеральных смол с высокой прочностью сцепления с породой.

Разработанное техническое решение скважинного комплекса интенсификации дегазации угольного пласта методом интервального гидроразрыва по предлагаемому способу предусматривает применение двух несвязанных между собой трубных колонн, одна из которых вложена в другую (рис. 1). Внешняя колонна, оборудованная центраторами и кольцевой фрезой, обеспечивает очистку и промывку скважины, доставку технических средств гидроразрыва в заданный интервал.

Внутренняя колонна с пятью отдельными гидравлическими каналами может иметь кассетную конструкцию (все каналы составлены из труб) или конструкцию смешанного типа (канал подачи жидкости разрыва составлен из труб, остальные каналы – сплошные гибкие рукава высокого давления). Внутренняя колонна может свободно вращаться и перемещаться вдоль внешней колонны. На конце внутренней колоны установлен многоточечный инжектор, обеспечивающий подачу материалов опалубки и полимерных мостов в соответствующие интервалы скважины, а также нагнетание под давлением рабочей жидкости (суспензии с проппантом) в интервал разрыва.

Технология (последовательность операций) выполнения множественных интервальных гидроразрывов в угольном пласте, основанная на разработанном техническом решении, показана на рис. 1.

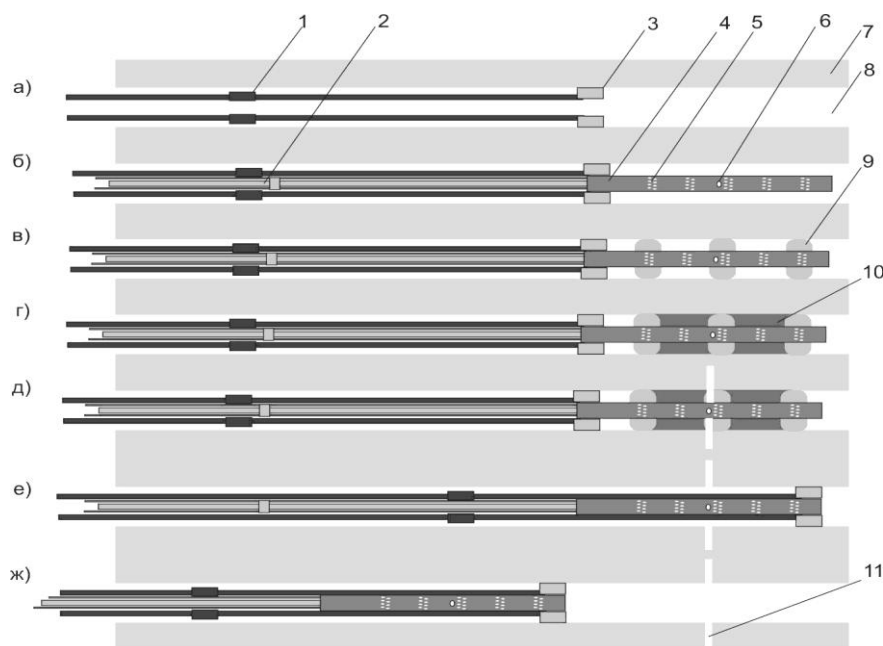


Рис. 1. Последовательность операций по герметизации интервала разрыва полимерными мостами, гидроразрыва и подключения дренажной трещины к дегазационной скважине:

1 – внешняя трубная колонна; 2 – внутренняя 5-канальная колонна; 3 – кольцевая фреза; 4 – многоточечный инжектор; 5 – отверстия для подачи двухкомпонентных полимерных составов; 6 – отверстия для нагнетания в интервал разрыва рабочей жидкости; 7 – угольный пласт; 8 – дегазационная скважина; 9 – опалубка из вспенивающегося материала; 10 – полимерный мост; 11 – дренажная трещина гидроразрыва

Сначала проводят монтаж внешней колонны 1 до самого удаленного от устья скважины интервала разрыва (рис. 1, а). При необходимости вращением колонны 1 с помощью кольцевой фрезы 3 разрушают обломочный материал, выполняют промывку скважины. Затем осуществляют монтаж внутренней колонны 2 с инжектором 4, который выдвигают из внешней колонны 1 в заданный интервал разрыва (рис. 1, б).

Герметизацию интервала разрыва выполняют в два этапа. На первом этапе по двум выделенным каналам колонны 2 в центральные и крайние группы отверстий 5 нагнетают две компоненты фенольного состава, которые смешиваются в интервале разрыва и образуют вспененную опалубку 9, изолирующую интервалы установки несъемных мостов (рис. 1, в). Время начала реакции компонент фенольного состава не превышает 4 с, длительность реакции – менее 4 мин, фактор вспенивания (увеличение объема) – 15–30. Прочность на сжатие такой опалубки при 10 % деформации составляет приблизительно 0,3 МПа.

На втором этапе в интервалы, изолированные опалубкой, по двум другим выделенным каналам колонны 2 через промежуточные группы отверстий 5 нагнетают две компоненты органоминеральной или полиуретановой смол, например, тех, которые применяют для упрочнения горных пород. Длительность реакции компонент таких смол при 25 °С составляет 3–20 мин. В результате химической реакции в скважине образуются полимерные мосты 10 (рис. 1, з), прочность сцепления которых с породой составляет 4–6 МПа, модуль упругости – около $2,5 \cdot 10^8$ Н/м². Указанные свойства мостов при длине каждого из них 300 мм обеспечивают в скважине диаметром 98 мм герметизацию интервала разрыва при давлении рабочей жидкости до 49 МПа.

По завершении операций герметизации в интервал между мостами по выделенному каналу увеличенного проходного сечения сначала закачивают кислотный состав для разрушения центральной опалубки 9, а затем – рабочую жидкость (суспензию) гидроразрыва под давлением, достаточным для формирования в угольном пласте требуемой трещины 11 (рис. 1, д).

После выполнения вышеуказанных операций инжектор 4 прочно сцеплен полимерами 9, 10 со стенками скважины 8 и угольным пластом 7. Для освобождения инжектора колонну 1 подают вглубь скважины с вращением. При этом кольцевая фреза 3 разбуривает опалубку и мосты, восстанавливая сообщение устья скважины с забойным участком и дренажной трещиной 11.

Далее компоновку колонн 1, 2 сдвигают в сторону устья скважины в следующий интервал разрыва и цикл операций повторяют. Таким образом, в скважине создают множество дренажных трещин.

Результаты математического моделирования

Дополнительно проводилась оценка напряженного состояния в окрестности герметизированного интервала скважины, в который подавалась жидкость под давлением (см. рис. 2). Скважина представлялась в виде цилиндрического отверстия радиусом R в однородной изотропной среде со следующими параметрами: модуль Юнга $E_1 = 3,6$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,17$, плотность $\rho_1 = 1\ 600$ кг/м³. Параметры полимерных мостов длиной H , установленных в скважину, принимались следующими: $E_2 = 0,25$ ГПа, $\nu_2 = 0,2$, $\rho_2 = 1\ 300$ кг/м³. Мосты в скважине удалены друг от друга на расстояние h .

На интервал скважины, расположенный между полимерными мостами, прикладывалось давление P , которое соответствовало давлению жидкости разрыва. Такое же давление прикладывалось на стенки полимерных мостов со стороны герметизированного интервала. На поверхностях контакта скважины и мостов задавалось условие сцепления без проскальзывания. Для расчета напряжений использовалась система уравнений линейной теории упругости, которая численно решалась методом конечных элементов.

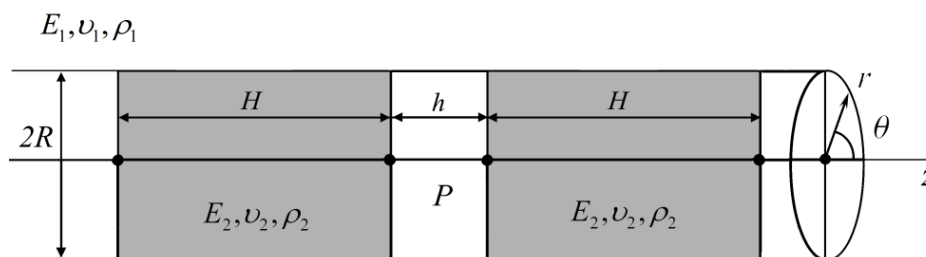


Рис. 2. Постановка задачи для расчета действующих напряжений

Расчеты напряжений проводились для мостов длиной $H = 0,4$ м с расстоянием $h = 0,01$ м между ними и радиусом скважины $R = 0,05$ м. В численных экспериментах рассчитывались осевые σ_{zz} и осесимметричные $\sigma_{\theta\theta}$ напряжения на стенке скважины, на расстоянии 5 мм и на расстоянии 10 мм от стенки. Результаты численных экспериментов приведены на рис. 3. На рис. 3, а изображены осевые напряжения, нормированные на давление жидкости.

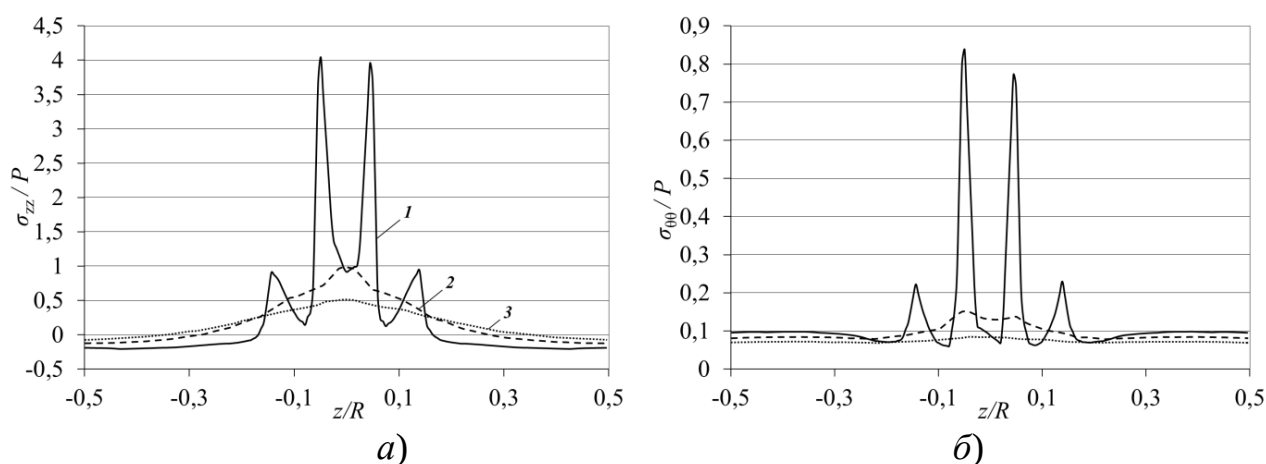


Рис. 3. Зависимость осевых σ_{zz} (а) и осесимметричных $\sigma_{\theta\theta}$ (б) напряжений, нормированных на давление жидкости P :

1 – на стенке скважины; 2 – на расстоянии 5 мм от стенки скважины; 3 – на расстоянии 10 мм от стенки скважины

В качестве нуля по осевой координате z взята середина герметизированного интервала. Как видно из графика, на стенке скважины (кривая 1) и на расстоянии 5 мм от нее (кривая 2), осевые напряжения в середине герметизированного интервала равны давлению жидкости. При тех же условиях осесимметричные напряжения в середине интервала достигают максимум 0,14 давления жидкости на расстоянии 5 мм от стенки скважины (см рис. 3, б).

Заключение

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что в герметизированном интервале осевые напряжения превышают по своим значениям осесимметричные. Это в свою очередь приводит к созданию условий для возникновения поперечного гидроразрыва, что подтверждается ранее полученными результатами [11]. При этом возникающие напряжения экспоненциально убывают при удалении от стенки скважины, как это показывают численные расчеты. Также стоит отметить пики напряжений на краях герметизированного интервала, которые связаны с приложенной нагрузкой. Возникновение данных пиков может привести к начальному разрушению горной породы на краях герметизированного интервала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект RFMEFI60417X0172).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Frank H., Ting R., Naj A. Evolution and application of in-seam drilling for gas drainage // International Journal of Mining Science and Technology. – 2013. – Vol. 23. – №. 4. – P. 543–553.
2. Lu S. et al. Application of in-seam directional drilling technology for gas drainage with benefits to gas outburst control and greenhouse gas reductions in Daning coal mine, China // Natural hazards. – 2014. – Vol. 73. – №. 3. – P. 1419–1437.
3. Jeffrey R. G. and Boucher C. Sand propped hydraulic fracture stimulation of horizontal in-seam gas drainage holes at dartbrook coal mine // Coal Operators' Conference, Wollongong, Australia, 2004. – P. 169–179.
4. Cheng L. et al. Research on Hydraulic Technology for Seam Permeability Enhancement in Underground Coal Mines in China // Energies. – 2018. – Vol. 11. – №. 2. – P. 427.
5. Патутин А.В., Тимонин В.В., Кондратенко А.С., Рыбалкин Л.А. Комплексные исследования угольных пластов в глубоких скважинах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 23–26.
6. Сердюков С.В., Дегтярева Н.В., Патутин А.В., Рыбалкин Л.А. Скважинный прецизионный дилатометр с интегрированной системой транспортирования вдоль ствола скважины // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 4. – С. 198–203.
7. Курленя М.В., Сердюков С.В., Патутин А.В. Определение деформационных свойств горных пород по данным прессиометрических испытаний в интервале гидроразрыва скважины // ФТПРПИ. – 2015. – № 4. – С. 96–102.
8. Леконцев Ю.М., Сажин П.В. Применение метода направленного гидроразрыва на шахте «Березовская» // ФТПРПИ. – 2008. – № 3. – С. 34–40.
9. Леконцев Ю.М., Сажин П.В., Ушаков С.Ю. Применение метода поинтервального гидроразрыва для разупрочнения породного прослойка в угольном пласте // ФТПРПИ. – 2012. – № 3. – С. 136–144.
10. Mills K., Jeffrey R., Black D., Meyer T., and Carey K. Developing Methods for Placing Sand-Propped Hydraulic Fractures for Gas Drainage in the Bulli Seam // Coal Operators' Conference, Wollongong, Australia. – 2006. – P. 190–199.
11. Азаров А.В., Курленя М.В., Патутин А.В., Сердюков С.В. Математическое моделирование напряженного состояния пород при касательной и нормальной нагрузках стенок скважины в интервале гидроразрыва // ФТПРПИ. – 2015. – № 6. – С. 3–10.

REFERENCES

1. Frank H., Ting R., Naj A. Evolution and application of in-seam drilling for gas drainage // International Journal of Mining Science and Technology. – 2013. – Vol. 23. – №. 4. – P. 543–553.
2. Lu S. et al. Application of in-seam directional drilling technology for gas drainage with benefits to gas outburst control and greenhouse gas reductions in Daning coal mine, China // Natural hazards. – 2014. – Vol. 73. – №. 3. – P. 1419–1437.
3. Jeffrey R. G. and Boucher C. Sand propped hydraulic fracture stimulation of horizontal in-seam gas drainage holes at dartbrook coal mine // Coal Operators' Conference, Wollongong, Australia, 2004. – P. 169–179.
4. Cheng L. et al. Research on Hydraulic Technology for Seam Permeability Enhancement in Underground Coal Mines in China // Energies. – 2018. – Vol. 11. – №. 2. – P. 427.
5. Patutin A.V., Timonin V.V., Kondratenko A.S., Rybalkin L.A. Integrated deep-borehole study of coal beds // Journal of Fundamental and Applied Mining Sciences. – 2014. – Vol. 1. – № 2. – P. 23–26.
6. Serdyukov S.V., Degtyareva N.V., Patutin A.V., Rybalkin L.A. Precision dilatometer with built-in system of advance along the borehole // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51. – № 4. – P. 860–864.
7. Kurlenya M.V., Serdyukov S.V., Patutin A.V. Assessment of deformation properties of rocks by pressuremeter testing in hydrofractured interval // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51. – № 4. – P. 718–723.
8. Lekontsev Yu.M., Sazhin P.V. Application of the directional hydraulic fracturing at berezovskaya mine // Journal of Mining Science. – 2008. – Vol. 44. – № 3. – P. 253–258.
9. Lekontsev Yu.M., Sazhin P.V., Ushakov S.Yu. Interval hydraulic fracturing to weaken dirt bands in coal // Journal of Mining Science. – 2012. – Vol. 48. – № 3. – P. 525–532.
10. Mills K., Jeffrey R., Black D., Meyer T., and Carey K. Developing Methods for Placing Sand-Propped Hydraulic Fractures for Gas Drainage in the Bulli Seam // Coal Operators' Conference, Wollongong, Australia. – 2006. – P. 190–199.
11. Azarov A.V., Kurlenya M.V., Patutin A.V., Serdyukov S.V. Mathematical modeling of stress state of surrounding rocks around the well subjected to shearing and normal load in hydraulic fracturing zone // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51. – № 6. – P. 1063–1069.

© C. B. Сердюков, А. В. Азаров, А. В. Патутин, 2018

ПРОППАНТ И РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДРЕНАЖНЫХ КАНАЛОВ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ МЕТОДОМ ГИДРОРАЗРЫВА

Сергей Владимирович Сердюков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, зав. лабораторией, тел. (913)745-30-03, e-mail: ss3032@yandex.ru

Татьяна Викторовна Шилова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (923)708-97-29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Рассмотрены особенности интенсификации дренирования угольных пластов методом интервального гидравлического разрыва. В работе приведены технические и технологические решения по получению проппанта нейтральной плавучести для расклинивания трещин, а также по рабочим жидкостям для интервального гидравлического разрыва низкотемпературных угольных пластов и очистки создаваемых дренажных каналов. Разработан легкий проппант для расклинивания трещин гидравлического разрыва в низкотемпературных угольных пластах. Проппант состоит из полых алюмосиликатных микросфер с полимерным покрытием из отвержденной эпоксидной смолы с вкраплениями термопласта и частиц магния. В работе предложены и описаны рабочие жидкости, последовательная закачка которых обеспечивает закрепление пачки проппанта в дренажном канале и его очистку от механических примесей и жидкостей гидравлического разрыва.

Ключевые слова: угольный пласт, предварительная дегазация, интервальный гидро-разрыв, проппант, рабочая жидкость, кислотная обработка.

A PROPPANT AND WORKING FLUIDS FOR DRAINAGE CHANNELS FORMATION IN A COAL SEAM USING HYDRAULIC FRACTURING

Sergey V. Serdyukov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Head of Laboratory, phone: (913)745-30-03, e-mail: ss3032@yandex.ru

Tatiana V. Shilova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (923)708-97-29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

The paper studies features of intensification of coal seams' drainage using interval hydraulic fracturing. There are technical and technological solutions used to obtain a proppant of neutral buoyancy for crack wedging, and also solutions devoted to working fluids for interval hydraulic fracturing of low-temperature coal seams and to cleaning of the created drainage channels. A light-weight proppant for wedging of hydraulic fracturing cracks in low-temperature coal seams has been developed. The proppant consists of hollow aluminosilicate microspheres with a polymer coating of a solidified epoxy resin with impregnations of a thermoplastic and magnesium particles. The working fluids are proposed, the sequential injection of which assures that the proppant pack in the drainage channel is secured and cleaned of mechanical impurities and fracturing fluids.

Key words: coal seam, preliminary degassing, interval hydraulic fracturing, proppant, working agent, acid treatment.

Введение

Дегазация угольного пласта, неразгруженного от горного давления, затруднена его низкой проницаемостью –обычно не выше $0,1\text{--}5\text{ мкм}^2$ [1]. Для достижения приемлемых темпов и степени извлечения метана бурят плотную сетку скважин, удаленных друг от друга на 3–10 м. Снижение числа скважин возможно только за счет увеличения радиуса их влияния. Эффективным способом решения этой задачи является создание множества дренажных каналов методом интервального гидроразрыва [2–5].

Опыт применения этой технологии в нефтедобыче показывает, что для создания высокопроницаемого дренажного канала необходимо:

- 1) заполнить трещину гидроразрыва прочными гранулами (проппантом), которые препятствуют ее смыканию горным давлением;
- 2) обеспечить сцепление гранул проппанта в дренажном канале, чтобы предотвратить их вынос в скважину;
- 3) очистить пачку проппанта от коллоидных образований, мелкодисперсных частиц горных пород и разрушенных гранул.

Экспериментально установлено, что и в угольных пластах гидроразрыв без расклинивания трещины проппантом малоэффективен – лишь кратковременно увеличивает дебит газа (до 3 раз), но не оказывает значимого влияния на извлечение метана скважиной за полный период ее эксплуатации [6, 7]. Напротив, множественные дренажные каналы с раскрытием 3–4 мм и радиусом в несколько метров, расположенные на расстоянии 4–6 м друг от друга, увеличивают на несколько месяцев производительность дегазационной скважины в пластах проницаемостью $0,02\text{--}0,03\text{ мкм}^2$ в 5 раз, а в менее проницаемых пластах – до 180 раз [6]. Таким образом, расклинивание трещин проппантом является обязательным элементом интенсификации дегазации угля методом гидроразрыва.

Прочность и плотность проппанта для шахтного гидроразрыва

Основными эксплуатационными свойствами проппанта являются плотность, размер и форма гранул, их прочность (сопротивление раздавливанию), которая должна быть не ниже сжатия трещины вмещающими породами. Максимальное сжимающее напряжение в угольном пласте обычно направлено горизонтально (σ_H), а вертикальное горное давление σ_v является либо наименьшим, либо средним главным напряжением [8, 9] и может служить оценкой снизу прочности проппанта для шахтного гидроразрыва. Полагая среднюю плотность толщи пород, покрывающей угольный пласт, равной $2,3\text{--}2,7\text{ г/см}^3$, получим, что для гидроразрыва пластов на глубине до 600 м прочность проппанта должна быть не ниже 16 МПа, а на глубинах от 600 до 800 м – 22 МПа [10].

Плотность проппанта должна обеспечивать его перенос рабочей жидкостью по гидравлическим каналам и в трещине. Гранулы переносятся потоком при условии, что скорость течения (V_F) выше, чем у гравитационного осаждения гранул (V_G) и минимальной скорости потока, требуемой для их перемещения (V_Q) вдоль горизонтальной плоскости. Скорость осаждения частиц при малых значениях параметра Рейнольдса ($Re \leq 1$) дается законом Стокса [11–13]:

$$V_G = \frac{(\rho_P - \rho_F) \cdot g \cdot d_P^2}{18\mu \cdot \rho_F}, \quad (1)$$

где ρ_P , ρ_F – плотности, соответственно, проппанта и жидкости; g – ускорение свободного падения; d_P – диаметр сферических частиц проппанта; μ – вязкость жидкости. Минимальная скорость потока, при которой происходит сдвиг частицы шарообразной формы по горизонтальной плоскости, дается выражением [14]

$$V_Q = \sqrt{\frac{2k \cdot g \cdot d_P \cdot (\rho_P - \rho_F)}{3\rho_F \cdot (1 - \cos \alpha)}}, \quad (2)$$

где k – коэффициент трения проппанта по стенке канала; α – угол, под которым поток сходит с шарообразной частицы ($\alpha < 45^\circ$). Значения V_G , V_Q могут быть снижены за счет уменьшения размеров гранул, разницы плотностей проппанта и жидкости, увеличения ее вязкости и плотности. Последний способ, широко применяемый в нефтедобыче, для интенсификации предварительной дегазации угля не используют из-за его дороговизны. В шахтных условиях гидроразрыв обычно выполняют водой.

Для наиболее распространенного в нефтедобыче сферического проппанта фракции 20/40 меш плотностью $2,6 \text{ г/см}^3$ (кварцевый песок) по формулам (1), (2) при $k = 0,5$, $\alpha = 40^\circ$ и $\rho_F = 1 \text{ г/см}^3$ (вода) получаем следующие значения критических скоростей: $V_G = 0,62 \text{ м/с}$ и $V_Q = 0,14 \text{ м/с}$. Максимальная из этих скоростей вместе с диаметром проходного сечения (D_Y) канала определяют нижний порог требуемой производительности насоса. При $D_Y = 15 \text{ мм}$ этот порог равен $6,5 \text{ л/мин}$, при $D_Y = 25 \text{ мм}$ – $18,3 \text{ л/мин}$. Чтобы избежать заиливания канала в восстающей дегазационной скважине и обеспечить требуемую массовую скорость переноса проппанта производительность насоса должна быть примерно на порядок выше приведенных оценок.

С другой стороны, объем создаваемых в угольном пласте дренажных каналов невелик и может быть оценен по известному выражению для дискообразных трещин [15]. В угле с модулем упругости $E = 3,6 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,17$ [16] и вязкостью разрушения $K_{IC} = 0,3\text{--}1,2 \text{ МН*м}^{1/2}$, объем

трещины радиусом 3 м составляет 5–20 л, 10 м – 100–400 л. Если ограничить продолжительность гидроразрыва 30 минутами, то для создания таких трещин было бы достаточно малогабаритного насоса производительностью 15 л/мин. Использование таких насосов возможно, если плотность проппанта приблизить к плотности воды. Тут возникает дилемма – что менее затратно: кварцевый песок и производительное насосное оборудование или более легкий, но дорогой керамический проппант вместе с маломощным насосом. При производстве небольших гидроразрывов в шахтных условиях второй подход, по нашему мнению, более предпочтителен.

Получение проппанта и рабочих жидкостей гидроразрыва угольного пласта

Очевидно, что наилучшей способностью к переносу обладает проппант той же плотности, что и вода: $\rho_P = \rho_F \rightarrow V_G = V_Q = 0$. Такой проппант создан нами с использованием полых микросфер. С учетом требуемой прочности и рыночной стоимости полых микросфер (стеклянных, алюмосиликатных) для получения проппанта для расклинивания трещин гидроразрыва в угольном пласте нами выбраны алюмосиликатные полые микросферы АСПМ-500 из зольных отходов сжигания угля на тепловых электростанциях. Основная фракция этих микросфер (73–85 % по массе) состоит из частиц размером 100–250 мкм (60/140 меш), плотностью 0,58–0,69 г/см³ и прочностью 18–36 МПа [17].

Известно, что в трещинах, раскрытие которых в 5,5 раз и более превышает размеры гранул, пачка проппанта неустойчива и он выносится в скважину, снижая тем самым эффективность дренирования пласта [18]. Чем легче проппанты, тем больше их вынос. Известным способом решения этой проблемы является повышение сцепления (слипание) частиц проппанта в трещине за счет нанесения слоя термореактивного полимера (термопласта) из фенолформальдегидных смол [19]. Такие RCP проппанты (Resin Coated Proppant) работоспособны при температуре пород (T) выше 40–80 °С, которой достаточно для отверждения термопласта. В низкотемпературных угольных пластах ($T < 40$ °С) этот способ впрямую не применим.

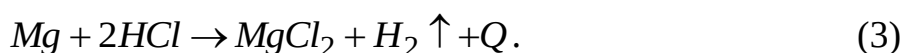
Чтобы обойти эту проблему нами разработано техническое решение, которое предусматривает кислотную обработку проппантовой пачки в трещине. Отметим, что такая обработка широко применяется в практике гидроразрыва для очистки и повышения проводимости создаваемого дренажного канала. Поставленная задача закрепления пачки проппанта в низкотемпературном пласте решается тем, что в полимерное покрытие из отвержденной эпоксидной смолы (ЭС) вкраплены частицы термореактивной смеси, содержащей фенолформальдегидные смолы (ФФС) с соотношением масс ЭС и ФФС от 5 : 1 до 1 : 5 и частицы магния с размерами до 100 мкм [20].

Разработанный проппант состоит из полых микросфер внешним диаметром d_1 и средней плотностью $\rho_s < \rho_F$, полимерного покрытия толщиной

$h = d_2 - d_1$ эффективной плотностью ρ_e с вкрапленными частицами размером $\leq (d_2 - d_1)$ средней плотностью $\rho_m > \rho_F$, которые занимают k -долю объема полимерного покрытия. Нейтральная плавучесть гранул в суспензии достигается при выполнении следующего условия:

$$\rho_f \cdot d_2^3 - \rho_s \cdot d_1^3 = [(1-k) \cdot \rho_e + k \cdot \rho_m] \cdot (d_2^3 - d_1^3).$$

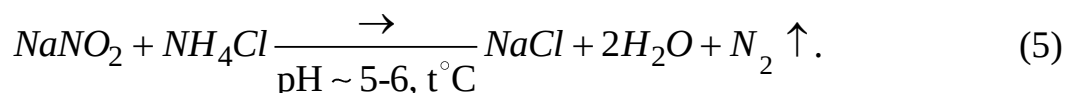
Магний берется в количестве достаточном для нагрева полимерного покрытия до температуры полного отверждения содержащихся в нем фенолформальдегидных смол за счет экзотермической реакции с соляной кислотой



Очистку пачки проппанта обычно проводят смешанным водным раствором, содержащим 12 % соляной (HCl) и 3 % плавиковой (HF) кислот. Технологически проще и безопаснее вместо HF применять раствор бифторида аммония $NH_4F \cdot HF$, дающий плавиковую кислоту при реакции с HCl



На завершающей стадии гидроразрыва угольного пласта после снижения кислотности жидкости в дренажном канале до $pH = 5-6$ мы предлагаем закачивать водный раствор нитрита натрия ($NaNO_2$), который в зоне разогрева реакции (3) вступает в реакцию с хлористым аммонием (продукт реакции (4)) с образованием газообразного азота, вытесняющего жидкость из дренажного канала в скважину



Это увеличивает проводимость канала по метану, давление которого в угольном пласте много ниже, чем в месторождениях природного газа. При низком давлении газа жидкость в трещинах существенно снижает темпы дегазации.

В целом, разработанная схема интенсификации предварительной дегазации угля включает: гидроразрыв водой, нагнетание водной суспензии легкого проппанта, кислотную обработку пачки проппанта раствором соляной кислоты и бифторида аммония, закачку водного раствора нитрита натрия.

Для экспериментальной проверки реализуемости разработанного решения был изготовлен экспериментальный образец проппанта. Для этого использовали фракцию 150–500 мкм алюмосиликатных полых микросфер АСПМ-500. Полимерное покрытие состоит из эпоксидной смолы ЭД-16 с включениями твердых частиц магния (порошок МПФ-4) и термореактивной порошковой смеси,

содержащей новолачную фенолформальдегидную смолу СФ-010 и отвердитель гексаметиленetetрамина (ГМТА) в соотношении, рекомендованном производителем: количество ГМТА составляет 8–12 мас.% СФ-10. Смолу СФ-10 и гексаметилентетрамин измельчали в мельнице с получением фракции с размером частиц менее 25 мкм. Для отверждения эпоксидной смолы использовали полиэтиленполиамин.

Нанесение покрытия на гранулы проводили при температуре 20–24 °С. Для этого в лопастной смеситель загружали 1 кг алюмосиликатных полых микросфер АСПМ-500 и добавляли 5 г аминопропилтриэтоксисилана, перемешивали в течение 5 мин, затем добавляли 40 г эпоксидной смолы и перемешивали в течение 5 мин, добавляли 10 г полиэтиленполиамин и продолжали перемешивание в течение еще 5 мин. Далее в смеситель вводили от 8 до 200 г измельченной ФФС и измельченный ГМТА в количестве 10 мас.% ФФС. Затем добавляли порошок магния МПФ-4 массой от 1 до 25 мас.% ФФС и перемешивали в течение 5 мин. Приготовленный таким образом проппант с полимерным покрытием выгружали в металлическую емкость и направляли на отверждение эпоксидной смолы при температуре 20–24 °С в течение 24 час. Затем полученные гранулы рассеивали в инерционном грохоте и использовали для изготовления цилиндрического образца пачки проппанта. Для этого брали 0,1 кг изготовленного проппанта и загружали в металлическую цилиндрическую форму из нержавеющей стали диаметром 60 мм с дренажными отверстиями для циркуляции кислотного раствора. В форму с набивкой проппантов вставляли пуансон и прикладывали к нему давление 6,3 МПа, имитирующее горное давление. Форму помещали в низкотемпературный термостат (криостат) с диапазоном регулирования температуры от –20 до +200 °С и выдерживали 30 мин при заданной температуре, после чего через дренажные отверстия подавали 15 % водный раствор соляной кислоты, охлажденной до заданной температуры, и выдерживали 30 минут.

По окончании кислотной обработки раствор соляной кислоты сливали и через дренажные отверстия промывали набивку проппантов водой в течение 1 час. Затем извлекали из термостата форму, из нее цилиндрический образец сцепленных проппантов и стандартным способом определяли его прочность на одноосное сжатие. Полученные в опытах значения прочности сцепления проппантов в зависимости от содержания в полимерном покрытии магния и температуры, усредненные по образцам проппантов с соотношением ЭС и ФСС в полимерном покрытии от 1 : 5 до 5 : 1 приведены в таблице.

По результатам испытаний проппантов с различным содержанием частиц магния в полимерном покрытии, приведенных в таблице, следует, что эффективная прочность сцепления между гранулами проппанта при низких пластовых температурах (до 40 °С) достигается при содержании частиц магния не менее 10 % от массы фенолформальдегидных смол.

Прочность сцепления проппантов при различных температурах и содержаниях магния в полимерном покрытии

Mg, %.мас. ФФС	Прочность сцепления Н/см ² при температуре:				
	5 °С	10 °С	20 °С	30 °С	40 °С
1	11	5	21	17	23
5	27	44	26	29	34
10	166	158	192	187	197
20	187	198	231	207	191
25	209	207	244	217	235

Полученные результаты показывают реализуемость разработанного технического решения по получению проппантов нейтральной плавучести для шахтного гидроразрыва угольных пластов, удовлетворительные характеристики проппантов из полых алюмосиликатных микросфер с эпоксидным покрытием, содержащим термопласты и частицы магния, а также практическую пригодность химического способа разогрева проппанта для получения устойчивой их пачки в трещине гидроразрыва.

Заключение

Разработан легкий проппант для расклинивания трещин гидравлического разрыва в низкотемпературных угольных пластах. Проппант состоит из полых алюмосиликатных микросфер с полимерным покрытием из отвержденной эпоксидной смолы с вкраплениями термопласта и частиц магния.

Предложены рабочие жидкости, последовательная закачка которых обеспечивает закрепление пачки проппанта в дренажном канале и его очистку от механических примесей и жидкостей гидроразрыва.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект RFMEFI60417X0172).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pan Z., Connell L. D., Camilleri M. Laboratory characterisation of coal reservoir permeability for primary and enhanced coalbed methane recovery //International Journal of Coal Geology. – 2010. – Т. 82. – №. 3-4. – С. 252-261.
2. Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В., Шилова Т. В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // ФТПРПИ. – 2017. – № 6. –С. 3–9.
3. Сердюков С. В., Дегтярева Н. В., Патутин А. В., Шилова Т. В. Технический комплекс для множественного локального гидроразрыва породного массива в необсаженных скважинах // ФТПРПИ. – 2016. – № 6. – С. 180–186.
4. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Ушаков С. Ю. Применение метода поинтервального гидроразрыва для разупрочнения породного прослойка в угольном пласте //Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 3. – С. 136–144.

5. Клишин В. И., Опрук Г. Ю., Тациенко А. Л. Применение поинтервального гидроразрыва угольного пласта для интенсификации пластовой дегазации // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2016. – №. 3. – С. 33–39.
6. Jeffrey R. G. and Boucher C. Sand propped hydraulic fracture stimulation of horizontal in-seam gas drainage holes at dartbrook coal mine / Coal Operators' Conference, Wollongong, Australia, 2004. – pp. 169–179.
7. Saldungaray P. M. et al. Hydraulic fracture optimization in unconventional reservoirs // SPE Middle East unconventional gas conference and exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 2012.
8. Liu C. Distribution laws of in-situ stress in deep underground coal mines // Procedia Engineering. – 2011. – 26. – pp. 909–917.
9. Thakur P. Advanced Reservoir and Production Engineering for Coal Bed Methane. – Gulf Professional Publishing, 2016.
10. Авдеев А. П., Баловнев В. П. и др. Угольная база России. Том II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский бассейны, месторождения Алтайского края и Республики Алтай). – М. : ООО «Геоинформцентр», 2003. – 604 с.
11. Liang F. et al. A comprehensive review on proppant technologies // Petroleum. – 2016. – Т. 2. – №. 1. – С. 26–39.
12. Mack M. et al. Quantifying proppant transport in thin fluids: theory and experiments // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. – Society of Petroleum Engineers, 2014.
13. Liang F. et al. Overview of existing proppant technologies and challenges // SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. – Society of Petroleum Engineers, 2015
14. Гукасов Н. А., Брюховецкий О. С., Чихоткин В. Ф. Гидродинамика в разведочном бурении. – М. : Недра-Бизнесцентр, 2000. – 304 с.
15. Perkins T. K., Kern L. R. Widths of hydraulic fractures // J. Petrol. Technol. – 1961. – V. 13. – № 9. – pp. 937–949.
16. Шубин В. П. К вопросу об исследовании физико-механических свойств некоторых пород каменного угля шахт Кузбасса // Известия ТПИ. – 1951. – Т. 8. – Вып. 1. – С. 130–170.
17. Алюмосиликатные микросферы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ors.by/alyumosilikatnye-mikrosfery.html> (дата обращения: 25.12.2017).
18. Губский. А. Технология концевое экранирования на месторождениях Западной Сибири. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/russia00/aut00/tip_screenout.pdf (дата обращения: 25.12.2017).
19. Hughes E., Barmatov J., Geddes M., Fuller B., Drochon S., Makarychev-Mikhailov Delivery of Particulate Material Below Ground, US Patent Application No. 20120048554 (2012).
20. Патентная заявка РФ №2017143340. Проппант для гидравлического разрыва низко-температурных горных пород / Сердюков С. В., Шилова Т. В., Патутин А. В. – дата поступл. 12.12.2017.

REFERENCES

1. Pan Z., Connell L. D., Camilleri M. Laboratory characterisation of coal reservoir permeability for primary and enhanced coalbed methane recovery // International Journal of Coal Geology. – 2010. – V. 82. – №. 3–4. – С. 252–261.
2. Kurlenya M.V., Serdyukov S.V., Patutin A.V., Shilova T.V. Enhancement of coal bed de-gassing by hydraulic fracturing // Journal of mining science. – 2017. – № 6.
3. Serdyukov S. V. et al. Open-hole multistage hydraulic fracturing system // Journal of Mining Science. – 2016. – V. 52. – №. 6. – С. 1210–1215.
4. Lekontsev Y. M., Sazhin P. V., Ushakov S. Y. Interval hydraulic fracturing to weaken dirt bands in coal // Journal of Mining Science. – 2012. – V. 48. – №. 3. – С. 525–532.

5. Klishin V. I., Opruk G. Y., Tatsienko A. L. Technology and means of a coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – V. 53. – №. 1. – C. 012019.
6. Jeffrey R. G. and Boucher C. Sand propped hydraulic fracture stimulation of horizontal in-seam gas drainage holes at dartbrook coal mine / Coal Operators' Conference, Wollongong, Australia, 2004. – pp. 169–179.
7. Saldungaray P. M. et al. Hydraulic fracture optimization in unconventional reservoirs // SPE Middle East unconventional gas conference and exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 2012.
8. Liu C. Distribution laws of in-situ stress in deep underground coal mines // Procedia Engineering. – 2011. – 26. – pp. 909–917.
9. Thakur P. Advanced Reservoir and Production Engineering for Coal Bed Methane. – Gulf Professional Publishing, 2016.
10. Avdeev A.P., Balovnev V.P. Coal base of Russia. Volume II. Coal basins and deposits of Western Siberia (Kyznetskiy, Gorlovskiy, West-Siberian basins, deposits of Altai region and Republic of Altai). – M.: OOO «Geoinformcenter», 2003. – 604p.
11. Liang F. et al. A comprehensive review on proppant technologies // Petroleum. – 2016. – V. 2. – №. 1. – C. 26-39.
12. Mack M. et al. Quantifying proppant transport in thin fluids: theory and experiments // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. – Society of Petroleum Engineers, 2014.
13. Liang F. et al. Overview of existing proppant technologies and challenges // SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. – Society of Petroleum Engineers, 2015
14. Gukasov N.A et al. Hydrodynamics in exploratory drilling. – M.: Nedra- Business Center, 2000. – 304 c.
15. Perkins T. K., Kern L. R. Widths of hydraulic fractures // J. Petrol. Technol. -1961. – V.13. -№ 9. – pp. 937–949.
16. Shubin V.P. To the question of study of the physical and mechanical properties of some coals from the Kuzbass mines // Izvestiya TPI. -1951. – V. 8. – V. 1 – P. 130–170.
17. Aluminosilicate microspheres. [Electronic resource]. – <http://ors.by/alyumosilikatnye-mikrosfery.html> (date of the application: 25.12.2017).
18. Gybskii A. The technology of end shielding at the fields of Western Siberia [Electronic resource]. https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/russia00/aut00/tip_screenout.pdf (date of the application: 25.12.2017).
19. Hughes, E. Barmatov, J. Geddes, M. Fuller, B. Drochon, S. Makarychev-Mikhailov, Delivery of Particulate Material Below Ground, US Patent Application No. 20120048554 (2012).
20. Patent application RF №2017143340. Proppant for hydraulic fracturing of low-temperature rocks/ Serdyukov S.V., Shilova T.V., Patutin A.V. – date of receipt. 12.12.2017.

© C. B. Сердюков, Т. В. Шилова, 2018

ЭФФЕКТИВНЫЙ РАБОЧИЙ ЦИКЛ ПНЕВМОУДАРНОЙ МАШИНЫ

Павел Николаевич Тамбовцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела горного машиноведения и бурения ИГД СО РАН; Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Россия, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, доцент кафедры строительных машин, автоматики и электротехники, тел. (953)790-94-02, e-mail: tpn@ngs.ru

В работе сравнивается эффективность рабочих циклов погружных пневмоударников, пневмопробойников и пневмомолотов, разработанных в ИГД СО РАН. В качестве основных критериев эффективности циклов использовались: ударная мощность и КПД. КПД определялся как отношение энергии единичного удара к энергии сжатого воздуха, поступающего к машине в течении цикла. Установлено, что максимальным КПД обладают погружные пневмоударники и пневмомолоты, в конструкции которых, применяется упругий клапан. Рассмотрена новая конструктивная схема пневмоударного механизма, имеющая два упругих клапана и два пластинчатых клапана. С помощью компьютерного моделирования проведен численный анализ энергетических показателей рабочего цикла ударных механизмов. Установлено, что рабочий цикл новой конструктивной схемы обеспечивает высокие энергетические показатели машины. Результаты расчета подтверждаются экспериментальными данными, полученными ранее в ИГД СО РАН.

Ключевые слова: пневмоударные машины, клапанное воздухораспределение, показатели рабочего цикла, компьютерное моделирование, ударная мощность, КПД.

EFFECTIVE OPERATING CYCLE OF A PNEUMATIC PUNCH MACHINE

Pavel N. Tambovtsev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Mining Engineering and Drilling Dept.; Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113, Leningradskaya St., Novosibirsk, 630008, Russia, Associate Professor, Department of Construction Machines, Automation and Electrical Engineering, phone: (953)790-94-02, e-mail: tpn@ngs.ru

The author of the article compares the efficiency of the operating cycles of downhole hammers, pneumodriffs and pneumatic hammers produced in the Institute of Mining SB RAS. The main criteria for the effectiveness of the cycles were: impact power and efficiency coefficient. The efficiency coefficient was defined as the ratio of the energy of a single impact to the energy of the compressed air supplied to the machine during the cycle. It is established that the downhole hammers and pneumatic hammers with elastic valves possess maximum efficiency. A new structural design of a pneumatic punch mechanism containing two elastic valves and two flat valves has been studied. With the help of computer modeling, a numerical analysis of the energy parameters of the operating cycle of impact mechanisms is carried out. It is established that the operating cycle of the new design scheme makes it possible to increase the energy characteristics of the machine. The results of the calculation are confirmed by the experimental data earlier obtained in the Institute of Mining, SB RAS.

Key words: pneumatic punch machine, valve air distribution, operating cycle indicators, computer modeling, impact power, efficiency coefficient.

Введение

Машины ударного действия широко используют в горнодобывающей и строительной отрасли. Они имеют гидравлический, электрический и пневматический приводы [1–4]. Ударные машины с пневмоприводом отличаются простотой конструкций и надежностью в эксплуатации, наиболее широко применяются для бурения скважин в массиве [7, 8, 11–13]. Преимущества пневмоударных машин сдерживаются низким коэффициентом полезного действия (КПД) пневматического привода и в большинстве случаев не высоким КПД самих устройств пневмоударных механизмов. Выражение для расчета КПД пневмоударной машины имеет вид:

$$\eta = \frac{A_1}{A_2} = \frac{6 \cdot 10^3 \cdot A_1 \cdot f}{p \cdot Q}, \quad (1)$$

где η – КПД, %; A_1 – энергия единичного удара, Дж; A_2 – потребленная энергия сжатого воздуха, поступающего к машине в течение цикла, Дж, $A_2 = p_0 \cdot Q / (60 \cdot f)$; f – частота ударов, Гц; p – атмосферное давление, Па; Q – расход воздуха, м³/мин.

В табл. 1 приведены технические характеристики известных пневмоударных машин [5–11, 14–15], которые выпускаются серийно или созданы в ИГД СО РАН в качестве опытно-промышленных образцов. В настоящее время актуальными разработками являются погружные пневмоударники для бурения скважин в крепких породах, пневмопробойники и пневмомолоты, используемые в строительных спецтехнологиях.

Исследованию рабочих процессов погружных пневмоударников посвящены работы [6–8, 11–17]. В табл. 1 значения КПД пневмоударников определены с учетом расхода сжатого воздуха, отобранного из магистрали для продувки шлама. Для моделей пневмоударников КПД составляет: $\eta = 22,6$ % (М48); 32,5 % (М74У); 35,1 % (П110ЭН). На продувку скважины диаметром 105 мм затрачивается в среднем 2,5 м³/мин, отобранного из магистрали воздуха [6], остальное уходит на работу ударного механизма: 4,5 м³/мин (М48); 4 м³/мин (М74У), 3,5 м³/мин (П110ЭН) воздуха. При таком учете расхода воздуха КПД ударных механизмов составит: 35 % (М48), 51 % (М74У), 60 % (П-110ЭН).

Серийные пневмопробойники, разработанные в ИГД СО РАН, имеют достаточно низкий КПД: ИП-4610 – 4,4 %; ИП-4605 – 7,4 %; СО-144 – 14,3 %, конструкции и принцип работы зарубежных пневмопробойников “Грундомат” [18] (Германия), “HammerHead” [19] (США), “BigShot” [20, 21] (Канада) аналогичны. КПД пневмомолотов “Тайфун” находится в пределах 28–48 % [10]: Тайфун 8 – 28 %, Тайфун 40 – 34,3 %, Тайфун 190, 500 – 48%.

Таблица 1

Технические характеристики пневмоударных машин ИГД СО РАН

Показатели	Погружные пневмоударники [5–8]			Пневмопробойники ИП, СО [9]			Пневмомолоты «Тайфун» [10]		
	М48	М74у (П105-2к)	П-110 (3,5; ЭН)	ИП-4610	СО-144	ИП-4605	Т-8	Т-40	Т-500
Давление абс. p , МПа	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Энергия удара A , Дж	93	180	185	15	65	90	140	400	4000
Частота ударов f , Гц	28,3	19	19	6,5	5,5	5,5	5,0	3,5	1,6
Расход воздуха Q , м ³ /мин	7,04	6,5	6,0	1,32	1,5	4	1,5	2,5	8
Мощность N , Вт	2632	3456	3515	97	357,5	495	700	1400	6400
Масса ударника m , кг	2,80	4,45	4,45	–	7	18,5	8	40	500
Масса машины M , кг	16,1	18,2	18	14	28	55	17	80	1350
Габариты: Длина, мм	470	594	590	1200	1350	1500	750	800	2000
Диаметр, мм	92	96	96	60	71	95	95	155	400
Удельн. расход, q , м ³ /Дж	$44 \cdot 10^{-6}$	$31 \cdot 10^{-6}$	$28 \cdot 10^{-6}$	$225 \cdot 10^{-6}$	$70 \cdot 10^{-6}$	$135 \cdot 10^{-6}$	$35 \cdot 10^{-6}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$21 \cdot 10^{-6}$
КПД, η , %	22,6	32,5	35,1	4,4	14,3	7,4	28,0	34,3	48,0

Рабочим циклам [11, 6, 9, 24, 26, 27], рассмотренных пневмоударных машин, в разной степени свойственны недостатки, снижающие энергетические показатели машин: 1) сопротивление прямому ходу ударника от сжимаемого воздуха в камере обратного хода (КОХ) и при впуске воздуха в КОХ перед ударом (свойственно пневмоударникам и пневмопробойникам); 2) сопротивление обратному ходу ударника от магистрального давления воздуха со стороны камеры прямого хода (КПХ) (пневмопробойники, пневмомолоты); 3) потери внутренней энергии сжатого воздуха при выхлопе в атмосферу (пневмоударники, пневмопробойники, пневмомолоты).

Рассмотрим новый пневмоударный механизм [29], обеспечивающий эффективный рабочий цикл. Эффективность механизма оценивается с позиции величин: КПД и ударной мощности. Пневмоударный механизм имеет рабочие камеры 5, 18 (рис. 1) прямого хода, упругие клапаны 14, 15, установленные в задней и передней части ударника 2, пластинчатые клапаны 12, 13 и накопительные камеры 10, 19. Прямой ход ударника осуществляется под действием сжатого воздуха в камерах 5 и 18. Впуск воздуха в камеру 18 осуществляется в конце обратного хода ударника, при смещении пластинчатого клапана 13, открывающего воздухопроходной канал между камерами 19 и 18. Выхлоп из камеры 18 происходит в конце прямого хода через выхлопные пазы 17. Клапан 12

и накопительная камера 10 обеспечивает в достаточном объеме подачу сжатого воздуха в КОХ 6 после удара. Впуск сжатого воздуха в КОХ осуществляется при смещении ударником клапана 12. Наличие упругих клапанов 14, 15 исключает сжатие воздуха в рабочих камерах 6 и 18, особенности работы кольцевых упругих клапанов в пневмоударных машинах подробно рассмотрены в работах [24–26]. Ударный механизм позволяет увеличить энергию и частоту ударов и снизить непроизводительный расход сжатого воздуха.

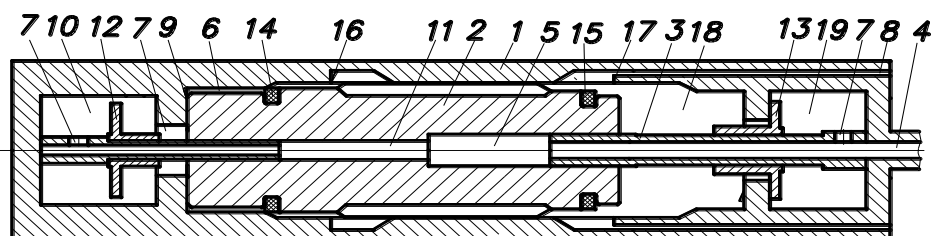


Рис. 1. Конструктивная схема пневмоударного механизма[28]:

1 – корпус; 2 – ударник; 3 – патрубок; 4 – магистраль; 5 – камера прямого хода; 6 – камера обратного хода; 7, 8 – воздухораспределительные и выхлопные каналы (окна); 9 – наковальня; 10, 19 – накопительные камеры (ресивер рабочих камер); 11 – дроссель; 12, 13 – пластинчатые клапаны отсечки; 14, 15 – выхлопной упругий клапан; 16, 17 – выхлопные пазы; 18 – дополнительная камера прямого хода

Методы и результаты исследования рабочего цикла

Рабочий процесс нового механизма исследован на численной модели, построенной с помощью компьютерной программы [29]. Для оценки достоверности результатов моделирования получены расчетные диаграммы цикла известных пневмоударных устройств и проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными ранее в ИГД СО РАН. На рис. 2 представлены схемы к расчету (схема БК – пневмопробойник, УК – молот «Тайфун», 2ПК-2УК – новый ударный механизм) и обозначения основных параметров.

В расчетные модели подставляли значения физических и конструктивных параметров (T_i , p_i , m_j , x_i , V_i , S_{ij} , J_{ij}). Значения массы ударника ($m_1 = 18,5$ кг), эффективной площади ударника ($S_{21} = 48$ см²), координаты перемещения ударника в начале выхлопа из камеры обратного хода ($L_1 = 118$ мм), габаритного хода ударника ($L_{\Gamma} = 190$ мм) общие для всех расчетных моделей. Рабочие циклы устройств оценивались непосредственно по энергии и частоте ударов, расходу сжатого воздуха в установившемся режиме работы устройства.

На рис. 3 изображены расчетные диаграммы, в табл. 2 приведены выходные характеристики.

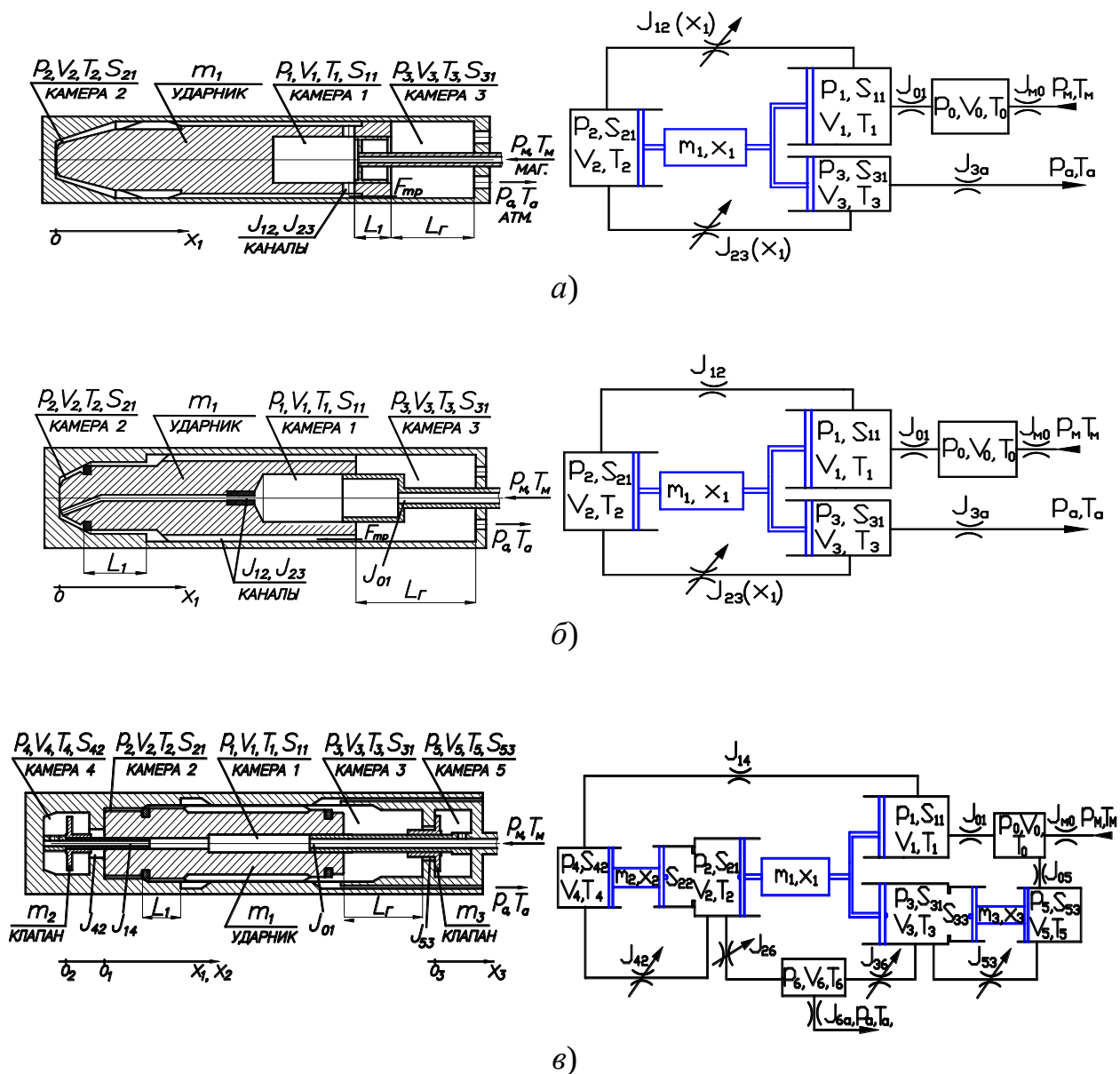


Рис. 2. Расчетные схемы пневмоударных механизмов (слева – конструктивная схема, справа – схема пневматических связей): а) БК; б) УК; в) 2ПК-2УК; принятые обозначения: V_i – объемы камер; J_{ij} – площади воздухопроходных сечений; m_j – массы подвижных элементов; S_{ij} – эффективные площади масс m_j со стороны i -камер; T_i, T_m – абсолютная температура воздуха в i – камере, магистрали; p_m, p_i, p_a – абсолютное давление воздуха в магистрали, i - камере и в атмосфере

Расчетные показатели рабочего цикла

Показатели	Пневмоударные механизмы		
	рис. 2, а	рис. 2, б	рис. 2, в
Масса ударника, m_1 , кг	18,5	18,5	18,5
Давление абсолютное, p , МПа	0,7	0,7	0,7
Энергия удара, A , Дж	94	169	280
Частота ударов, n , Гц	6,06	2,81	7,26
Ударная мощность, N , Вт	569	474	2 030
Абсолютный. Расход, Q , м ³ /мин	4,2	0,96	1,67
Удельный расход, q , м ³ /Дж	$123 \cdot 10^{-6}$	$33,7 \cdot 10^{-6}$	$13,7 \cdot 10^{-6}$
КПД машины, η , %	8,1	29,6	73,0

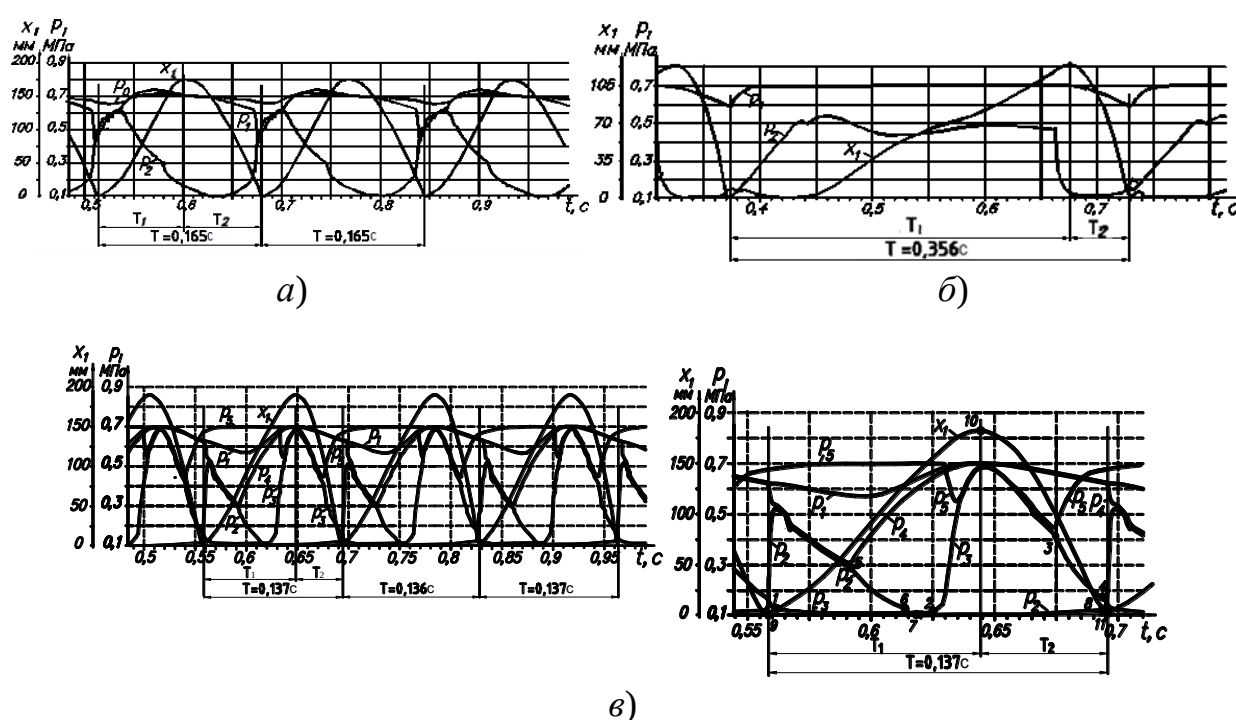


Рис. 3. Расчетные диаграммы рабочих циклов перемещения ударника $x_1(t)$ и абсолютного давления $p_i(t)$ сжатого воздуха в i -камерах пневмоударных механизмов:

а) БК; б) УК; в) 2ПК-2УК (слева три цикла, справа один цикл); t – время, с;
 T – период цикла; T_1 – период обратного хода; T_2 – период прямого хода

Обсуждение

Достоверность результатов расчета подтверждается экспериментальными данными – расчетные (рис. 3, а, б) и экспериментальные [9, 27] диаграммы хорошо согласуются, максимальное расхождение выходных показателей не более 15 % (табл. 3).

Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета

Показатели	Схема рис. 2, а			Схема рис. 2, б		
	эксперим. (ИП-4605) [9]	расчет (табл. 2)	откл., %	эксперим. (Тайфун-40) [27]	расчет (табл. 2)	откл., %
Масса ударника, m_1 , кг	18,5	18,5	-	40	18,5	-
Энергия удара A , Дж	90	94	+4,4	400	169	-
Частота ударов n , Гц	5,5	6,06	+10	3,5	2,81	-
Абс. расход Q , м ³ /мин	4	4,2	+5	2,5	0,96	-
Ударная мощность N , Вт	495	569	+14,9	1416	474	-
Удел.расход q , м ³ /Дж	$135 \cdot 10^{-6}$	$123 \cdot 10^{-6}$	-8,9	$29,4 \cdot 10^{-6}$	$33,7 \cdot 10^{-6}$	+14,6
КПД машины η , %	7,4	8,1	9,4	34,3	29,6	-13,7

Рабочий цикл нового пневмоударного механизма, представленный на диаграммах (рис. 3, в, г), характеризуется следующим: сопротивление движению ударника от давления воздуха при прямом и обратном ходе сведено к минимуму (участок кривой p_2 т. 7–8; кривая p_3 т. 1–2); пластинчатые клапаны обеспечивают подачу сжатого воздуха в КОХ (кривая p_2 : т. 8) и в дополнительную КПХ (кривая p_3 : т. 2), перекрывают доступ (кривая p_2 : т. 5; кривая p_3 : т. 3) до начала выхлопа (кривая p_2 : т. 6; кривая p_3 : т. 4), после прекращения подачи сжатого воздуха в соответствующую рабочую камеру происходит его расширение (кривая p_2 : т. 5–6; кривая p_3 : т. 3–4), до начала выхлопа действует низкое избыточное давление ($p_2 = 0,05$ МПа, т. 6; $p_3 = 0,08$ МПа, т. 4). Пневмоударный механизм имеет расчетные показатели: энергия единичного удара – 280 Дж, частота – 7,26 Гц, расход воздуха – 1,67 м³/мин, ударная мощность $N = 2030$ Вт, удельный расход $q = 13,7 \cdot 10^{-6}$ м³/Дж, КПД $\eta = 73\%$.

Заключение

Рабочий цикл новой конструктивной схемы клапанного пневмоударного механизма обеспечивает высокую ударную мощность и КПД, результаты компьютерного моделирования показали, что расчетный КПД достигает 73 %, ударная мощность на единицу массы ударника 110 Вт/кг. Адекватность расчетной модели подтверждается экспериментальными данными. Проведенные исследования повышают практический интерес к разработке и внедрению принципиально новых конструкций пневмоударных машин с динамически подобным рабочим циклом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wu, T., Tang, Y., Tang, S., Li, Y., He W., Chen E. Design and analysis of a new down-the-hole electromagnetic hammer driven by tube linear motor // IET Electric Power Applications – 2017. – Vol. 11., No. 9. – С. 1558–1565.

2. Zou, D. Rock Drilling. In: Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering. Singapore: Springer, 2017. С. 49–103.
3. Song C, Chung J, Kim J. H., Oh J.Y. Design optimization of a drifter using the Taguchi method for efficient percussion drilling // Journal of Mechanical Science and Technology – 2017. – Vol. 31., No. 4. С. 1797–1803.
4. Hydraulic DTH Fluid / Mud Hammers with Recirculation Capabilities to Improve ROP and Hole Cleaning For Deep, Hard Rock Geothermal Drilling / Wittig V., Bracke R., Hyun-Ick Y. / Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.
5. АсГАРД, Пневмоударник М48, Технические характеристики. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.as-gard.ru/production/9/view/357>, (12.03.2018).
6. Гаун В.А. Некоторые направления повышения эффективности погружных пневмоударников // Сборник научных трудов «Пневматические буровые машины». – Новосибирск, 1984.
7. Lipin, A. A. Promising pneumatic punchers for borehole drilling // Journal of Mining Science. – 2005. – Vol. 41. – No. 2. – Pp. 157–161.
8. Тимонин В. В. Погружные пневмоударники для подземных условий отработки месторождений // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 2. – С. 13–17.
9. Гурков К. С. Климашко В. В., Костылев А. Д., Плавских В. Д., Русин Е. П., Смоляницкий Б. Н., Тупицин К. К., Чепурной Н. П. Пневмопробойники. – Новосибирск, 1990. – 218 с.
10. Смоляницкий Б. Н., Червов В. В., Трубицин В. В., Тищенко И. В., Вебер И. Э. Новые пневмоударные машины «Тайфун» для специальных строительных работ // Механизация строительства. – 1997. – № 7. – С. 5–8.
11. Есин Н. Н., Костылев А. Д., Гурков К. С., Смоляницкий Б. Н. Пневматические машины ударного действия для проходки скважин и шпуров. – Новосибирск, 1986. – С. 66–66.
12. Hwang, U.K., Lim, J. H. Optimization of down-the-hole hammer using experimental design method // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A. – 2016. – Vol. 40 (6). – С. 603–611.
13. Hwang, U.K., Modelling and Test of Down-the-Hole Hammer // Journal of Drive and Control, – 2015. – Vol. 12 No. 2. – Pp. 34–38.
14. Гаун В. А. Авторское свидетельство 998740 (СССР), МПК E21B 4/14 (2000/01). Пневматический ударный механизм; патентообладатели: ИГД СО АН СССР – заявка № 2604547; заявл. 17.04.1978, опубл. 23.02.1983, в Бюл. № 7.
15. Липин А. А., Белоусов А. В., Заболоцкая Н. Н., Пат. 2252996 Российская Федерация, МПК E21B 4/14 (2000/01). Погружной пневмоударник; патентообладатели: ИГД СО АН СССР – заявка № 2004100896/03; заявл. 09.01.2004, опубл. 27.05.2005 в Бюл. № 15.
16. Lipin, A. A., Timonin V.V., Kharlamov, Yu. P. Circulation system of a pneumatic drill with central drilling mud removal // Journal of Mining Science. – 2013. – Vol. 49, No. 2. – Pp. 248–253.
17. Eremenko V. A., Karpov V. N., Timonin V. V., Shakhtorin I. O., and Barnov N. G. Basic trends in development of drilling equipment for ore mining with block caving method // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51, No. 6. – Pp. 1113–1125.
18. Grundomat pneumatic piercing tool // <http://www.tttechnologies.com/download/literature/grundomat-lit.pdf> (12.03.2018)
19. Piercing tools. Operator's manual. – HammerHead trenchless equipment. – <https://www.hammerheadtrenchless.com/sites/default/files/960-2000.pdf> (12.03.2018).
20. Footage Tools Inc. (n.d.). BigShot underground piercing tools [Technical brochure]. Retrieved from: <http://www.footagetools.com/wp-content/uploads/2017/07/BigShotBrochure-1.pdf>.
21. Footage Tools Inc. (n.d.). BigShot underground piercing tools. Owner's Manual [Technical brochure]. – Retrieved from: <http://www.footagetools.com/wp-content/uploads/2017/07/BigShot-Owners-Manual-1.pdf>.

22. Smolyanitsky B. N., Chervov V. V. Enhancement of Energy Carrier Performance in Air Hammers in Underground Construction // Journal of Mining Science. – 2014. – Vol. 50, No. 5. – Pp. 918–928.
23. Chervov V. V., Chervov A. V. Determination of operability conditions for ring-shaped elastic valve in air hammer with variable structure of impact capacity// Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51, No. 6. – Pp. 1132–1138.
24. Tishchenko I. V., Chervov V.V., Smolyanitsky B. N. Evaluation of Layout of Air Drill Hammer with Smooth Adjustment of Impact Impulse Frequency // Journal of Mining Science. – 2017. – Vol. 53, No. 1. – Pp. 109–116.
25. Petreev A. M., Primychkin A. Yu. Ring-type elastic valve operation in air hammer drive // Journal of Mining Science. – 2016. – Vol. 52, No. 1. – Pp. 135–145.
26. Chervov V.V., Smolyanitsky B.N., Experimental estimate of power variation range of pneumatic hammer with mechanical locking of elastic valve// Journal of Mining Science. – 2016. – Vol. 52, No. 5. – Pp. 913–918.
27. Chervov V.V. Control of air feed to back-stroke chamber of the pneumatic impact device //Journal of Mining Science. – 2003. – Vol. 39, No. 1. – Pp. 64–71.
28. Тамбовцев П.Н. Заявка на изобретение № 2017119060/03(032965) Российская Федерация, Пневмоударная машина двойного действия; заявл. 31.05.2017.
29. ESAITISimulationx [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simulationx.com>, (12.03.2018).

REFERENCES

1. Wu, T., Tang, Y., Tang, S., Li, Y., He W., Chen E. Design and analysis of a new down-the-hole electromagnetic hammer driven by tube linear motor (2017). IET Electric Power Applications, 11(9), 1558-1565. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0208.
2. Zou, D. Rock Drilling. In: Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering (2017). Singapore: Springer, 49–103.
3. Song C, Chung J, Kim J. H., Oh J.Y. Design optimization of a drifter using the Taguchi method for efficient percussion drilling (2017). Journal of Mechanical Science and Technology, 31(4), 1797–1803. DOI: 10.1007/s12206-017-0327-6.
4. Hydraulic DTH Fluid / Mud Hammers with Recirculation Capabilities to Improve ROP and Hole Cleaning For Deep, Hard Rock Geothermal Drilling / Wittig V., Bracke R., Hyun-Ick Y. / Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19–25 April, 2015.
5. АсГАРД, Пневмоударник М48, Технические характеристики. Retrieved from: <https://www.as-gard.ru/production/9/view/357>, (12.03.2018).
6. Гаун В.А. Некоторые направления повышения эффективности погружных пневмоударников. / Сборник научных трудов «Пневматические буровые машины». – Новосибирск, 1984.
7. Lipin, A. A. Promising pneumatic punchers for borehole drilling // Journal of Mining Science. – 2005. – Vol. 41, No. 2. – Pp. 157–161. Doi.org/10.1007/s10913-005-0078-0.
8. Timonin, V.V., Application of Downhole Hammers in Underground Mine Development // *Gornoie oborudovanie i electromehanika [Mining equipment and electromechanics]*. – 2015. – № 2, C. 13–17. [in Russian].
9. Gurkov, K.S., Klimashko, V.V., Kostylev, A.D. et al. (1990). *Pnevmaproboiniki [Pneumatic Piercing Tools]*. Novosibirsk, Russia: Institute of Mining [in Russian].
10. Smolianitsky, B.N., Chervov, V.V., Trubitsyn, V.V. et al. (1997). New pneumatic impact machines ‘Typhoon’ for special construction works. *Mehanizatsiia stroitel'stva [Mechanization of construction]*, 7, 5–8 [in Russian].

11. Esin, N.N., Kostylev, A.D., Gurkov, K.S. et al. (1986). *Pnevmaticheskiye mashiny udarnogo deistviia dlia prohodki skvazhin i shpurov [Pneumatic impact machines for boring holes]*. Novosibirsk, Russia: Nauka [in Russian].
12. Hwang, U.K., Lim, J. H. Optimization of down-the-hole hammer using experimental design method (2016). Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 40 (6), 603–611. DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.6.603>.
13. Hwang, U.K., Modelling and Test of Down-the-Hole Hammer (2015). Journal of Drive and Control, 12(2), 34–38. <http://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2015.12.2.034>.
14. Gaun, V.A. (1983). *Patent USSR No. 998740*. Novosibirsk: IP USSR.
15. Lipin, A.A., Belousov, A.V., Zabolotskaya, N.N. (2005). *Patent RF No. 2252996*. Novosibirsk: IP Russian Federation.
16. Lipin, A. A., Timonin, V.V., Kharlamov, Yu. P. Circulation system of a pneumatic drill with central drilling mud removal (2013). Journal of Mining Science, 49(2), 248–253. Doi.org/10.1134/S1062739149020068.
17. Eremenko V. A., Karpov V. N., Timonin V. V., Shakhtorin I. O., and Barnov N. G. Basic trends in development of drilling equipment for ore mining with block caving method (2015). Journal of Mining Science, 51(6), 1113 – 1125. Doi.org/10.1134/S106273911506037X.
18. Grundomat pneumatic piercing tool. // <http://www.tttechnologies.com/download/literature/grundomat-lit.pdf> (12.03.2018).
19. Piercing tools. Operator's manual. – HammerHead trenchless equipment. – <https://www.hammerheadtrenchless.com/sites/default/files/960-2000.pdf> (12.03.2018).
20. Footage Tools Inc. (n.d.). BigShot underground piercing tools [Technical brochure]. Retrieved from: <http://www.footagetools.com/wp-content/uploads/2017/07/BigShotBrochure-1.pdf>.
21. Footage Tools Inc. (n.d.). BigShot underground piercing tools. Owner's Manual [Technical brochure]. – Retrieved from: <http://www.footagetools.com/wp-content/uploads/2017/07/BigShot-Owners-Manual-1.pdf>.
22. Smolyanitsky B.N., Chervov V.V. Enhancement of Energy Carrier Performance in Air Hammers in Underground Construction (2014). Journal of Mining Science, 50(5), 918–928. Doi.org/10.1134/S1062739114050111.
23. Chervov V.V., Chervov A.V. Determination of operability conditions for ring-shaped elastic valve in air hammer with variable structure of impact capacity (2015). Journal of Mining Science, 51(6), 1132–1138. Doi.org/10.1134/S1062739115060393.
24. Tishchenko I. V., Chervov V.V., Smolyanitsky B. N. Evaluation of Layout of Air Drill Hammer with Smooth Adjustment of Impact Impulse Frequency (2017). Journal of Mining Science, 53(1), 109–116. Doi.org/10.1134/S106273911701192X.
25. Petreev A. M., Primychkin A. Yu. Ring-type elastic valve operation in air hammer drive (2016). Journal of Mining Science, 52(1), 135–145. Doi.org/10.1134/S1062739116010224.
26. Chervov V.V., Smolyanitsky B.N., Experimental estimate of power variation range of pneumatic hammer with mechanical locking of elastic valve (2016). Journal of Mining Science, 52(5), 913–918. Doi.org/10.1134/S1062739116041394.
27. Chervov V.V. Control of air feed to back-stroke chamber of the pneumatic impact device (2003). Journal of Mining Science, 39(1), 64–71. Doi.org/10.1023/A:1025713311355.
28. Tambovtsev, P.N. et al. (2017). *RFPatentApplicationNo. 2017119060/03(032965)*.
29. Simulationx [computer software]. Dresden, Germany: ESI ITI GmbH. Available from <https://www.simulationx.com/simulation-software.html>.

© П. Н. Тамбовцев, 2018

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНИКА С ПАРОЙ «КЛАПАН – УДАРНИК»

Владимир Владимирович Тимонин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, тел. (383)205-30-30, доп. 199, e-mail: timonin@misd.ru

Сергей Евгеньевич Алексеев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, старший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 205, e-mail: Alex@misd.ru

Даньяр Иванович Кокоулин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 208, e-mail: konstruktor430@yandex.ru

Бакыт Кубанычбек

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 208, e-mail: bjkut@yandex.ru

Евгений Михайлович Черниенков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, инженер, тел. (383)205-30-30, доп. 203, e-mail: e.chernienkov@misd.ru

В настоящее время, остро назрел вопрос перехода отечественных погружных пневмударников на высокое давление энергоносителя в целях импортозамещения, увеличения скорости проходки и снижения себестоимости 1 п.м. скважины. Однако при проектировании воздухораспределительных схем на высокое давление требуется учитывать некоторые конструктивные особенности: закрытый тип пневмударника, выхлоп отработанного воздуха на забой. С учетом данных особенностей была спроектирована схема со сдвоенными камерами рабочего хода и кольцевой камерой холостого хода, которая ориентирована на высокое давление при этом бокса-адаптер позволяет применять различные буровые долота. К недостаткам данной конструкции можно отнести перетечки из камеры холостого хода в камеры рабочего хода, которые негативно и при этом существенно влияют на энергетические показатели. Для минимизации влияния перетечек, для воздухораспределительных схем с передней полостью атмосферного давления предложено использование пары «клапан – ударник». Эластичный упругий клапан устанавливается на подвижном элементе – ударнике. Его применение позволяет добиться увеличения хода ударника и как следствие повышение энергии единичного удара и мощности, не усложняя конструкции, а принцип работы клапана делает схему актуальной и для высокого давления энергоносителя.

Ключевые слова: погружной пневмударник, принципиальная схема, перетечки воздуха, пара «клапан – ударник», ход ударника, давление воздуха.

RESEARCH ON AIR DISTRIBUTION SYSTEM OF A DOWNHOLE HAMMER PAIRED WITH «VALVE – HAMMER»

Vladimir V. Timonin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Deputy Director for Science, phone: (383)205-30-30, extension 199, e-mail: timonin@misd.ru

Sergey E. Alekseev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Senior Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 205, e-mail: Alex@misd.ru

Daniar I. Kokoulin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 208, e-mail: konstruktor430@yandex.ru

Bakyt Kubanychbek

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 208, e-mail: bjkut@yandex.ru

Evgeny M. Chernienkov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Engineer, phone: (383)205-30-30, extension 203, e-mail: e.chernienkov@misd.ru

Currently the issue of the Russian downhole hammers' switch to the high pressure of the energy carrier for the purposes of import substitution, increasing the development rate and reducing the prime cost of a borehole 1 line meter. However, when designing air distribution systems for high pressure, it is necessary to take into account certain design features: the closing type of the hammer and the exhaust of the return air to the bottom. With regard to these features, a scheme with double working stroke chambers and an annular idle run chamber, oriented to high pressure. At the same time the box-adaptor provides the opportunity to use various drill bits. The drawbacks of this design can include leakages from the idle chamber to the working chamber, which negatively and at the same time significantly affect the energy performance. In order to minimize the effect of the leakages the use of a «valve – hammer» pair is suggested for air distribution scheme with a front atmospheric pressure cavity. The elastic valve is installed on the moving element – the hammer. Its use makes it possible to increase the hammer stroke and, as a consequence, increase the energy of a single impact and power without complicating the design. The operating mode of the valve makes the circuit relevant for high pressure energy carriers.

Key words: downhole hammer, functional diagram, air leakage, «valve – hammer» pair, hammer stroke, air pressure.

Введение

В настоящее время для бурения скважин при добыче полезных ископаемых получили широкое распространение погружные пневмоударники [1]. Они используются при бурении в породах средней и высокой крепости на подземных и открытых горных работах. Погружной пневмоударник располагается непосредственно у забоя буримой скважины, что обеспечивает наилучшую передачу

энергии удара на забой. Это позволяет увеличить скорость и глубину бурения, а сжатый воздух используется как энергоноситель и очистной агент.

Первые опытные конструкции были разработаны в конце первой половины прошлого века в СССР, а в 1960-х уже получили широкое распространение [2]. Однако современные тенденции развития пневмоударного бурения требуют перехода на «высокое» давление энергоносителя до 2,0...3,2 МПа [3–9]. Что позволит за счет увеличения скорости и глубины бурения, а также снижения энергоемкости разрушения, снизить стоимость одного погонного метра скважины, тем самым повысив технико-экономическую привлекательность использования погружных пневмоударников. На данный момент таких серийно выпускаемых отечественных машин нет [10].

Конструктивные особенности современных пневмоударников [11]: закрытый тип пневмоударника; выхлоп отработанного воздуха на забой скважины; беззолотниковая система воздухораспределения, позволяющая использовать энергию расширения сжатого воздуха.

Эксперименты

В ИГД СО РАН разработана принципиальная схема погружного пневмоударника, соответствующая указанным требованиям (рис. 1) [12–14].

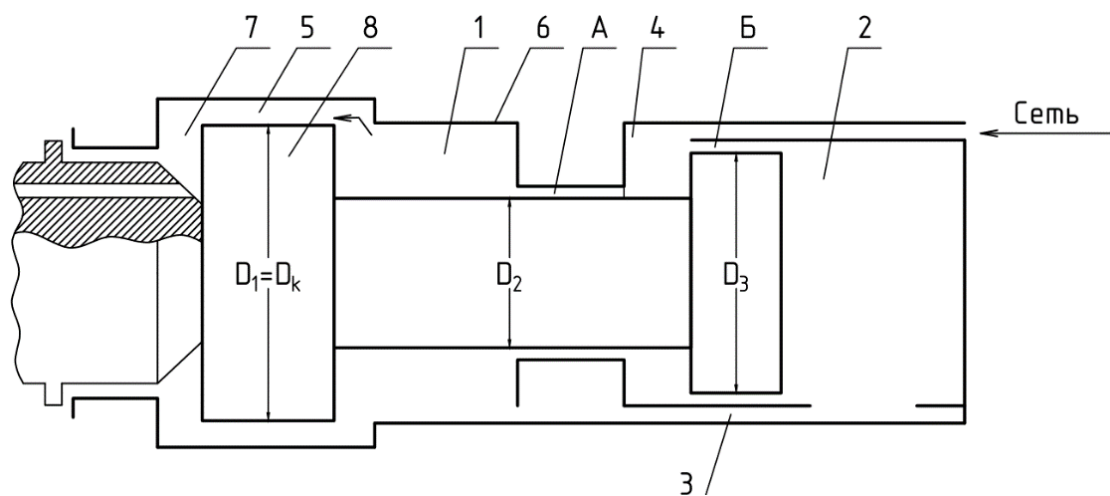


Рис. 1. Принципиальная схема погружного пневмоударника

Камера рабочего хода состоит из управляемой кольцевой камеры 1 и управляемой торцевой камеры 2, соединенной каналом 3. Управление камерами осуществляется подачей воздуха в торцевую камеру и выхлопом через кольцевую. Между ними расположена камера холостого хода 4, постоянно сообщенная с сетью сжатого воздуха. Выхлоп отработанного воздуха из рабочих камер осуществляется по каналу 5 в стенке корпуса 6 в камеру атмосферного давления 7. Ударник 8 имеет три ступени с посадочными поверхностями диа-

метрами D_1, D_2, D_3 . Диаметр большей ступени D_1 равен диаметру полости корпуса D_k . Сжатый воздух из камеры холостого хода сетевого давления имеет возможность перетекать в камеры рабочего хода через зазоры в подвижных посадках А и Б. При движении ударника сжатый воздух периодически поступает в камеры рабочего хода за счет чего он совершает возвратно-поступательное движение и в конце каждого рабочего цикла наносит удар по торцу бурового инструмента.

Энергетические параметры данной схемы зависят от площадей ударника, на которые действует давление воздуха со стороны рабочих камер холостого и рабочего ходов.

$$S_p = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2 + D_3^2); \quad (1)$$

$$S_x = \frac{\pi}{4}(D_3^2 - D_2^2), \quad (2)$$

где S_p – площадь рабочего хода, состоящая из рабочих площадей со стороны кольцевой и торцевой камер; S_x – площадь холостого хода, образованная со стороны камеры сетевого давления.

Другой важной характеристикой системы воздухораспределения является отношение площадей камеры со стороны холостого хода и камер со стороны рабочего хода. Для определения величины хода ударника необходимо формирование соответствующего импульса холостого хода, зависящего от рабочей площади ударника со стороны камеры холостого хода.

Теоретически для данной схемы изменение находится в пределах [15]:

$$0 < \frac{S_x}{S_p} < 0,5. \quad (3)$$

Однако в реальных конструкциях из конструктивных и прочностных соображений данное соотношение находится в диапазоне $S_x/S_p = 0,2 \dots 0,3$.

К недостаткам данной воздухораспределительной системы можно отнести перетечки воздуха через зазоры в посадочных местах ударника, а так как он является подвижной деталью избежать их полностью не представляется возможным.

Однако, перетечки, в зависимости от воздухораспределительной схемы имеют различную степень влияния на энергетические параметры. Так для дроссельных и струйных систем влияние перетечек невелико, и в основном приводит к увеличению расхода воздуха. В ряде схем, перетечки могут происходить из управляемых камер холостого и рабочего ходов друг в друга. Здесь их влияние более существенно. Они понижают энергетические параметры машины.

Наиболее опасны перетечки воздуха из воздушной сети в рабочие камеры. Имеет значение количество мест перетечек.

В рассматриваемой схеме перетечки имеются в зазорах А и Б (рис. 1). При движении ударника во время холостого хода в камеру рабочего хода поступает воздух и препятствует его движению, уменьшая ход. Так как площадь холостого хода относительно невелика, то перетечки оказывают существенное влияние и необходимо определить их допустимую величину. Для более точного определения влияния перетечек на энергетические параметры были запланированы натурные эксперименты.

По данной воздухораспределительной схеме был спроектирован и изготовлен погружной пневмударник ПВ170 для проходки скважин диаметром 170 мм для использования энергоносителя в диапазоне давлений 0,6...2,0 МПа. Ударник имеет массу 17,1 кг, и соотношение площадей $S_x/S_p = 0,23$.

Исследование осуществлялось на вертикальном лабораторном стенде ГД-251 путем записи осциллограмм давлений в камерах пневмударника.

Запись осуществлялась при различных вариантах настройки машины по методике [19, 20], с суммарной площадью S_{AB} зазоров А и Б 0,587, 0,747, 1,207 и 1,527 см². Давление в сети сжатого воздуха составляло 0,6 МПа (рис. 2).

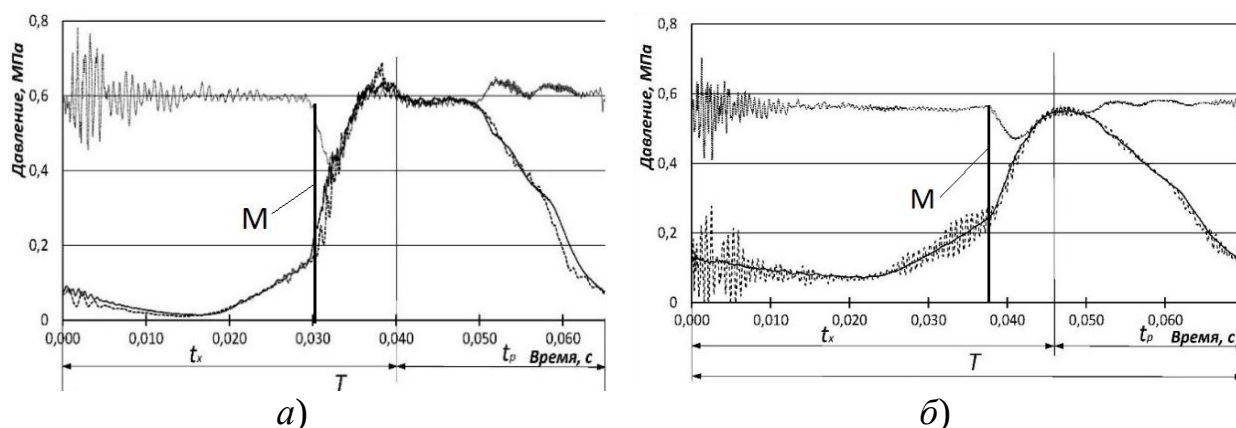


Рис. 2. Диаграммы давлений в рабочих камерах и камере холостого хода:

а) при $S_{AB} = 0,587$ см²; б) при $S_{AB} = 1,527$ см²; М – момент впуска сжатого воздуха в рабочие камеры; Т – время рабочего цикла; t_x – время холостого хода; t_p – время рабочего хода

На диаграммах видно, что к моменту впуска сжатого воздуха в рабочие камеры, поступающий через зазоры воздух, создающий сопротивление движения ударника на холостом ходу, составляет 0,2 МПа и более, что существенно ограничивает ход ударника. Чем больше площадь сечения зазора, тем больше давление сопротивления.

С целью снижения влияния перетечек воздуха в ИГД СО РАН был разработан разрядный клапан, устанавливающийся на подвижном элементе воздухо-

распределительной системы – ударнике. Разрядный клапан представляет собой эластичное кольцо, установленное в специальном посадочном месте. Технические решения с применением клапанов применялись и ранее в пневматических ударных механизмах, например, металлические клапаны [18] и эластичные клапаны [19–24].

Для установки клапана был спроектирован и изготовлен погружной пневмоударник ПП110 (рис. 3). Испытания проводились в диапазоне давлений 0,4...0,7 МПа на выше указанном стенде. Масса ударника 4 кг, соотношение площадей $S_x/S_p = 0,29$.

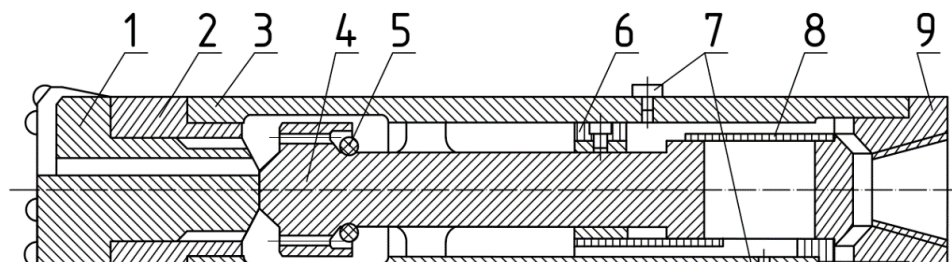


Рис. 3. Погружной пневмоударник ПП110 с парой «клапан – ударник»:

1 – долото; 2 – букса; 3 – корпус; 4 – ударник; 5 – эластичный клапан; 6 – разрезное кольцо; 7 – пьезоэлектрические датчики давления; 8 – гильза; 9 – переходник

Эластичный клапан установлен с натягом в проточке большей ступени ударника, а ее полость соединена каналами с камерой между ударником и долотом, сообщенным с атмосферой. В начале рабочего цикла камера рабочего хода через кольцевой зазор между эластичным клапаном и верхней поверхностью проточки сообщается с атмосферой и производится выпуск из этой камеры, дополнительно к выхлопу через проточку в стенке корпуса. Этот выпуск сохраняется до момента впуска сжатого воздуха в рабочую камеру, когда давление с ее стороны растягивает эластичный клапан и он перекрывает зазор между ним и верхней поверхностью проточки. В оставшееся время цикла он сохраняет это положение. Выпуск воздуха из камеры рабочего хода в период холостого хода позволяет уменьшить сопротивление движению ударника и увеличить его ход, что на рабочем ходу позволяет увеличить энергию удара.

Во время исследования изменялись геометрические параметры пары «клапан – ударник». Производилась съемка диаграмм давлений в камерах холостого и рабочего ходов посредством пьезоэлектрических датчиков. Начальные и конечные измерения отображены на диаграммах (рис. 4).

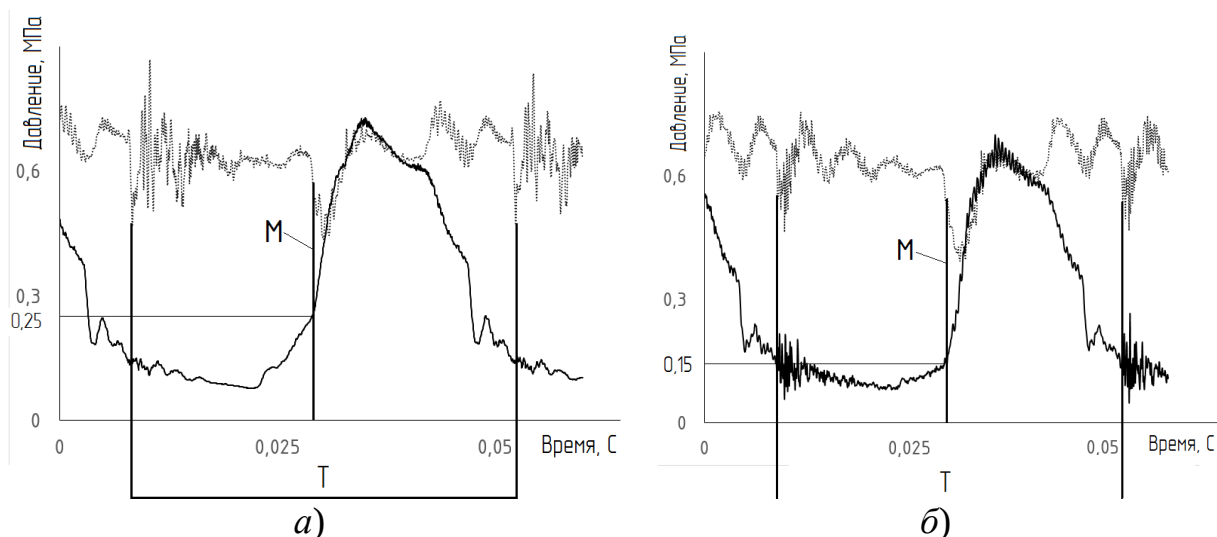


Рис. 4. Диаграммы давления в рабочих камерах и камере холостого хода:

а) без клапана; б) с клапаном; ---- — давление в камере холостого хода, МПа; М — момент впуска сжатого воздуха в рабочие камеры; — — давление в кольцевой камере холостого хода, МПа; Т — время цикла, с; t — время от окончания выхлопа до момента впуска в рабочую камеру, с

Обсуждение

На диаграммах видно, что при работе пневмоударника с клапаном, давление, создающее усилие сопротивления движению ударника на холостом ходу, заметно меньше, чем при работе без клапана. Это позволяет увеличить ход ударника и повысить энергию удара.

По результатам эксперимента составлена таблица энергетических параметров ПП110.

Энергетические параметры погружного пневмоударника
с установленным клапаном и без него

С парой «клапан — ударник»/без	Энергия удара A , Дж	Частота ударов n , мин ⁻¹	Коэффициент отскока, k_0	Скорость удара q , м/с	Ход ударника L , мм	Мощность, Вт
—	99,13	22,67	0,31	7,04	82,41	2247,79
+	120,14	20,94	0,21	7,75	92,34	2516,09

Заключение

Применение пары «клапан — ударник» для воздухораспределительной схемы со сдвоенными камерами рабочего хода и промежуточной камеры холостого хода, позволяет уменьшить влияние перетечек, увеличить величину рабочего хода в сравнении с такой же конструкцией без клапана, а также мощность на 10 % и энергию удара в целом на 20 %. При этом не происходит существенного

усложнения конструкции, а принцип работы клапана позволяет ему работать и на высоком давлении энергоносителя.

Благодарности

От коллектива авторов выражаем благодарность сотрудникам лаборатории бурения и технологических импульсных машин Г. Д. Чупину и О. Н. Афанасьеву за активное участие и помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090003-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимонин В. В., Алексеев С. Е., Кокоулин Д. И. Создание системы воздухораспределения погружного пневмоударника для расширенного диапазона рабочего давления // Интер-экспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 283–288.
2. Воздвиженский Б. И., Сидоренко А. К., Скорняков А. Л. Современные способы бурения. – М. : Недра, 1978. – 128 с.
3. Гаун В. А., Липин А. А., Беляев Н. А. Повышение эффективности пневмоударных буровых машин. – Новосибирск : ИГД СО РАН, 1987. – С. 3–9.
4. A – Z of DTH drilling // Halco Rock Tools. – 05.2016 – pp.76.
5. 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.
6. Погружные пневмоударники Secoroc QLX5 инструкция по эксплуатации / Перевод на русский язык. Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, Sweden. – 2015. – 34 с.
7. Technical specification DHD hammers / Atlas Copco Secoroc AB. Update, February, – 2005. 4 p.
8. Atlas Sopco Rock Drilling Tools. Secoroc Down-the-hole equipment: Operators instruction and spare parts list down-the-hole hammers/Atlas Copco Secoroc AB, Fagestra, Sweden, 2002. – 23 p.
9. Тимонин В. В., Алексеев С. Е., Карпов В. Н., Черниенков Е. М. Влияние энергетических параметров погружного пневмоударника на технико-экономические показатели бурения скважин с одновременной обсадкой // ФТПРПИ. – 2018. – № 1. – С. 61–70.
10. Еременко В. А., Карпов В. Н., Филатов А. Р., Котляров А. Р., Шахторин И. О. Совершенствование разработки с отбойкой руды на зажатую среду при освоении удароопасных месторождений // Горное дело. – 2014. – № 1. – С. 50–55.
11. Репин А. А., Алексеев С. Е. Создание пневмоударников для работы на повышенном давлении энергоносителя // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Т. III. Машиноведение. – Новосибирск : ИГД СО РАН, 2010. – С. 324.
12. Алексеев С. Е. Пат. 2090730 Российская Федерация, МПК⁷ E21B 4/14, E21C 3/24. Погружной пневматический ударный механизм; правообладатели ИГД СО РАН. – № 95107596/03; заяв. 11.05.95; опубл. 20.09.97 в Бюл. № 26.
13. Репин А. А., Алексеев С. Е., Пятнин Г. А. Пат. 2343266 Российская Федерация, МПК⁷ E21B 4/14. Погружной пневмоударник; правообладатель ИГД СО РАН. – № 2007124972/03; заявл. 02.07.2007; опубл. 10.01.2009 в Бюл. № 1.

14. Репин А. А., Алексеев С. Е., Карпов В. Н. Полезн. модель 121854 РФ. Погружной пневмоударник; правообладатель ИГД СО РАН. – № 2012118740/03; заяв. 04.05.2012; опубл. 10.11.2012 в Бюл. № 31.
15. Тимонин В. В., Алексеев С. Е., Кокоулин Д. И., Кубанычбек Б. Исследование процесса воздухораспределения для бурения дегазационных скважин // ФПВГН. – 2017. – Т. 1, № 3. – С. 154–159.
16. Репин А. А., Алексеев С. Е., Попелюх А. И. Методы повышения надежности деталей ударных машин // ФТПРПИ. – 2012. – № 4. – С. 94–101.
17. Murakami Yukitaka. MetalFatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions/ Yukitaka Murakami. – Elsevier. – 2002.
18. Есин Н. Н. Методика исследования и доводки пневматических молотков. Новосибирск. Редакционно-издательский отдел Сибирского отделения АН СССР. 1965. – С. 215.
19. Петреев А. М., Воронцов Д. С., Примычкин А. Ю. Кольцевой упругий клапан в пневмоударных машинах // ФТПРПИ. – 2010. – № 4. – С. 56–55.
20. Петреев А. М., Примычкин А. Ю. Особенность работы кольцевого упругого клапана круглого сечения в системе воздухораспределения пневмоударных машин // ФТПРПИ. – 2013. – № 3. – С. 64–69.
21. Червов В. В., Смоляницкий Б. Н. Экспериментальная оценка диапазона изменения энергетических параметров пневмомолота с механическим замыканием упругого клапана // ФТПРПИ. – 2016. – № 5. – С. 92–99.
22. Гаун В. А. Авторское свидетельство № 848615 СССР. Пневматический ударный механизм; правообладатель ИГД СО РАН. – Опубл. в БИ, 1981, № 27.
23. Primychkin A. Yu., Kondratenko A. S., Timonin V. V. Determination of variables for air distribution system with elastic valve for down-the-hole pneumatic hammer. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Сер: "All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85th Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya" 2017. С. 012025.
24. Petreev A. M., Primychkin A. Y. Influence of air distribution system on energy efficiency of pneumatic percussion unit of circular impact machine. Journal of Mining Science. 2015. Vol 51. № 3. – С. 562–567.

REFERENCES

1. Timonin V.V., Alekseev S.E., & Kokoulin D.I. (2017). Sozдание sistemy vozduhoraspredeleniya pogruzhnogo pnevmoudarnika dlya rasshirennogo diapazona rabocheho davleniya [The air-distribution system in downhole air hammer with expanded operating] *Interehkspo GEO-Sibir'-Interexpo GEO-Siberia*, Vol. 2, 283–288.
2. Vozdvizhenskij B.I., Sidorenko A.K., & Skorniyakov A.L. (1978). *Sovremennye sposoby bureniya skvazhin* [Modern ways of well-drilling]. Moscow: Nedra, 378 [in Russian].
3. Gaun V.A., Lipin A.A., & Belyaev N.A. et al. (1987). *Povyshenie ehffektivnosti pnevoudarnykh burovymashin* [Increase in efficiency of pneumatic shock boring machines]. Novosibirsk: N.A. Chukanov Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 3–9 [in Russian].
4. A – Z of DTH drilling. (2016). Halco Rock Tools, 76.
5. B. Fox et al. (2011). *Drilling of explosive wells on open excavations*. (Ulf Linde, Trans). Texas: Garland, 274.
6. *Pneumatic impact Secoroc QLX5 maintenance instruction*. (2015). Sweden: Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, 2, 34.
7. *Technical specification DHD hammers*. (2005). Sweden: Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, 4, 4.

8. *Atlas Sopco Rock Drilling Tools. Secoroc Down-the-hole equipment: Operators instruction and spare parts list down-the-hole hammers.* (2002). Sweden: Atlas Copco Secoroc AB, Fagestra, 23.
9. Timonin V. V., Alekseev S. E., Karpov V. N., & Chernienkov E. M. (2018). Vliyanie EHnergeticheskikh parametrov pogruzhnogo pnevmoudarnika na tekhniko-ehkonomicheskie pokazateli bureniya skvazhin s odnovremennoy obsadkoj [Influence of Power parameters of the submersible pneumatic impact tool on technical and economic indicators of well-drilling with acasing]. *Fiziko-tekhnicheskie problem razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 1, 61-70.
10. Eremenko V.A., Karpov V.N., Filatov A.P., & Kotlyarov A.A. (2014). Sovershenstvovanie razrabotki s otbojkoy rudyt na zazhatuyu sredu pri osvoenii udaroopasnykh mestorozhdenij [Improvement of development from breaking the rock ore on the clamped environment at development of fields which the mountain blows affects]. *Gornyzhurnal – Mining Journal*, 1, 50–55 [in Russian].
11. Repin A. A., & Alekseev S. E. (2010). Sozdanie pnevmoudarnikov dlya raboty na povyshennom davlenii ehnergonositelya [Creation of pneumatic impact tools for work on the elevated pressure of the energy carrier]. *Fundamental'nye problem formirovaniya tekhnogennoj geosredy. Mashinovedenie- Fundamental problems of formation of a technogenicgeosreda. Engineering science. Novosibirsk, N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Vol. 3*, 324 [in Russian].
12. Alekseev S.E. (1997). Patent RF No2090730. Novosibirsk: IP Russian Federation.
13. Repin A.A., Alekseev S.E., & Pyatnin G.A. (2009). Patent RF No 2343266. Novosibirsk: IP Russian Federation.
14. Repin A.A., Alekseev S.E., & Karpov V. N. (2012). Poleznaya model' RF, no. 121854. Novosibirsk: IP Russian Federation.
15. Timonin V.V., Alekseev S.E., Kokoulin D.I., Kubanychbek B. (2017). Issledovanie processa vozduhoraspredeleniya dlya bureniya degazacionnykh skvazhin [Investigation of the air distribution process for drilling degassing wells]. *Fiziko-tekhnicheskie problem razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 1, 3, 154–159.
16. Repin A.A., Alekseev S.E., & Popelyuh A.I. (2012). Metody povysheniya nadezhnosti detalej udarnykh mashin [Enhancing reliability of parts of percussion machines]. *Fiziko-tekhnicheskie problem razrabotki poleznykh iskopaemykh- Journal of Mining Science*, 4, 94–101.
17. Murakami Yukitaka. (2002). Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions. Yukitaka Murakami. Elsevier.
18. Esin N.N. (1965). *Metodika issledovaniya i dovodki pnevmaticheskikh molotkov [Technique of a research and operational development of pneumatic hammers]*. Novosibirsk:Publishing department of the Siberian office AS USSR. 165.
19. Petreev A.M., Voroncov D.S., & Primychkin A.YU. (2010). Kol'cevoj uprugij klapan v pnevmoudarnykh mashinah [Ring-shape elastic valve in the air percussion machines] *Fiziko-tekhnicheskie problem razrabotki poleznykh iskopaemykh -Journal of Mining Science*, 4, 55–65.
20. Petreev A.M., & Primychkin A.YU. (2015). Osobennost' raboty kol'cevogo uprugogo klapana kruglogo secheniya v sisteme vozduhoraspredeleniya pnevmoudarnykh mashin [Specify of operation of round elastic valve in air distribution system of pneumatic percussion machines]. *Interehkspo GEO-Sibir'-Interexpo GEO-Siberia, Vol. 3*, 201–205.
21. Chervov V.V., & Smolyanickij B.N. (2016). Ehksperimental'naya ocenka diapazona izmeneniya ehnergeticheskikh parametrov pnevmomolota s mekhanicheskim zamykaniem uprugogo klapana [Experimental Estimate of Power Variation Range of Pneumatic Hammer with Mechanical Locking of Elastic Valve] *Fiziko-tekhnicheskie problem razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 5, 92–98.
22. Gaun V.A. (1981).Pnevmaticheskij udarnyj mekhanizm [Pneumatic shock mechanism]. Avtorskoe svidetelstvo USSR, no. 848615.

23. Primychkin A.Yu., Kondratenko A.S., & Timonin V.V. (2017). Determination of variables for air distribution system with elastic valve for down-the-hole pneumatic hammer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* Cep: "All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85th Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya", 012025.

24. Petreev A.M., & Primychkin A.Y. (2015). Influence of air distribution system on energy efficiency of pneumatic percussion unit of circular impact machine. *Journal of Mining Science*, Vol. 51, 3, 562–567.

© В. В. Тимонин, С. Е. Алексеев, Д. И. Кокоулин, Б. Кубанычбек, Е. М. Черниенков, 2018

К ВОПРОСУ ПОДДЕРЖАНИЯ ВЫРАБОТКИ РАМНОЙ КРЕПЬЮ В УСЛОВИЯХ ЗОНЫ «НАДВИГОВАЯ» МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАДРАН

Владимир Александрович Усков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории подземной разработки рудных месторождений тел. (383)205-30-30, доп. 198, e-mail: wau347743@list.ru

Юрий Николаевич Шапошник

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-технических геотехнологий, тел. (983)302-87-06

Приведены сведения о геологическом строении и горнотехнических условиях отработки рудных жил на месторождении Бадран ЗАО «ГРК «Западная». Выполнена оценка устойчивости горных подготовительных выработок в процессе их проходки и эксплуатации в зоне «Надвиговая» золоторудного месторождения Бадран на основе предлагаемых инженерных методов расчета параметров крепи подготовительных выработок в зоне влияния очистных работ. Для расчета параметров крепи сделана предварительная оценка устойчивости выработок. В работе приведен новый инженерный метод расчета параметров рамной арочной крепи.

Ключевые слова: рудный массив, степень нарушенности, устойчивость, безопасность, расчет параметров рамной арочной крепи.

ON GALLERIES SUPPORT BY FRAME TIMBER AT BADRAN DEPOSIT “NADVIGOVAYA” AREA

Vladimir A. Uskov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Leading Researcher, Underground Ore Mining Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 198, e-mail: wau347743@list.ru.

Yury N. Shaposhnik

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Professor, Leading Researcher, Physical-Technical Geotechnology Laboratory, phone: (983)302-87-06

The work provides information on geological structure and conditions of mineral veins' mining at the Badran deposit ZAO “GRK «Zapadnaya». The stability of mine development galleries is assessed in the process of their excavation and exploitation in “Nadvogovaya” area of the gold ore field Badran. The assessment is based on suggested engineering methods of calculations of development galleries' timber parameters in the cleaning influence zone. In order to obtain the timber parameters the development galleries' stability check is carried out. The paper presents a new method of parameters calculations of a framed arch support.

Key words: rock mass, damage, stability, safety, parameters calculation of a framed arch support.

Введение

Золоторудное месторождение Бадран расположено на территории Оймяконского улуса Республики Саха (Якутия) в 134 км к ЮЗ по автодорожке Колыма от административного центра – поселка городского типа Усть-Нера (рис. 1) [1], в бассейне одноименного ручья на правом берегу р. Большой Селерикан, которая, является правым притоком р. Эльги, впадающей в р. Индигирка.



Рис. 1. Географическое положение рудника Бадран

Для центральной части Яно-Оймяконского нагорья характерен низкогорный рельеф с абсолютными высотами водоразделов от 900 до 1300 м и относительными превышениями их над днищами долин в 150–300 м. Для района характерно сплошное развитие многолетней мерзлоты, мощность которой составляет 300–350 м. Глубина сезонного оттаивания колеблется от 0,2 до 2,0 м. В летнее время рыхлые отложения насыщены грунтовыми водами. В районе месторождения карстовые явления и оползни не проявлены.

Месторождение Бадран ЗАО «ГРК «Западная» относят к типу поднадвиговых золото-кварцевых малосульфидных орогенных месторождений Якутии [2]. Оно приурочено к Бадран-Эгеляхскому взбросодвижку кулисного строения (рис. 2), общая протяженность которого составляет более 20 км, а угол падения сместителя от 10 до 45° к СВ. Морфология зоны изменяется по падению и простиранию, образуя флексурные изгибы (рис. 2).

Пликативные структуры антиклинали надвинуты с северо-востока на породы, выполняющие синклиналь. Амплитуда перемещения по Бадран-Эгеляхскому взбросодвижку оценивается от 600 до 1300 м.

Площадь Бадранского рудного узла сложена терригенными верхнетриасовыми отложениями, накопившимися на склоне пассивной континентальной окраины, и рыхлыми континентальными четвертичными образованиями. Верхнетриасовые отложения представлены переслаивающимися пластами и пачками

песчаников, алевролитов и их переходных разностей. Более других распространены песчаники и алевроитистые песчаники.

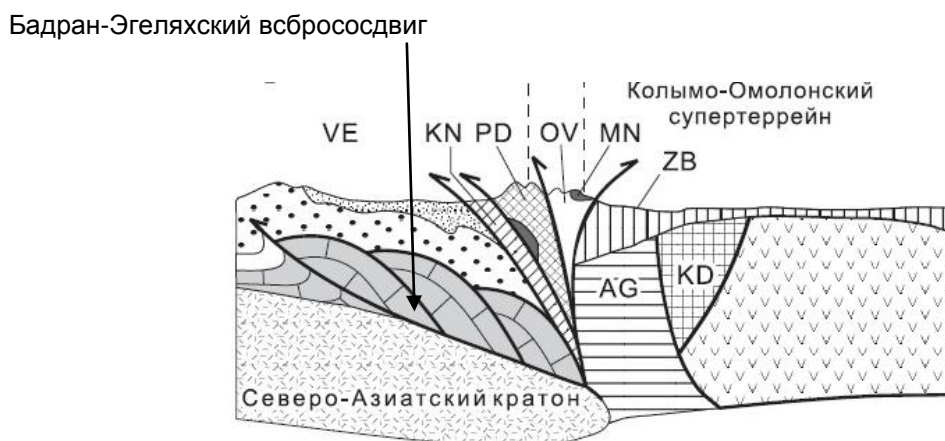


Рис. 2. Геологический разрез Верхояно-Колымской орогенной области, отражающий строение складчато-надвигового пояса [1]:

VE – Верхоянский складчато-надвиговой пояс; KN – Кулар-Нерский турбидитовый террейн; PD – Полоусно-Дебинский турбидитовый террейн; OV – Омудевский турбидитовый террейн; MN – Мунилканский офиолитовый террейн; ZB – Зырянский прогиб; AG – Арга-Тасский турбидитовый террейн; KD – Кенкельдинский террейн аккреционного клина

Все известные рудные тела золоторудного месторождения Бадран залегают в оруденелой части сместителя Бадран-Эгеляхского взбросо-надвига, которая именуется зоной «Надвиговой». Минерализованная кварцем и сульфидами зона в виде единого тела мощностью 0,4–18,0 м непрерывно прослежена по простиранию на 5,6 км, а по падению примерно на 1,2 км. Тектониты вмещают разобщенные кварцевые жилы сложного (в плане) строения.

В пределах зоны «Надвиговая» выделяются группы сближенных рудных тел, формирующих 3 рудных столба I, II и III с промышленным золотым орудением.

Эксперименты

Задачей исследований являлось изучение нарушенности массива в уклоне № 1684 по зоне «Надвиговая» рудного столба I (рис. 3) с определением качественной характеристики (RQD) [3], а также последующая оценка соответствия условий поддержания выработки существующим условиям устойчивости массива.

Характеристика выработки и крепи дана в табл. 1. Расход материалов на крепление уклоне № 1684 приведен в табл. 2.

За рубежом при выборе типа крепления выработок пользуют два критерия устойчивости массивова: классификация Бенявского (RMR) [3–6].

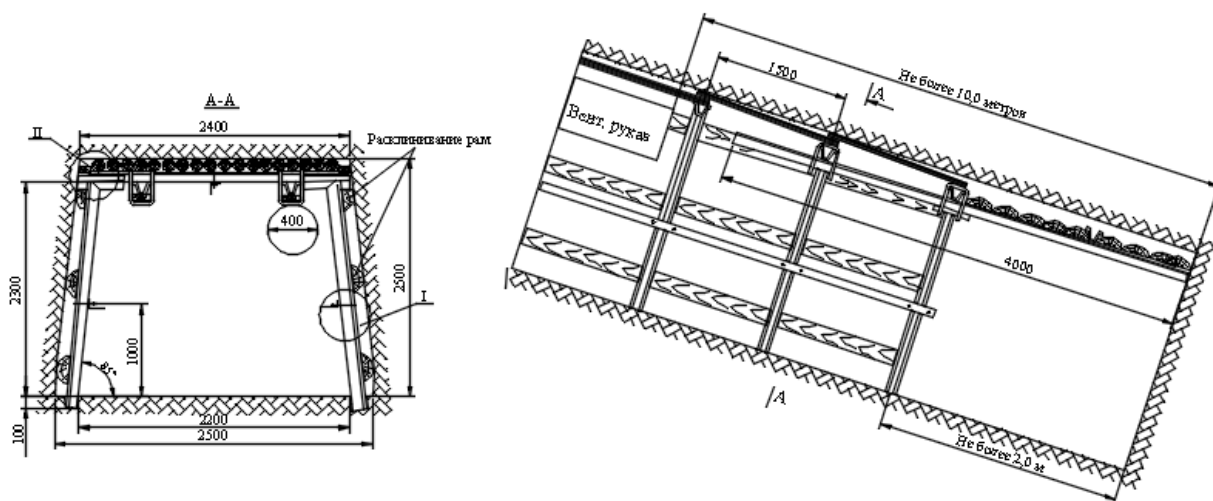


Рис. 3. Паспорт крепления уклона №1684 по зоне «Надвиговая»

Таблица 1

Характеристика уклона № 1684 и его крепи

Наименование	Параметр
Сечение выработки в свету, м ²	5,2
Сечение выработки в проходке, м ²	6,1
Расстояние между рамами крепи, м	1,5
Материал и конструкция крепи	СВП-17 трапецевидная

Таблица 2

Расход материалов на крепление уклона №1684

Элементы крепи	Размеры	Материал	Количество на шаг	
			м (м ³)	кг
Верхняк	2,4	СВП-17	2,4	40,8
Стойка	4,4	СВП-17	4,4	74,8
Затяжка	1,0	лес	0,05	-

Съемка трещиноватости массива в уклона № 1684 проводилась линейным методом массовых замеров (рис. 4). Инструментально (горным компасом и рулеткой) измерялись углы и азимуты падения трещин длина следа трещин на поверхности горных выработок, расстояние по нормали до ближайшей трещины данной системы.

Методика определения качественных характеристик горных пород Rock Quality Designation (RQD) [3–6] по наблюдениям в подземных выработках состоит в измерении рейкой по прямым линиям на поверхности массива пород расстояний между трещинами.

Значение RQD вычисляется как отношение суммарной длины участков длиной более 10 см на общую длину линии замера – 200 см. Схема измерений представлена на рис. 4.

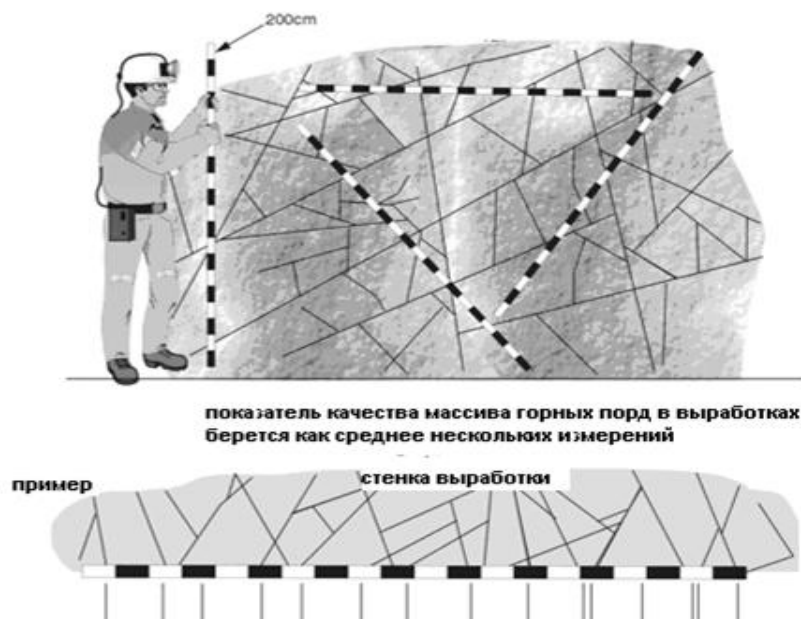


Рис. 4. Методика измерения расстояний между трещинами по борту уклона №1684

$$RQD = \frac{12+13+12+12+11+11+8}{200} \times 100 = 39,5 \, \%.$$

Трещины протяженностью менее чем 1 м не включались в расчет RQD, так как подобная трещина может быть создана в результате повреждения массива при взрывании и не оказывает влияния на устойчивость массива.

Породы представлены дроблеными, милонитизированными, рассланцованными песчаниками повышенной трещиноватости (от 7 до 10 трещин на 1 п. м), алевролитами и их переходными разностями, милонитами.. В материале собственно рудного тела основной объем занимают рассланцованные, развальцованные и милонитизированные породы с жильно-прожилковым окварцеванием.

Физико-механические характеристики руды и вмещающих пород приведены в табл. 3 [7].

Породы уклона №1684 в соответствии со значением $RQD = 39,5 \, \%$ следует отнести к неустойчивым (табл. 4) [7].

При проходке уклона № 1684 в зоне «Надвиговая» используют трапециевидную податливую металлическую рамную крепь (рис. 3) из специального профиля СВП-17 (табл 1, 2).

Расстояние между рамами определяется устойчивостью пород и принято 1,5 м. Для затяжки применяют горбыли, доски, кругляк или специальные желе-

зобетонные плиты. Расклинивание рам производится деревянными клиньями. Продольная устойчивость рамам придается при помощи уголков(пластин).

Таблица 3

Физико-механические свойства руды и вмещающих пород
месторождения Бадран

Порода, руда	Показатели			
	Средний предел прочности при растяжении, МПа	Средний предел прочности при сжатии, МПа	Крепость по Протодьяконову М. М.	Угол внутреннего трения, град.
Песчаник	6.69	153.18	15–16	12÷13
Алевропесчаник	4.73	122.68	12–13	10÷11
Милонит	2.95	55.8	5–6	6÷7
Милонит с кварцем	2.66	53.15	5–6	6
Кварц окисленный	4.61	92.28	9–10	8÷9
Алевропесчаник с прожилками кварца	1.29	31.97	3–4	4÷5

Таблица 4

Классификация устойчивости массива горных пород по рейтингу RQD

Категория и степень устойчивости пород	Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	Выход керна, %	Показатель состояния пород RQD, %	Модуль трещиноватости, тр/м	Модуль кусковатости, кс/м
I – весьма устойчивые	>80	>85	>92	≤ 1	<2
II – устойчивые	50–80	30–85	60–97	1–5	2–8
III – средней устойчивости	10–50	5–30	40–60	5–15	8–15
IV – неустойчивые	<10	<5	<40	>15	>15

Рама состоит из двух стоек и верхняка. Стойки с верхняком соединены с помощью съемных башмаков, уголков с болтами, накладок или сварным соединением элементов пластинами.

Обсуждение

Выполним оценку соответствия условий поддержания выработки существующим условиям устойчивости массива [8–10].

Нормативная нагрузка $P^H = 12,5 \text{ тс/м}^2$ (по рис. 5) определяется в зависимости от смещений U с учетом смещений до установки крепи U_t , сжатия забутовочного материала U_3 , и конструктивной податливости крепи $U_{кр}$.

По величине смещения определяемого по формуле:

$$U_{кр} + U_t + U_3 = U,$$

где U_t – смещения до установки крепи; U_3 – смещения за счет забутовочного материала.

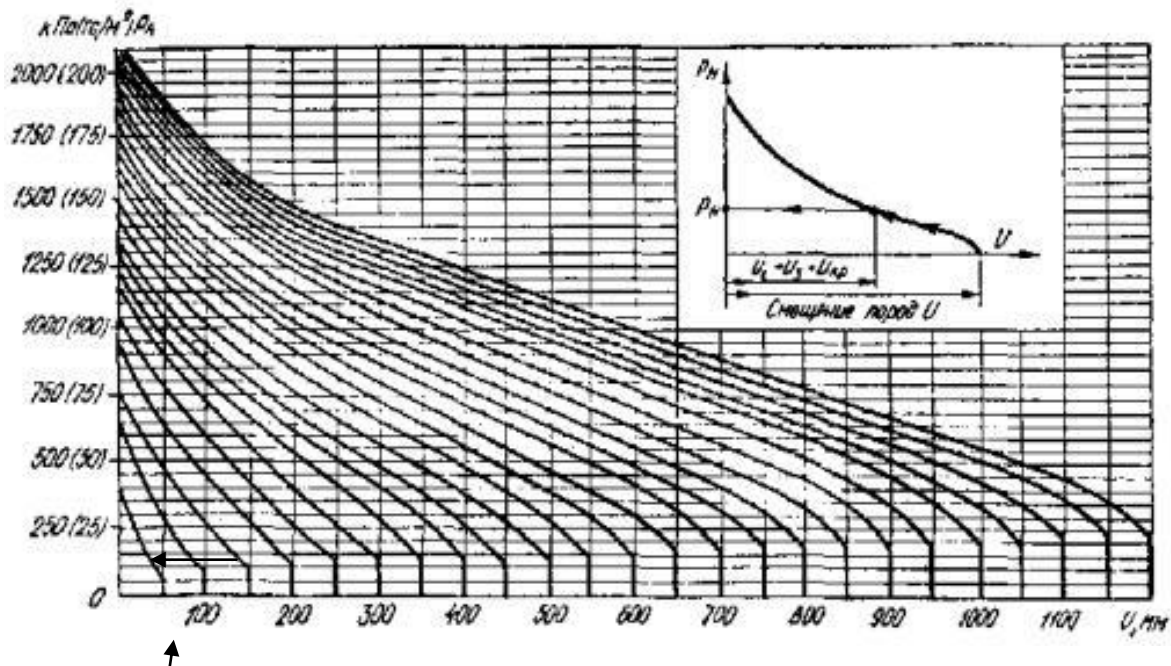


Рис. 5. Графики для определения нормативной нагрузки на крепь

Расчетная нагрузка определяется по формуле (1) [8].

$$P = k_{\Pi} k_H m_B P_H, \quad (1)$$

где P^H – нормативная нагрузки на крепь, ($P^H = 15,1 \text{ тс/м}^2$);

k_{Π} – коэффициент перегрузки, $k_{\Pi} = 1,1$;

k_H – коэффициент, принимаемый для вскрывающих выработок $k_H = 1,1$;

m_B – коэффициент условий проведения выработок, принимаемый $m_B = 1,0$ при буровзрывном способе проходки.

Определим суммарную нагрузку на крепь, т/м^2 :

$$P_1 = P_0 + K_H = 15,7 \text{ тс/м}^2, \quad (2)$$

где $K_H = 0,6 \text{ т/м}^2$ – нагрузка от забутовки и собственного веса конструкции.

Для этой нагрузки следует применить спецпрофиль СВП 19 с несущей способностью $N=16 \text{ тс/м}^2$

Расчет шага установки рам L , м, выполняем по формуле (3) [8].

$$L = \frac{N_{\text{свп}}}{P_1}, \quad (3)$$

где $N_{\text{свп}}$ – несущая способность выбранной податливой крепи, табл. 5.

Таблица 5

Несущая способность арочной крепи из спецпрофиля [7]

Типоразмер спецпрофиля СВП	Несущая способность податливой арки, тс
СВП-14	13-14
СВП-17	14-15
СВП-19	16-17
СВП-22	18-19
СВП-27	20-22
СВП-33	23-24

Заключение

Можно сделать вывод, что при определении качественной характеристики (RQD) по зарубежным методикам для уклона № 1684 в зоне «Надвиговая» рудника Бадран отмечается несопоставимость результатов с существующими на руднике рекомендациями по характеру нарушенности пород, что позволяет рекомендовать усиление крепи во избежание ее разрушения в течение всего срока поддержания выработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалев Л. Н., Буркова Н. В., Сычевский А. В., Кузнецов В. В. Минерально-сырьевые ресурсы республики Саха (Якутия) // Горный журнал. – 2016. – № 7. – С. 83–88.
2. Амузинский В. А. Металлогенические эпохи и золотоносность рудных комплексов Верхоянской складчатой системы. – Якутск : ИГАБМ СО РАН, 2005. – 247 с.
3. Bieniawsky Z. T. Case studies: prediction of rock mass behavior by the geomechanics classification // Second Australia – New Zealand Conference on geomechanics, 1975. – p. 36–41.
4. Beniaowski Z. T. Engineering rock mass classification. Wiley, New York, 251 p., 1989.
5. Зенько Д. К., Узбекова А. Р. Основные факторы, влияющие на устойчивость массивов в критериях Бенявского (RMR) и Бартон (Q) // ГИАБ, 2004. – С. 273–275.
6. Barton N. R. (2002). "Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39 (2): 185–216.
7. Шапошник Ю. Н., Усков В. А. Определение качественной характеристики (RQD) и рейтинга (RMR) рудного массива в подземных выработках шахты «Скалистая» // Интер-экспо ГЕО-Сибирь 2017. XIII Междунар. науч. конгр. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 4 т. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 99–107.

8. Инструкция по выбору металлической податливой крепи горных выработок. – М. : Стройиздат, 1989.
9. Наговицин Ю. Н., Кисель А. А., Тапсиев А. П., Усков В. А. Критерии выбора типа и расчета параметров крепи горизонтальных выработок на рудниках Норильского промышленного района // Горный журнал. – 2015. – № 6. – С. 74–80.
10. Тапсиев А. П., Усков В. А. Об особенностях выбора типа крепи нарезных выработок в зоне влияния очистных работ рудников Талнаха // ФТПРПИ. – 2015. – № 6. – С. 151–155.

REFERENCES

1. Kovalev L. N., Burkova N. V., Sychevskiy A. V., Kuznetsov V. V. Mineral reserves and resources Of the Republic of Sacha (Yakutia) // Mining journal. – 2016. – N 7, p.p. 83–88.
2. Amuzintsky V. A. Metallogenic epoch of the gold-bearing ore complexes of the Verkhoyansk fold system. Yakutsk: so ran IGABM. 247 p., 2005.
3. Bieniawsky Z.T. Case studies: prediction of rock mass behavior by the geomechanics classification // Second Australia – New Zealand Conference on geomechanics, 1975, p. 36–41.
4. Beniaowski Z.T. Engineering rock mass classification. Wiley, New York, 251 p., 1989.
5. Zenko D. K., Uzbekova A. R. The Main factors affecting the stability of the arrays in the criteria, Banevskio (RMR) and Barton (Q), GIAB, 2004. – pp. 273–275.
6. Barton, N.R. (2002). "Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel
7. Shaposhnik, Yu. N., Uskov V. A. Determination of the quality characteristics (RD) and rating (RMR) of ore array in the underground workings of the mine "Rocky" // Interexpo GEO-Siberia 2017. VIII mezhdunar. science. kongr. "Subsoil use. Mining. Directions and technologies of prospecting, exploration and development of mineral deposits. Geoecology": Collection of materials 4 T. T. 2. – Novosibirsk: SSGA, 2017. pp. 99–107.
8. Manual on the choice of metal yielding support of mine workings. – M.: Stroyizdat. 1989.
9. Nagovitsyn Yu. N., Kisel A. A., Tapsiev A. P., Uskov V. A. Criteria for selecting the type and calculating the parameters of horizontal workings on the mines of the Norilsk industrial district. – Mining magazine, № 6, 2015. – S. 74–80.
10. Tapsiev A. P., Uskov V. A. On peculiarities of the selection of the type of supports threaded excavations in the zone of influence of the sewage treatment works of the Talnakh mines, J. min. – 2015. – No. 6, 151–155.design". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39 (2): 185–216.

© В. А. Усков, Ю. Н. Шапошник, 2018

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД С НАРУШЕНИЯМИ СПЛОШНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПРЯМОГО СДВИГА

Ольга Михайловна Усольцева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат физико-математических наук, зав. ЦКП ГГГИ СО РАН, тел. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Павел Александрович Цой

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Владимир Николаевич Семенов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, главный специалист, тел. (383)330-96-41, e-mail: sem52@autorambler.ru

Разработан и создан многопараметрический экспериментальный комплекс для исследования геомеханических свойств горных пород в условиях прямого сдвига, позволяющий при прямых испытаниях на сдвиг реализовать граничное условие – «постоянная нормальная нагрузка». Комплекс дооснащен системой регистрации сигналов микросейсмической эмиссии. Разработана методика испытаний для определения сопротивления сдвигу нарушений сплошности горных пород, проведены тестовые испытания. Проведены тестовые испытания при многоступенчатом сдвиговом нагружении на горных породах различной прочности: с низкой прочностью (глинистая кора выветривания); прочные образцы (туфопесчаник с варьированием шероховатости поверхности). Анализ полученных экспериментальных данных при испытаниях на прямой сдвиг, одноосное, объемное сжатие и растяжение позволяет заключить, что механическое поведение горной породы определяется не только свойствами ненарушенной породы, но даже, в большей степени, механическими и геометрическими свойствами нарушений сплошности.

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, упругость, пластичность, разрушение, напряжение, деформация, прочность, акустическая эмиссия, сдвиг, нарушения сплошности, моделирование, геомеханика, горная порода.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DEFORMATION-STRENGTH PROPERTIES OF ROCKS DISCONTINUITIES UNDER DIRECT SHEAR CONDITIONS

Olga M. Usol'tseva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Head of the Shared Use Center for Geomechanical, Geophysical, and Geodynamic Measurements SB RAS, phone: (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Pavel A. Tsoi

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Vladimir N. Semenov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Chief Specialist, phone: (383)330-96-41, e-mail: sem52@autorambler.ru

A multi-parameter experimental complex has been developed and created for the study of geomechanical properties of rocks under direct shear conditions. The complex allows realizing boundary condition "constant normal load" under direct shear test. The complex is equipped with a system for recording of microseismic emission signals. A test procedure for determining shear strength of rock discontinuities has been developed and test experiments were conducted. The tests under multistage shear loading of rocks of different strengths have been conducted including: low strength rock (clay weathering crust) and high strength rocks (tuff sandstone with various surface roughness). Analysis of the experimental data obtained under direct-shear, uniaxial, triaxial compression and tension tests allows us to conclude that the mechanical behavior of the rock is determined not only by the properties of undisturbed rock, but even more so by mechanical and geometric properties of discontinuities.

Key words: laboratory experiment, elasticity, plasticity, failure, stress, deformation, strength, acoustic emission, shear, discontinuity, modeling, rock.

Введение

Механическое поведение массива горной породы определяется не только свойствами ненарушенной породы, но даже, в большей степени, механическими и геометрическими свойствами нарушений сплошности. Термин «нарушение сплошности» относится к любой поверхности ослабления в массиве с ничтожно слабой прочностью на разрыв. Обзор отечественной и зарубежной литературы за последние годы показывает, что имеется большое количество работ, посвященных исследованию физико-механических свойств нарушений сплошности при сдвиговом деформировании. На эквивалентных материалах и горных породах изучалась эволюция зон сдвига, были установлены качественные закономерности их расположения, ориентации различных систем трещин относительно магистральной трещины, изучено влияние всевозможных факторов (различных модельных материалов, скорости нагружения, влажности, граничных условий и т. д.) на деформационно-прочностные характеристики нарушений сплошности [1–19].

Многопараметрический испытательно-измерительный комплекс и методика исследований

Для исследования деформационно-прочностных свойств нагружений сплошности был создан многопараметрический испытательно-измерительный комплекс для проведения испытаний образцов горных пород и геоматериалов в условиях прямого сдвига на базе сервогидравлического пресса Instron 8802. За основу методики лабораторного определения сопротивления сдвигу нарушений сплошности горных пород взята обновленная версия стандарта International Society for Rock Mechanics (ISRM) ASTM D 5607-08, опубликованная в [20]. В общем случае методика включает в себе требования к проведению испыта-

ний по определению сопротивления прямому сдвигу образцов горных пород, как сплошных, имеющих невысокую прочность, так и содержащих нарушения сплошности, при двух случаях граничных условий: постоянная нормальная нагрузка (ПНН) и постоянная нормальная жесткость (ПНЖ) в направлении перпендикулярном действию сдвигового усилия. Суть испытания сводится к определению квазистатической прочности нарушения сплошности в условиях ПНН. При таких испытаниях определение сопротивления сдвигу подразумевает приложение нескольких различных величин постоянной нормальной нагрузки для одной или нескольких проб, отобранных для одной системы трещин массива горной породы.

Общий вид установки для испытаний приводится на рис. 1. В захватах пресса (1) фиксировалось специальное устройство (2), которое представляет собой раму (3), состоящую из двух частей, в которую устанавливается срезная коробка (4). Срезная коробка состоит из двух частей, в которых помещается испытываемый образец. Нормальное (прижимающее) усилие создается гидравлическим цилиндром (5), усилие контролируется манометром и электронным датчиком давления. Механизм нормальной нагрузки и соединительные элементы сконструированы таким образом, что обеспечивают равномерное распределение нормальной нагрузки на всю плоскость нарушения сплошности. Во время испытаний на сдвиг важно поддерживать постоянную нормальную нагрузку. Разработанное устройство позволяет поддерживать ее в пределах допуска ($\pm 2\%$). Нормальное перемещение регистрируется с помощью 4-х датчиков Solartron DP10S (6), расположенных в плоскости, перпендикулярной нормальному усилию. При этом, запас смещения должен превышать величину дилатансии нарушения сплошности. Сдвиговое усилие, задаваемое траверсой пресса Instron 8802, через роликовую постель передается на плоскость сдвига. Определение прочности трещин на сдвиге может следовать двум типам методик: а) одиночный сдвиг и б) многоэтапный сдвиг. В случае одиночного сдвига на нескольких пробах прикладываются различные значения постоянного нормального усилия. Используются 3÷5 образцов, выбранных из одного и того же нарушения сплошности на массиве. В случае невозможности выбрать несколько проб, проводится с многоэтапный сдвиг. Суть испытания заключается в повторных нагружениях при различных постоянных нормальных усилиях на одном образце. Для одного образца с нарушением сплошности используется 3÷5 сдвиговых нагружений с различными (возрастающими) значениями нормальных усилий. В процессе испытания непрерывно фиксируются и записываются в компьютерный файл сдвиговое усилие, сдвиговое перемещение (перемещение траверсы пресса), нормальное усилие и соответствующее ему перемещение.

С использованием вышеуказанных экспериментальных данных строятся зависимости касательного напряжения от касательного смещения при каждом уровне нормальной нагрузки и дается оценка пикового и остаточного напряжения сдвига для каждой пробы одной трещины при одноэтапных испытаниях, или для всех этапов многоэтапных исследований одной пробы [21]. Далее для каждого образца (при многоступенчатом сдвиге) или для каждой пробы из не-

скольких образцов при одноступенчатом сдвиге строят зависимости максимального сдвигового напряжения от нормального напряжения, и остаточного сдвигового напряжения сдвига от нормального напряжения. С использованием этих диаграмм для оценки параметров прочности заданного нарушения сплошности используется критерий прочности Кулона-Мора. Параметры линейного критерия Кулона-Мора определяются по формуле:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi,$$

где c – сцепление, $\tan \varphi$ – коэффициент трения, φ – угол трения.



Рис. 1. Устройство для испытаний на сдвиг образца горной породы при действии нормальной сжимающей силы:

1 – захваты прессы; 2 – устройство для испытаний на сдвиг; 3 – рама; 4 – срезная коробка; 5 – гидравлический цилиндр; 6 – 4 датчика для измерения нормального перемещения

Результаты экспериментов и обсуждение

Для проведения экспериментов были выбраны два типа горной породы: туфопесчаник и глинистая кора выветривания. На образцах из указанных пород были проведены предварительные испытания на одноосное сжатие, растяжение. Размеры образцов для испытаний на одноосное сжатие: диаметр 30,5 мм, длина 60,5 мм; образцов для испытаний на растяжение – диаметр 30,5 мм, длина 30 мм. При испытаниях на одноосное сжатие определены предел прочности, модуль деформации и коэффициент поперечной деформации, при испытаниях на растяжение – предел прочности. Для каждого типа горной породы построены паспорта прочности, определены сцепление и угол внутреннего трения, результаты испытаний приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов туфопесчаника и глинистой коры выветривания при одноосном сжатии и растяжении, паспорт прочности

№ п/п	Краткое литологическое описание	Предел прочности, МПа		Модуль деформации E , ГПа	Коэфф. поп. деформации ν	Сцепление, МПа	Угол внутр. трения, град
		Одноосное сжатие	Растяжение				
1	Туфопесчаник	76,7	19,3	19,313	0,155	18,5	37
2	Глинистая кора выветривания	0,26	0,14	0,013	0,51	0,07	21

Результаты испытаний образцов из туфопесчаника, глинистой коры выветривания по стандарту ASTM D 5607 приведены в табл. 2. В каждом испытании на срез со сжатием было выполнено по 3÷4 цикла нагружения.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов туфопесчаника и глинистой коры выветривания при прямом сдвиге

№ образца	Цикл испытания	Предел прочности на сдвиг, МПа	Нормальные напряжения, МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град
Туфопесчаник (шероховатость 1)	1	4,78	5	1,93	30
	2	6,45	7,5		
	3	7,7	10		
Туфопесчаник (шероховатость 0)	1	2,47	5	0,26	24
	2	3,56	7,5		
	3	4,67	10		
Глинистая кора выветривания	1	0,06	0,015	0,063	24
	2	0,066	0,03		
	3	0,075	0,045		
	4	0,079	0,06		

На рис. 2, 3 приводятся фотографии образцов туфопесчаника (шероховатость 1) и глинистой коры выветривания до и после испытания на прямой сдвиг. Образцы глины были испытаны в виде цельного образца; в процессе испытания они находились в пленке для сохранения естественной влажности. Заливка для срезной коробки представляла собой стоматологический гипс. Образцы туфопесчаника предварительно были разделены на две части двумя спо-

собами: 1) в образце предварительно был сделан распил в направлении естественной трещиноватости (под углом 60° к оси керна), шероховатость поверхности согласно калибровочной шкале стандарта ASTM D 5607 составляла 0; 2) образец был предварительно разделен на две части по плоскостям естественного ослабления образца в направлении естественной трещиноватости (под углом 60° к оси керна), шероховатость согласно калибровочной шкале стандарта ASTM D 5607 составляла 1.



Рис. 2. Фотография образца туфопесчаника до и после испытания



Рис. 3. Фотография образца глинистой коры выветривания до и после испытания

Из сравнения значений сцепления в табл. 1 и 2 можно заключить, что значение сцепления для туфопесчаника, полученное по результатам одноосного сжатия и растяжения составляет 18,5 МПа, что превышает не менее, чем на порядок величину сцепления, полученную при испытаниях на сдвиг. Кроме того, шероховатость поверхности также существенно влияет на эту характеристику, при значении шероховатости согласно калибровочной шкале стандарта ASTM D 5607, равной 1 сцепление равно 1,93 МПа, при шероховатости 0–0,26 МПа. Угол внутреннего трения изменяется не так существенно, он составляет 37° по данным, вычисленным из опытов на сжатие, растяжение и – 30° , 24° при прямом сдвиге (образцы с шероховатостью 1 и 0 соответственно). Для образцов из глинистой коры выветривания значения сцепления и угла внутреннего трения, вычисленные из различных типов испытаний различаются не так существенно. Для образца из глинистой коры выветривания значения сцепления и угла внут-

ренного трения, полученные при растяжении, одноосном сжатии и при сдвиговом нарушении отличаются на 10 и 15 % соответственно.

Для понимания механизма сдвигового деформирования образцов с нарушениями сплошности дальнейшие исследования будут направлены на определение влияния шероховатости поверхности (в более широком диапазоне), скорости сдвигового нагружения, граничного условия «постоянная нормальная жесткость», а также мониторинга сигналов микросейсмической эмиссии, сопровождающих процесс деформирования.

Заключение

Разработан и создан многопараметрический испытательно-измерительный комплекс для исследования геомеханических свойств горных пород в условиях прямого сдвига. В состав комплекса входит сервогидравлический пресс Instron 8802, пресс доукомплектован дополнительным блоком, разработанным и изготовленным в ЦКП ГГГИ СО РАН, позволяющим при прямых испытаниях на сдвиг реализовать граничное условие «постоянная нормальная нагрузка». Блок включает в себя: жесткую испытательную конструкцию с прободержателем, нагружающее устройство для приложения нормальной нагрузки на образец, устройства для измерения нормальной нагрузки, и нормального смещения. Комплекс дооснащен системой регистрации сигналов микросейсмической эмиссии.

Разработана методика испытаний для определения сопротивления сдвигу нарушений сплошности горных пород на основе обновленной версии стандарта International Society for Rock Mechanics (ISRM) ASTM D5607-08, адаптированная к имеющемуся лабораторному оборудованию. Данная методика испытаний на прямой сдвиг позволяет определить предельную или остаточную прочность на сдвиг нарушения сплошности в выбранном направлении как функцию нормального напряжения, прилагаемого к плоскости сдвига.

Проведены тестовые испытания при многоступенчатом сдвиговом нагружении на горных породах различной прочности: 1) сплошные образцы с низкой прочностью (глинистая кора выветривания, предел прочности менее 2 МПа); 2) прочные образцы, имеющие нарушения сплошности: туфопесчаник (предел прочности 60÷100 МПа) с варьированием шероховатости поверхности. Анализ полученных экспериментальных данных при испытаниях на прямой сдвиг, одноосное, объемное сжатие и растяжение позволяет заключить, что механическое поведение горной породы определяется не только свойствами ненарушенной породы, но даже, в большей степени, механическими и геометрическими свойствами нарушений сплошности. Полученные результаты могут быть использованы при оценке предельного равновесия породных блоков в бортах карьеров, стенах подземных выработок, а также как исходные параметры для элементов «трещин» в моделях сплошных и дискретных сред при численном моделировании блочных массивов.

Работа выполнена финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00915) на оборудовании ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Atapour H., Moosavi M. The Influence of Shearing Velocity on Shear Behavior of Artificial Joints // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2014, Vol. 47. – Iss. 5. – С. 1745–1761. doi.org/10.1007/s00603-013-0481-9.
2. Бокун А. Н. Закономерности образования и особенности строения зон горизонтального сдвига (по результатам физического моделирования) // *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докл. Всерос. конф.* – 2009. – Том 1. – М.: ИФЗРАН.
3. Gao Y., Wong L. N. Y. A Modified Correlation Between Roughness Parameter Z_2 and the JRC. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Vol. 48. – Iss.1. – С. 387–396. doi.org/10.1007/s00603-013-0505-5.
4. Hencher S. R., Richards L. R. Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. May 2015, Vol. 48, Iss.3, pp. 883–905. doi.org/10.1007/s00603-014-0633-6.
5. Indraratna B., Thirukumaran S., Brown E. T., Zhu S. P. Modelling the Shear Behaviour of Rock Joints with Asperity Damage Under Constant Normal Stiffness. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Vol. 48. – Iss.1. – С. 179–195. doi.org/10.1007/s00603-014-0556-2.
6. Jang H. S., Jang B. A. New Method for Shear Strength Determination of Unfilled, Unweathered Rock Joint. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Vol. 48. – Iss.4. – С. 1515–1534. doi.org/10.1007/s00603-014-0660-3.
7. Meng F., Zhou H., Wang Z. et al. (2016). Experimental study on the prediction of rockburst hazards induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels. // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2016. – Vol. 86. – С. 210–223. doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.04.013.
8. Mirzaghorbanali A., Nemcik J., Aziz N. Effects of Cyclic Loading on the Shear Behaviour of Infilled Rock Joints Under Constant Normal Stiffness Conditions. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2014. – Vol. 47. – Iss.4. – С. 1373–1391. doi.org/10.1007/s00603-013-0452-1.
9. Mohd-Nordin M. M., Song K. I., Cho G. C., Mohamed Z. Long-Wavelength Elastic Wave Propagation Across Naturally Fractured Rock Masses. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2014. – Vol. 47. – Iss.2. – С. 561–573. doi.org/10.1007/s00603-013-0448-x.
10. Moradian Z.A., Ballivy G., Rivard P. Correlating acoustic emission sources with damaged zones during direct shear test of rock joints. // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2012. – Vol. 49. – Iss.6. – С. 710–718. doi: 10.1139/T2012-029.
11. Oparin V.N., Usol'tseva O. M., Tsoi P.A., Semenov V.N. Evolution of stress-strain state in structured rock specimens under uniaxial loading. // *Journal of Mining Science*. – 2013. – Vol. 49. – Iss. 5. – С. 677–690. doi.org/10.1134/S1062739149050018.
12. Oparin V.N., Usol'tseva O. M., Tsoi P.A., Semenov V.N. Evolution of stress-strain state in the structural heterogeneities geomaterials under uniaxial and biaxial loading. // *Journal of Applied Mathematics and Physics*. – 2014. – Vol. 2. – No.12. – С.1039-1046. doi: 10.4236/jamp.2014.212118.
13. Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. – М. : ИКЦ Академкнига, 2007.
14. Ребецкий Ю. Л., Михайлова А.В. Роль сил гравитации в формировании глубинной структуры сдвиговых зон // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2011. – Vol. 2. – С. 45–67.
15. Usol'tseva O., Vostrikov V., Tsoi P., Semenov V. Integrated research into features of physical fields in model geomedium with discontinuity generated under external stresses // 17 International multidisciplinary scientific geoconference (SGEM 2017) : proc. of conf., Bulgar-

ia, Albena, 29 Jun – 5 Jul, 2017. – Albena : STEF92 Technology Ltd. – 2017. – Vol. 17. – Iss.13. – C. 461-469. doi: 10.5593/SGEM2017/13/S03.059.

16. Vergara M. R., Kudella P., Triantafyllidis T. Large Scale Tests on Jointed and Bedded Rocks Under Multi-Stage Triaxial Compression and Direct Shear. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Vol. 48. – Iss.1. – C.75-92. doi.org/10.1007/s00603-013-0541-1.

17. Vostrikov V., Usoltseva O., Tsoi P., Semenov V. Stages of deformation of rocks and character of change in parameters of microseismic signal // 16 International multidisciplinary scientific geoconference (SGEM 2016) : proc. of conf., Bulgaria, Albena, 30 Jun–6 Jul, 2016. – Albena : STEF92 Technology Ltd., 2016. – Book 1. – Vol. 2. – C. 811-818. doi: 10.5593/SGEM 2016/B12/S03.104.

18. Xia C. C., Tang Z. C.g, Xiao W. M., Song Y. L. New Peak Shear Strength Criterion of Rock Joints Based on Quantified Surface Description.// *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2014. – Vol. 47. – Iss.2. – C. 387–400. doi.org/10.1007/s00603-013-0395-6.

19. Zhou H., Meng F.Z., Zhang C.Q. et al. Investigation of the acoustic emission characteristics of artificial saw-tooth joints under shearing condition. // *Acta Geotechnica*. – 2014. – Vol. 11. – Iss.4. – C. 925–939. doi:10.1007/s11440-014-0359-3.

20. Muralha J., Grasselli G., Tatone B., Blümel M., Chrysanthakis P., Yujing J.. ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2014. – Vol. 47. – Iss.1. – C. 291–302. doi.org/10.1007/s00603-013-0519-z.

21. Wittke W. *Rock mechanics: theory and applications with case histories*. Springer-Verlag, Berlin. – 1990. – C. 1076. doi:10.1007/978-3-642-88109-1.

REFERENCES

1. Atapour H., Moosavi M. (2014). The Influence of Shearing Velocity on Shear Behavior of Artificial Joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 47, Iss.5, 1745–1761. doi.org/10.1007/s00603-013-0481-9.

2. Bokun A.N. (2009). Zakonomernosti obrazovaniya i osobennosti stroeniya zon gorizontalnogo sdviga (po rezulnanam fizicheskogo modelirovaniya). *Tektofizika i aktualnie voprosi nauk o Zemle. Materiali dokladov Vseross. Konf.*, Vol. 1, Moscow, Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. [in Russian].

3. Gao Y., Wong L. N. Y. (2015). A Modified Correlation Between Roughness Parameter Z₂ and the JRC. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 48, Iss.1, 387–396. doi.org/10.1007/s00603-013-0505-5.

4. Hencher S. R., Richards L. R. (2015). Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 48, Iss.3, 883–905. doi.org/10.1007/s00603-014-0633-6.

5. Indraratna B., Thirukumar S., Brown E. T., Zhu S. P. (2015). Modelling the Shear Behaviour of Rock Joints with Asperity Damage Under Constant Normal Stiffness. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 48, Iss.1, 179–195. doi.org/10.1007/s00603-014-0556-2.

6. Jang H. S., Jang B. A. (2015). New Method for Shear Strength Determination of Unfilled, Unweathered Rock Joint. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, July 2015, Vol. 48, Iss.4, 1515–1534. doi.org/10.1007/s00603-014-0660-3.

7. Meng F., Zhou H., Wang Z. et al (2016) Experimental study on the prediction of rockburst hazards induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 86, 210–223. doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.04.013.

8. Mirzaghobanali A., Nemcik J., Aziz N. (2014). Effects of Cyclic Loading on the Shear Behaviour of Infilled Rock Joints Under Constant Normal Stiffness Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 47, Iss.4, 1373–1391. doi.org/10.1007/s00603-013-0452-1.

9. Mohd-Nordin M. M., Song K. I., Cho G. C., Mohamed Z. (2014). Long-Wavelength Elastic Wave Propagation Across Naturally Fractured Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 47, Iss.2, 561–573. doi.org/10.1007/s00603-013-0448-x.
10. Moradian Z.A., Ballivy G., Rivard P. (2012). Correlating acoustic emission sources with damaged zones during direct shear test of rock joints. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 49, Iss.6, pp. 710–718. doi: 10.1139/T2012-029.
11. Oparin V.N., Usol'tseva O. M., Tsoi P.A., Semenov V.N. (2013). Evolution of stress-strain state in structured rock specimens under uniaxial loading. *Journal of Mining Science*, Vol. 49, Iss. 5, 677–690. doi.org/10.1134/S1062739149050018.
12. Oparin V.N., Usol'tseva O. M., Tsoi P.A., Semenov V.N. (2014). Evolution of stress-strain state in the structural heterogeneities geomaterials under uniaxial and biaxial loading. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2014, Vol. 2, No. 12, 1039–1046. doi: 10.4236/jamp.2014.212118.
13. Rebetskiy Yu. L. (2007). Tektonicheskie napryazheniya i prochnost gornih massivov. Moscow : Informatsionno-Konsultativniy Tsentr Akademkniga [in Russian].
14. Rebetskiy Yu. L., Mikhailova A.V. (2011). The role of gravity in formation of deep structure of shear zones. *Geodynamics Tectonophysics*, Vol. 2, pp. 45–67. [in Russian].
15. Usol'tseva O., Vostrikov V., Tsoi P., Semenov V. (2017). Integrated research into features of physical fields in model geomedium with discontinuity generated under external stresses // *17 International multidisciplinary scientific geoconference (SGEM 2017) : proc. of conf., Bulgaria, Albena*, 29 Jun–5 Jul, 2017. – Albena: STEF92 Technology Ltd., Vol. 17, Iss. 13, 461–469. doi: 10.5593/SGEM2017/13/S03.059.
16. Vergara M. R., Kudella P., Triantafyllidis T. (2015). Large Scale Tests on Jointed and Bedded Rocks Under Multi-Stage Triaxial Compression and Direct Shear. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 48, Iss.1, 75–92. doi.org/10.1007/s00603-013-0541-1.
17. Vostrikov V., Usol'tseva O., Tsoi P., Semenov V. (2016). Stagerwise deformation of rocks and character of change in parameters of microseismic signal // *16 International multidisciplinary scientific geoconference (SGEM 2016) : proc. of conf., Bulgaria, Albena*, 30 Jun–6 Jul, 2016. – Albena: STEF92 Technology Ltd., Book 1, Vol. 2, 811–818. doi: 10.5593/SGEM 2016/B12/S03.104.
18. Xia C. C., Tang Z. C.G, Xiao W. M., Song Y. L. (2014). New Peak Shear Strength Criterion of Rock Joints Based on Quantified Surface Description. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 47, Iss.2, 387–400. doi.org/10.1007/s00603-013-0395-6.
19. Zhou H., Meng F.Z., Zhang C.Q. et al. (2014). Investigation of the acoustic emission characteristics of artificial saw-tooth joints under shearing condition. *Acta Geotechnica*, Vol. 11, Iss.4, 925–939. doi:10.1007/s11440-014-0359-3.
20. Muralha J., Grasselli G., Tatone B., Blümel M., Chryssanthakis P., Yujing J.. ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, Vol. 47, Iss.1, 291–302. doi.org/10.1007/s00603-013-0519-z.
21. Wittke W. (1990). Rock mechanics: theory and applications with case histories. Springer-Verlag, Berlin, P. 1076. doi:10.1007/978-3-642-88109-1.

© О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов, 2018

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОЛЬЦЕВОГО ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНИКА

Юрий Павлович Харламов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, инженер лаборатории бурения и технологических импульсных машин, тел. (383)205-30-30, доп. 223, e-mail: 808@nn.ru

Александр Юрьевич Примычкин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории бурения и технологических импульсных машин, тел. (383)205-30-30, доп. 223, e-mail: 808@nn.ru

Одним из перспективных способов проходки скважин в крепких горных породах является бурение погружными пневмоударниками с обратной циркуляцией очистного агента. В основе этой технологии лежит непрерывное удаление из призабойной зоны выбуренного породного материала и транспортирование его на поверхность потоком сжатого воздуха по осевому каналу пневмоударника и внутренней трубе двойной буровой колонны.

На основе результатов, полученных при стендовых экспериментах и с использованием теории динамического подобия и моделирования, разработана методика расчета системы очистки-сбора бурового шлама на забое при бурении методом реверсивной циркуляции. Данная методика позволяет определить основные геометрические параметры очистной системы при проектировании погружных буровых снарядов.

Описан пример применения методики расчета для кольцевого погружного пневмоударника, используемого при бурении геологоразведочных скважин диаметром 325 мм в горных породах высокой крепости.

Ключевые слова: бурение, геологоразведочная скважина, погружной пневмоударник, обратная циркуляция очистного агента, циркуляционная система, методика расчета, динамическое подобие.

CALCULATION TECHNIQUE FOR CIRCULATION SYSTEM OF AN ANNUAL DOWNHOLE HAMMER

Yury P. Kharlamov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Engineer, Laboratory for Drilling and Technological Impulse-Forming Machines, phone: (383)205-30-30, extension 223, e-mail: 808@nn.ru

Aleksander Yu. Primychkin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, Laboratory for Drilling and Technological Impulse-Forming Machines, phone: (383)205-30-30, extension 223, e-mail: 808@nn.ru

A promising method of well drilling in hard rocks is drilling with downhole hammers with reverse circulation of the cleaning agent. This technology is based on the continuous removal of cuttings from the bottomhole zone and their transportation to the surface by a flow of compressed air along the axial channel of the hammer and the inner pipe of the double drill string.

Based on the results obtained during bench experiments and the theory of dynamic similarity and modeling a calculation technique has been developed. The technique is used for the calculation of the “cleaning – collection of cuttings” system at the bottom during drilling by the reversible circulation method. This technique provides the opportunity to determine the main geometric parameters of the cleaning system in the design of downhole drill strings.

An example of the calculation technique employment for an annual downhole hammer used for drilling exploration wells with the 325mm diameter in hard rocks is described.

Key words: drilling, exploration well, downhole hammer, reverse circulation of cleaning agent, circulating system, calculation method, dynamic similarity.

Введение

Важнейшей составляющей технологий разведки и разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи является бурение скважин в породном массиве. Перспективы развития буровой техники связаны с ориентацией предприятий горного комплекса на улучшение показателей извлечения полезного ископаемого, повышение безопасности горных работ, особенно в условиях увеличения глубин разработки, развитие новых технологий производства буровых работ [1–5].

В настоящий момент наиболее эффективным способом проходки скважин в массиве горных пород является ударно-вращательный, обеспечивающий бурение с минимальной энергоемкостью [6]. Наиболее перспективным способом ударно-вращательного бурения является бурение скважин путем применения погружных пневмоударников с обратной циркуляцией очистного агента. В основе этой технологии лежит непрерывное удаление из призабойной зоны выбуренного породного материала и транспортирование его на поверхность потоком очистного агента по осевому каналу пневмоударника и внутренней трубе двойной буровой колонны [7–9]. Это достигается путем использования кольцевых забойных снарядов, обеспечивающих подачу энергоносителя через межтрубный зазор двойной буровой колонны и вынос аэрированного керно-шламового потока через центральный канал бурового става на поверхность [10]. Бурение скважин таким способом в России и ряде зарубежных стран (Швеция, Германия, Великобритания, США) производится на протяжении уже более трех десятилетий. Перспективность этого способа проходки скважин высоко оценена и признана специалистами. В настоящее время ведущими европейскими и мировыми производителями погружных пневмоударных машин, такими, как Sandvik AB (Швеция), Atlas Copco (Швеция), Numa (США), хорошо известными на рынке буровой техники, выпускается типоразмерный ряд пневмоударников, называемых кольцевыми по форме ударного элемента, а также буровых установок, адаптированных к бурению с реверсивной циркуляцией [11–17].

Преимуществами использования кольцевого пневмоударника являются:

– надежный запуск при постановке на забой и устойчивая работа в режиме бурения скважин, обеспечивающая вынос керно-шламового материала в расчетном объеме;

- удаление воды и шлама из призабойной зоны в виде грязевого потока, а также налипшей породы со стенок шламопровода в режиме блокировки при бурении обводненных скважин;

- наличие шламопровода позволяет отвести зону выброса шлама на значительное расстояние от места бурения, что обеспечивает значительное улучшение условий труда бурильщиков и позволяет установить очистные устройства, сохраняя экологическую безопасность в зоне производства работ. Это же обстоятельство позволяет сохранить в чистом виде механизмы и агрегаты установки, что положительно влияет на срок их службы и безопасность эксплуатации в целом;

- исключение вероятности растепления стенок скважины при бурении в вечномёрзлых и перемежающихся породах.

Вместе с тем, опыт эксплуатации кольцевых пневмоударников показывает, что производительность бурения во многом зависит от эффективности работы системы очистки забоя от бурового шлама, поскольку его необходимо направить в центральный шланготранспортный канал, исключив выход на поверхность через зазор между стенками скважины и буровой колонной. Недостаточная эффективность работы циркуляционной системы приводит к следующему:

- увеличивается энергоёмкость бурения, как следствие роста затрат энергии удара на вторичное измельчение частиц отделенной от массива породы, из-за неэффективной очистки забоя;

- возникает высокая вероятность остановки пневмоударника либо выхода всего бурового шлама на поверхность по боковому зазору;

- существенно снижается достоверность геологических проб при геолого-разведочном бурении, а также при бурении на воду из-за рассеивания бурового шлама.

Методы, материалы и результаты

Повышение эффективности работы циркуляционной системы пневмоударника с обратной циркуляцией очистного агента является актуальной задачей. Для решения этой задачи в лаборатории бурения и технологических импульсных машин Института горного дела СО РАН проводились работы по обоснованию рациональных с позиции минимизации выхода шлама в затрубное пространство конструкции и параметров циркуляционной системы кольцевого погружного пневмоударника. Основной задачей являлось обеспечение максимально полной очистки забоя скважины за счет увеличения подачи энергоносителя в осевой канал шланготранспортной магистрали.

На процесс сбора на забое и направления в центральную шланготранспортную магистраль разрушенного породного материала оказывают влияние параметры кольцевой пневмоударной машины и породоразрушающего инструмента к ней: размер и расположение призабойного пакера, расстояние от выхлопных отверстий до дна забоя, наличие эжектора в шланготранспортной магистрали, конфигурация и расположение шлангосборных отверстий, наличие в призабой-

ной зоне экрана противодавления. Для наиболее полного сбора на забое разрушенного породного материала необходимо задавать геометрические параметры этих элементов циркуляционной системы в определенных диапазонах.

На практике часто возникает задача: создать пневмоударник с заданным значением энергии удара на базе имеющейся отработанной машины. В лаборатории бурения и технологических импульсных машин ИГД СО РАН разработана инженерная методика расчета основных параметров кольцевого пневмоударника с применением теории динамического подобия, а также результатов экспериментального исследования циркуляционной системы кольцевой пневмоударной машины.

На первом этапе необходимо задаться требуемым диаметром буримой скважины, исходя из технических и технологических условий, а также необходимой энергией единичного удара, исходя из геологических условий региона работ.

На втором этапе по практическим рекомендациям [18] вычисляются коэффициенты α и β для определения осевых и диаметральных размеров новой машины, а также масс ее инерционных элементов. При переходе от прототипа к новой машине необходимо: все осевые размеры прототипа изменить в α раз, диаметральные размеры – в $\sqrt{\beta/\alpha}$ раз, а массу ударника и других инерционных элементов – в β раз. При этом расчетные коэффициенты вычисляются по формулам:

$$\beta = A_{\text{н}} / A_{\text{п}}, \quad \alpha = \beta / (d_{\text{н}} / d_{\text{п}})^2, \quad (1)$$

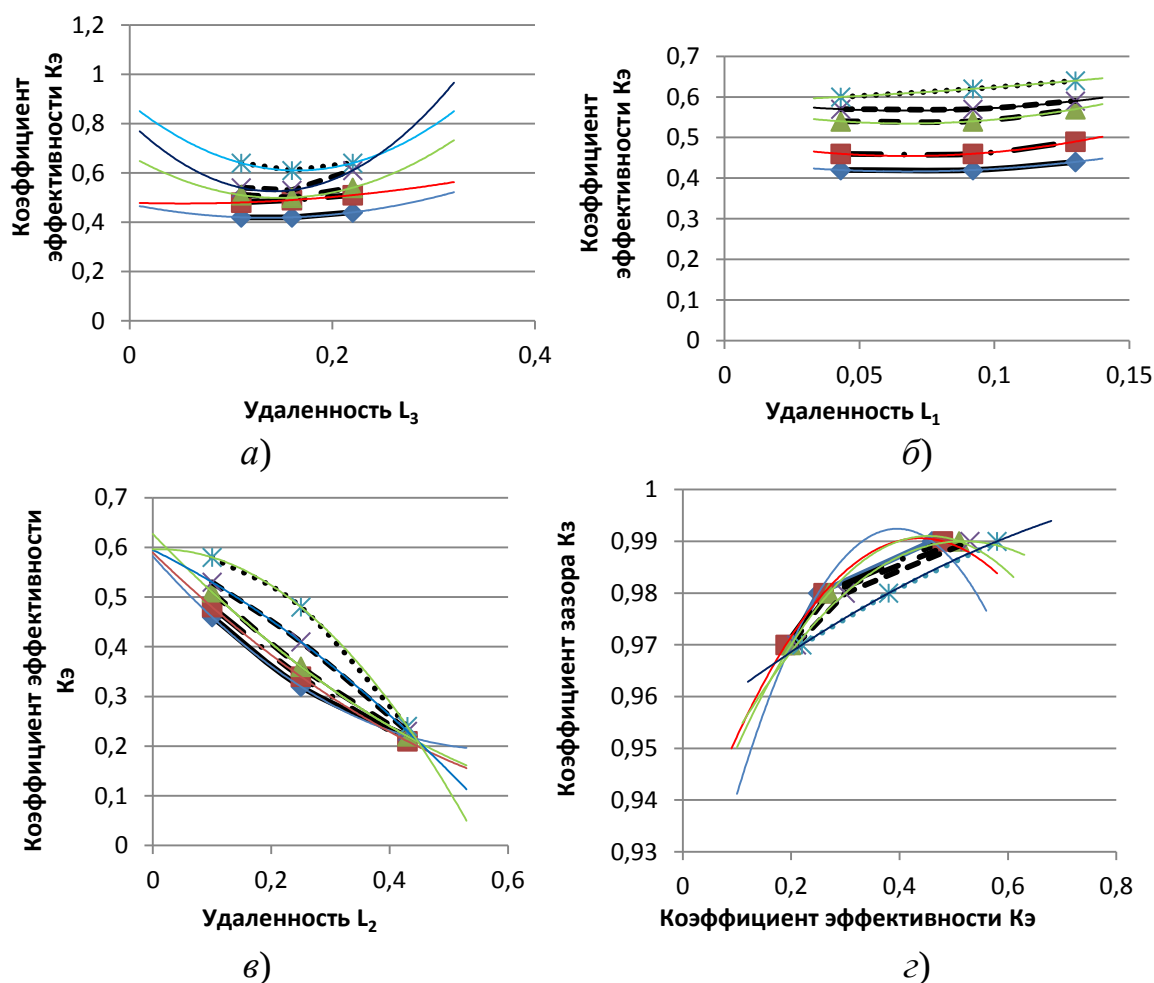
где $A_{\text{п}}$ – энергия единичного удара прототипа; $A_{\text{н}}$ – энергия единичного удара новой машины; $d_{\text{п}}$ – диаметр бурового долота прототипа; $d_{\text{н}}$ – диаметр бурового долота новой машины.

На третьем этапе определяются геометрические параметры циркуляционной системы нового кольцевого пневмоударника [19]. Диапазоны значений основных конструктивных параметров, обеспечивающих максимальные или близкие к ним значения $K_{\text{э}}$ (рисунок):

- расстояние от выхлопных отверстий до дна забоя $(0,092-0,013)d_{\text{СКВ}}$;
- расстояние от шламосборных отверстий до дна забоя $(0,22-0,25)d_{\text{СКВ}}$;
- диаметр призабойного пакера $(0,968-0,982)d_{\text{СКВ}}$;
- расстояние призабойного пакера до дна забоя $(0,1-0,25)d_{\text{СКВ}}$.

Обсуждение

Ниже приведены результаты расчета основных параметров системы «пневматическая ударная машина – породоразрушающий инструмент» для бурения скважин в условиях Южной Якутии диаметром 325 мм погружной пневматической ударной машиной с обратной циркуляцией очистного агента. В качестве прототипа принят пневмоударник ПК-132, созданный в ИГД СО РАН с использованием новых запатентованных решений [20]. Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.



Зависимости эффективности работы циркуляционной системы от расстояния от шламоборных отверстий до дна забоя (а), расстояния от выхлопных отверстий до дна забоя (б), расстояния от призабойного пакера до дна забоя (в), диаметра призабойного пакера (г)

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Параметр	Обозначение	Величина
Кольцевой пневмоударник – прототип	ПК-132	
Диаметр буримой скважины, мм	$d_{\text{п}}$	132
Энергия единичного удара, Дж	$A_{\text{п}}$	185
Длина ударника, м	$l_{\text{уд.п}}$	0,316
Длина буровой коронки, м	$l_{1\text{п}}$	0,25
Длина пневмоударника, м	$l_{2\text{п}}$	0,855
Диаметр ударника в камере рабочего хода, м	$d_{\text{уд.п}}$	0,102
Диаметр призабойного пакера, м	$d_{1\text{п}}$	0,128
Диаметр корпуса пневмоударника, м	$d_{2\text{п}}$	0,122

Окончание табл. 1

Параметр	Обозначение	Величина
Масса ударника, кг	$m_{уд.п}$	7,85
Масса буровой коронки, кг	$m_{1п}$	8,15
Масса пневмоударника, кг	$m_{2п}$	58,75

Основные зависимости для расчета параметров погружной пневматической ударной машины и результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчет параметров погружной пневматической ударной машины
с обратной циркуляцией очистного агента

Определяемая величина	Формула	Результат
Диаметр буримой скважины новым пневмоударником d_n , мм	—	325
Энергия единичного удара нового пневмоударника A_n , Дж	—	1 000
Коэффициент β	$\beta = A_n / A_{п}$	5,4
Коэффициент α	$\alpha = \beta / (d_n / d_{п})^2$	0,94
Длина ударника новой машины $l_{уд.н}$, мм	$l_{уд.н} = \alpha l_{уд.п}$	297
Длина буровой коронки новой машины, $l_{1н}$, мм	$l_{1н} = \alpha l_{1п}$	235
Длина нового пневмоударника $l_{2н}$, мм	$l_{2н} = \alpha l_{2п}$	807
Диаметр нового ударника в камере рабочего хода $d_{уд.н}$, мм	$d_n = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} d_{п}$	288
Диаметр призабойного пакера нового пневмоударника $d_{пак.н}$, мм		307
Диаметр корпуса нового пневмоударника $d_{корп.н}$, мм		292
Масса ударника новой машины $m_{уд.н}$, кг	$m_{уд.н} = \beta m_{уд.п}$	42,39
Масса новой буровой коронки $m_{1н}$, кг	$m_{1н} = \beta m_{1п}$	44,01
Масса нового пневмоударника $m_{2н}$, кг	$m_{2н} = \beta m_{2п}$	317,25

В табл. 3 приведен уточненный расчет параметров циркуляционной системы пневмоударника для бурения скважин диаметром 325 мм с использованием экспериментально полученных зависимостей.

В результате конструктивной проработки приняты:

- расстояние от призабойного пакера до дна забоя $l_{1н} = 80$ мм;
- расстояние от выхлопных отверстий до дна забоя $l_{2н} = 60$ мм;

- расстояние от шламоборных отверстий до дна забоя $l_{3н} = 75$ мм;
- диаметр призабойного пакера $d_{пак.н} = 316$ мм.

Полученные результаты легли в основу конструкторской документации для изготовления нового погружного пневмоударника с обратной циркуляцией очистного агента. В ближайшее время планируется изготовление опытного образца и его испытание.

Таблица 3

Расчет параметров циркуляционной системы пневмоударника с обратной циркуляцией очистного агента в типоразмере 325 мм

Определяемая величина	Формула	Результат
Расстояние от призабойного пакера до дна забоя $l_{1н}$, мм	$l_{1н} = d_{скв} (0,1-0,25)$	33–81
Расстояние от выхлопных отверстий до дна забоя $l_{2н}$, мм	$l_{2н} = d_{скв} (0,13-0,25)$	42–81
Расстояние от шламоборных отверстий до дна забоя $l_{3н}$, мм	$l_{3н} = d_{скв} (0,22-0,25)$	72–81
Диаметр призабойного пакера $d_{пак.н}$, мм	$D_{пак.н} = d_{скв} (0,97-0,98)$	314–319

Заключение

Разработанная методика расчета позволяет определить основные параметры погружной ударной машины с обратной циркуляцией очистного агента и породоразрушающего инструмента обеспечивающие максимальную эффективность выноса выбуренной породы через центральный шламотранспортный канал и повысить производительность бурения в целом. Данная методика может использоваться инженерами-конструкторами при создании новых образцов буровой техники.

Благодарности

Авторы выражают признательность коллегам из лаборатории бурения и технологических импульсных машин за помощь при выполнении исследований и обсуждении результатов.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090003-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Repin A.A., Smolyanitsky B.N., Alekseev S.E., Popelyukh A.I., Timonin V.V., Karpov V. N. Downhole high-pressure air hammers for open pit mining. Journal of Mining Science. 2014. Vol 50. № 5. -p. 929–937. DOI: 10.1134/S1062739114050123.

2. Primychkin A.Yu., Kondratenko A.S., Timonin V.V. Determination of variables for air distribution system with elastic valve for down-the-hole pneumatic hammer. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Сер: "All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85th Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya" 2017. с. 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/53/1/012025.
3. Тимонин В. В., Алексеев С. Е., Кокоулин Д. И., Кубанычбек Б. Исследование процесса воздухораспределения для бурения дегазационных скважин // ФПВГН. – 2017. – Т. 1. – № 3. – С. 154–159.
4. Тимонин В. В., Алексеев С. Е., Карпов В. Н., Черниенков Е. М. Влияние энергетических параметров погружного пневмоударника на технико-экономические показатели бурения скважин с одновременной обсадкой // ФТПРПИ. – 2018. – № 1. – С. 61–70.
5. Petreev A.M., Primychkin A.Y. Influence of air distribution system on energy efficiency of pneumatic percussion unit of circular impact machine. Journal of Mining Science. 2015. Vol 51. № 3. -р. 562-567. DOI: 10.1134/S1062739115030187
6. Трубецкой, К. Н. Горные науки, освоение и сохранение недр Земли / К. Н. Трубецкой. – М. : Изд. Академии горных наук, 1997.
7. Lipin A.A., Kharlamov Y.P., Timonin V.V. Circulation system of a pneumatic drill with central drilling mud removal // Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49. № 2. – р. 248–253. DOI: 10.1134/S1062739149020068
8. Timonin V.V., Kondratenko A.S. Process and measuring equipment transport in uncased boreholes // Journal of Mining Science. 2015. Vol 51. № 5. – р. 1056–1061. DOI: 10.1134/S1062739115040284
9. Сыкчин М. Е. Создание кольцевого геологоразведочного пневмоударника со встроенным эжекторным устройством : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1993.
10. Смоляницкий Б. Н. Погружные пневмоударники для бурения скважин с центральным шланготранспортом / Б.Н.Смоляницкий, А.А. Липин // Сб. докл. Международного горного конгресса (2008 г., Польша).
11. Официальный сайт компании NUMA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.numahammers.com>.
12. Официальный сайт компании Atlas Copco [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atlascopco.ru>.
13. Погружные пневмоударники Secoroc QLX5 инструкция по эксплуатации / Перевод на русский язык. Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, Sweden. – 2015. – 34 с.
14. Technical specification DHD hammers / Atlas Copco Secoroc AB. Update, February, – 2005. 4 p.
15. Atlas Sopco Rock Drilling Tools. Secoroc Down-the-hole equipment: Operators instruction and spare parts list down-the-hole hammers/Atlas Copco Secoroc AB, Fagestra, Sweden, 2002. – 23 p.
16. Официальный сайт компании Sandvik [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com>.
17. Hungerford F., Ren T., and Aziz N. Evolution and application of in-seam drilling for gas drainage, International Journal of Mining Science and Technology, 2013, Vol. 23.
18. Суднишников, Б.В. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия / Б.В. Суднишников, Н.Н. Есин, К.К. Тупицин // Новосибирск: «Наука» Сибирское отделение, 1985.
19. Патент РФ на ПМ № 111182. Стенд для исследования бурового снаряда с обратной циркуляцией очистного агента / Ю. П. Харламов, Н. Н. Заболоцкая // Опубл. в БИ – 2011. – № 34.
20. Патент РФ № 2463432. Снаряд буровой с обратной циркуляцией шлама / А. А. Липин, Н. Н. Заболоцкая, Ю. Харламов // Опубл. в БИ – 2012. – № 28.

REFERENCES

1. Repin A.A., Smolyanitsky B.N., Alekseev S.E. Popelyukh A.I., Timonin V.V., Karpov V.N. (2014) Downhole high-pressure air hammers for open pit mining. *Journal of Mining Science*. Vol 50. № 5. -p. 929-937. DOI: 10.1134/S1062739114050123.
2. Primychkin A.Yu., Kondratenko A.S., Timonin V.V.(2017) Determination of variables for air distribution system with elastic valve for down-the-hole pneumatic hammer. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Cep: "All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85th Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya" c. 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/53/1/012025.
3. Timonin V.V., Alekseev S.E., Kokoullin D.I., Kubanychbek B. (2017) Issledovanie processa vozdukhoraspredeleniya degazacionnykh skvazhin [Investigation of the air distribution process for drilling degassing wells] *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk – Fundamental problems of formation of a technogenic geosfera. Engineering science*. Novosibirsk, N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Vol 3, 324 [in Russian]. Vol.1. -№3. – p. 154-159.
4. Timonin V.V., Alekseev S.E., Karpov V.N., Chernienkov E.M. (2018). Vliyanie energeticheskikh parametrov pogruzhnogo pnevmoudarnika na tekhniko-ehkonomicheskie pokazateli bureniya skvazhin s odnovremennoy obsadkoj [Influence of power parameters of the submersible pneumatic impact tool on technical and economic indicators of well-drilling with a casing]. *Fiziko-tekhnicheskie problem razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, [in Russian]. № 1, p. 61-70.
5. Petreev A.M., Primychkin A.Y. (2015) Influence of air distribution system on energy efficiency of pneumatic percussion unit of circular impact machine. *Journal of Mining Science*. Vol 51. № 3. -p. 562-567. DOI: 10.1134/S1062739115030187.
6. Trubetskoy K.N. (1997) Gornyenauki, osvoenie i sohranenie nedr Zemli. [Mining science, development and conservation of the earth], Moscow, Ed. Academy of mining Sciences [in Russian].
7. Lipin A.A., Kharlamov Y.P., Timonin V.V.(2013) Circulation system of a pneumatic drill with central drilling mud removal. *Journal of Mining Science*. Vol 49. № 2. – p. 248–253. DOI: 10.1134/S1062739149020068.
8. Timonin V.V., Kondratenko A.S. (2015) Process and measuring equipment transport in uncased boreholes. *Journal of Mining Science*. Vol 51. № 5. – p. 1056–1061. DOI: 10.1134/S1062739115040284.
9. Sykchin M.E (1993). Sozdanie kolcevogo geologorazvedochnogo pnevmoudarnika so vstroennym ezhektornym ustroystvom [Creation of an annular geological prospecting airstrike with built-in ejector device] PhD dissertation, Novosibirsk [in Russian].
10. Smolyanitskiy B.N., Lipin A.A. (2008) Pogruzhnye pnevmoudarniki dlya bureniya s centralnym shlamotransportom [Submersible air hammers for drilling of wells with Central transport sludge] A collection of reports of the International mining Congress. Poland.
11. NUMA official website: <http://www.numahammers.com>.
12. Atlas Copco official website: <http://www.atlascopco.ru>
13. Airhammers Secoroc QLX5. Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, Sweden. – 2015. – 34 p.
14. Technical specification DHD hammers / Atlas Copco Secoroc AB. Update, February, – 2005. 4 p.
15. Atlas Sopco Rock Drilling Tools. Secoroc Down-the-hole equipment: Operators instruction and spare parts list down-the-hole hammers/Atlas Copco Secoroc AB, Fagersta, Sweden, 2002. – 23 p.
16. Sandvik official website: <https://www.sandvik.coromant.com>.
17. Hungerford F., Ren T., and Aziz N. (2013) Evolution and application of in-seam drilling for gas drainage, *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 23.

18. Sudnishnikov B.V., Esin N.N., Tupitsyn K.K. (1985) Issledovanie I konstruirovaniye pnevmaticheskikh mashin udarnogo deistviya [Research and design of pneumatic impact machines]. Novosibirsk «Science» [in Russian].

19. Kharlamov Y.P., Zabolotskaya N.N (2011). Patent RF No 111182. Novosibirsk: IP Russian Federation.

20. Lipin A.A., Kharlamov Y.P., Zabolotskaya N.N. (2012). Patent RF No 111182. Novosibirsk: IP Russian Federation.

© Ю. П. Харламов, А. Ю. Примычкин, 2018

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ РЕГРЕССИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ И МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ СЛАНЦЕВЫХ ПОРОД ОТ ВЕЛИЧИНЫ БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ И УГЛА НАПЛАСТОВАНИЯ

Павел Александрович Цой

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Ольга Михайловна Усольцева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат физико-математических наук, зав. ЦКП ГГГИ СО РАН, тел. (383)335-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Владимир Николаевич Семенов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, главный специалист, тел. (383)335-96-41, e-mail: sem52@autorambler.ru

В процессе геоинженерных изысканий возникают задачи по оценке напряженно-деформированного состояния отдельных природных и искусственных объектов, находящихся в составе массивов горных пород. Структурно такие объекты могут представлять собой слоистые геосреды, где каждый слой имеет свои определенные геометрические размеры и физико-механические характеристики. В качестве одного из показательных примеров таких по структуре пород можно указать сланцы, которые относятся к складчатому типу пород. На основе экспериментальных данных по механическому поведению сланцев (кварцитового, хлоритового, кварцево-сланцевого, биотитового) построены множественные регрессионные соотношения, которые позволяют оценивать величины предела прочности на сжатие и модуля деформации сланцевых пород по уровню бокового давления и угла напластования. Полученные уравнения регрессии были двух видов: линейными и показательными. Для каждого соотношения был определен коэффициент корреляции, F-статистика Фишера и также ее величина при уровне значимости 0,05.

Ключевые слова: сланцевые породы, экспериментальные данные, объемное сжатие по схеме Кармана, предел прочности на сжатие, модуль деформации, угол напластования, множественная регрессия.

DETERMINATION OF MULTIPLE REGRESSION DEPENDENCE OF ULTIMATE COMPRESSIVE STRENGTH AND DEFORMATION MODULUS OF SHISTS ON LATERAL PRESSURE AND BEDDING ANGLE

Pavel A. Tsoi

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)335-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Olga M. Usol'tseva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Head of the Shared Use Center for Geomechanical, Geophysical and Geodynamic Measurements SB RAS, phone: (383)335-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

In the process of geoenvironmental research the arising problems are related to the estimation of the stress-strain state of individual natural and artificial objects that are parts of rock mass. The objects can exist as layered geo-environments, where each layer has its own specific geometric dimensions and physico-mechanical characteristics. The examples of such rock structures are the shists belonging to the folded type of rocks. On the basis of experimental data on the mechanical behavior of shists (quartzite, chlorite, quartz-mica, biotite) multiple regression relationships have been constructed. The relationships provide the opportunity to estimate the values of ultimate compressive strength and deformation modulus according to the level of lateral pressure and the bedding angle. There have been two types of the obtained regression equations – linear and exponential. The correlation coefficient, Fisher's F-statistics and its value at the 0.05 significance level have been determined for each relationship.

Key words: shist rock, experimental data, triaxial compression by Karman scheme, ultimate compressive strength, deformation modulus, bedding angle, multiple regression.

Введение

Исследования механических свойств слоистых по структуре геоматериалов широко представлены в современных публикациях зарубежных и отечественных ученых. Так, в работах [1–3] приведены результаты экспериментальных исследований пород сланца и гнейса по определению зависимости предела прочности при одноосном сжатии, модуля деформации, предела прочности при косвенном растяжении (Бразильский тест) от угла напластования. Результаты исследований слоистых пород по методу Бразильского теста можно найти также в работах [4–6]. Исследования трансверсально изотропных пород проводились в условиях прямого [7] и наклонного сдвига [8] с целью определения зависимостей сдвигового предела прочности от угла напластования, построения соответствующих паспортов прочности. Что касается условий трехосного сжатия (схема Кармана), то экспериментальное изучение механического поведения сланцевых пород можно встретить в работе [9]. Также исследованы вопросы, связанные с измерением степени анизотропии в условиях трехосного нагружения [10, 11] и построением модифицированного критерия разрушения [12].

Ранее авторами в этом направлении были проведен ряд экспериментальных и теоретических исследований по изучению физико-механических свойств слоистых искусственных и природных геоматериалов в зависимости от угла напластования [13–19].

Данная работа опирается на экспериментальные данные, полученные в рамках совместного исследования канадских и индийских ученых в области механики горных пород [20]. В их статье приводятся результаты, которые отражают зависимость предела прочности и модуля деформации от угла напластования и величины бокового давления на образцы четырех видов сланцев. Для полноты картины результаты этого исследования были дополнены множе-

ственными уравнениями регрессии, связывающими предел прочности на сжатие и модуль деформации с величиной угла напластования и уровнем бокового давления.

Методы и материалы

Были использованы экспериментальные данные по механическим свойствам образцов слоистых пород (сланцы биотитовые, хлоритовые, кварцевослюдяные, кварцитовые) в условиях объемного сжатия. Авторами данной статьи графические данные были переработаны в табличные. Так, в табл. с 1 по 4 представлены данные по пределам прочности σ_c в зависимости от угла напластования β и от величины фиксированного бокового давления на стенку цилиндрического образца σ_3 .

В табл. 5–8 приведены данные по модулям деформации E в зависимости от угла напластования β и от величины фиксированного бокового давления на стенку цилиндрического образца σ_3 .

Таблица 1

Данные по пределам прочности для образцов биотитового сланца

$\beta, ^\circ$	Предел прочности σ_c , МПа				
	при $\sigma_3 = 5$ МПа	при $\sigma_3 = 15$ МПа	при $\sigma_3 = 35$ МПа	при $\sigma_3 = 50$ МПа	при $\sigma_3 = 100$ МПа
0	80,5	116,98	172,33	237,74	313,21
30	49,06	106,92	157,23	200	284,28
45	37,74	87,42	163,52	205,66	294,97
60	72,33	117,61	183,65	232,08	296,86
75	88,05	141,51	217,61	238,99	301,26
90	100	147,17	221,38	266,67	319,5

Таблица 2

Данные по пределам прочности для образцов хлоритового сланца

$\beta, ^\circ$	Предел прочности σ_c , МПа				
	при $\sigma_3 = 5$ МПа	при $\sigma_3 = 15$ МПа	при $\sigma_3 = 35$ МПа	при $\sigma_3 = 50$ МПа	при $\sigma_3 = 100$ МПа
0	123,13	180,22	314,55	348,13	472,01
15	67,16	145,9	266,79	304,85	395,15
30	64,18	121,27	222,76	255,6	370,52
45	81,34	132,46	184,7	247,39	333,96
60	94,78	154,1	217,54	260,07	342,16
75	133,58	204,85	266,8	336,19	445,9
90	177,61	237,67	321,27	365,3	484,7

Таблица 3

Данные по пределам прочности для образцов кварцево-сланцевого сланца

$\beta, ^\circ$	Предел прочности σ_c , МПа				
	при $\sigma_3 = 5$ МПа	при $\sigma_3 = 15$ МПа	при $\sigma_3 = 35$ МПа	при $\sigma_3 = 50$ МПа	при $\sigma_3 = 100$ МПа
0	113,11	171,04	230,79	296,64	411,89
15	92,99	137,5	213,72	293,6	391,77
30	74,7	125,3	203,35	236,28	345,43
45	80,79	99,09	191,16	224,7	351,52
60	90,55	118,6	219,82	253,35	363,72
75	103,35	128,96	226,52	294,21	411,89
90	145,43	183,84	252,74	312,5	416,16

Таблица 4

Данные по пределам прочности для образцов кварцитового сланца

$\beta, ^\circ$	Предел прочности σ_c , МПа				
	при $\sigma_3 = 5$ МПа	при $\sigma_3 = 15$ МПа	при $\sigma_3 = 35$ МПа	при $\sigma_3 = 50$ МПа	при $\sigma_3 = 100$ МПа
0	227,99	303,46	353,77	403,46	510,38
15	203,46	262,58	305,97	348,11	444,34
30	143,71	192,14	251,89	282,7	417,3
45	182,7	217,3	263,21	297,8	377,04
60	196,54	260,69	312,26	341,2	419,81
90	299,06	368,87	427,99	441,2	524,21

Таблица 5

Данные по модулям деформации для образцов биотитового сланца

$\beta, ^\circ$	Модуль деформации E , ГПа				
	при $\sigma_3 = 5$ МПа	при $\sigma_3 = 15$ МПа	при $\sigma_3 = 35$ МПа	при $\sigma_3 = 50$ МПа	при $\sigma_3 = 100$ МПа
0	11,88	17,03	22,33	28,02	30
30	7,48	13,76	20,1	25	31,14
45	8,86	13,27	21,14	25	31,14
60	8,86	13,17	22,33	24,95	25,15
75	8,51	15,2	23,28	26,14	22,08
90	10,35	15,25	22,37	27,08	22,13

Таблица 6

Данные по модулям деформации для образцов хлоритового сланца

$\beta, ^\circ$	Модуль деформации E , ГПа				
	при $\sigma_3 = 5$ МПа	при $\sigma_3 = 15$ МПа	при $\sigma_3 = 35$ МПа	при $\sigma_3 = 50$ МПа	при $\sigma_3 = 100$ МПа
0	17,88	23,97	26,28	27,88	36,03
15	6,79	13,72	22,88	24,87	30,13
30	7,31	8,14	11,86	12,82	18,97
45	8,85	11,09	12,76	17,63	22,95
60	12,69	13,65	14,42	20	24,23
75	16,28	20,13	22,31	24,29	29,74
90	15,45	19,17	20,06	25,51	31,54

Таблица 7

Данные по модулям деформации для образцов кварцево-сланцевого сланца

$\beta, ^\circ$	Модуль деформации E , ГПа				
	при $\sigma_3 = 5$ МПа	при $\sigma_3 = 15$ МПа	при $\sigma_3 = 35$ МПа	при $\sigma_3 = 50$ МПа	при $\sigma_3 = 100$ МПа
0	9,81	16,36	19,68	32,73	34,94
15	7,66	12,86	17,86	28,57	30,71
30	5,39	8,83	17,21	18,25	24,22
45	6,04	6,04	15,06	21,04	22,14
60	5,71	7,47	17,08	22,21	26,23
75	5,13	6,1	13,18	23,25	27,21
90	3,57	5,26	11,56	25,91	29,42

Таблица 8

Данные по модулям деформации для образцов кварцитового сланца

$\beta, ^\circ$	Модуль деформации E , ГПа				
	при $\sigma_3 = 5$ МПа	при $\sigma_3 = 15$ МПа	при $\sigma_3 = 35$ МПа	при $\sigma_3 = 50$ МПа	при $\sigma_3 = 100$ МПа
0	31,56	33,03	35,05	35,78	41,19
15	18,53	22,75	25,05	27,52	39,36
30	14,77	19,54	22,75	24,59	25,5
45	24,95	29,08	29,72	31,93	34,04
60	25,23	32,48	32,94	34,4	40,64
90	28,17	30,46	36,7	42,75	48,9

Предполагалось, что уравнения множественной регрессии (в данном случае двухфакторной) содержат два фактора (β и σ_3) от которых должны зависеть σ_c и E . Соотношения регрессии были найдены в виде линейной зависимости

$$\sigma_c = a \cdot \sigma_3 + b \cdot \beta + c$$

и в виде показательной зависимости

$$\sigma_c = k \cdot \sigma_3^m \cdot \beta^d,$$

где a, b, c, k, m, d – коэффициенты, подлежащие определению.

Результаты

По указанным данным с помощью функции ЛИНЕЙН (встроенная функция MS Excel) были построены следующие уравнения множественной регрессии (линейные и показательные, см. табл. 9 и 10).

Таблица 9

Уравнения множественной регрессии для оценки предела прочности σ_c .

Порода, сланец	Соотношения множественной регрессии		R	F	$F_{0,05 \%}$
	Линейные	Показательные			
Биотитовый	$\sigma_c = 2,35 \cdot \sigma_3 + 0,38 \cdot \beta + 66,48$	$\sigma_c = 29,81 \cdot \sigma_3^{0,51} \cdot \beta^{-0,0002}$	0,95; 0,94	117,21; 105,26	3,35
Хлоритовый	$\sigma_c = 3,05 \cdot \sigma_3 + 0,43 \cdot \beta + 103,73$	$\sigma_c = 45,33 \cdot \sigma_3^{0,47} \cdot \beta^{-0,0008}$	0,9; 0,92	66,75; 85,12	3,29
Кварцево-слюдяной	$\sigma_c = 2,99 \cdot \sigma_3 + 0,19 \cdot \beta + 92,11$	$\sigma_c = 42,03 \cdot \sigma_3^{0,47} \cdot \beta^{-0,0006}$	0,96; 0,95	177,67; 158,57	3,29
Кварцитовый	$\sigma_c = 2,38 \cdot \sigma_3 + 0,63 \cdot \beta + 196,73$	$\sigma_c = 129,3 \cdot \sigma_3^{0,25} \cdot \beta^{-0,0007}$	0,84; 0,84	31,33; 32,26	3,35

Таблица 10

Уравнения множественной регрессии для оценки модуля деформации E

Порода, сланец	Соотношения множественной регрессии		R	F	$F_{0,05 \%}$
	Линейные	Показательные			
Биотитовый	$E = 0,18 \cdot \sigma_3 - 0,03 \cdot \beta + 13,91$	$E = 5,1 \cdot \sigma_3^{0,38} \cdot \beta^{-0,0006}$	0,83; 0,95	29,96; 137,23	3,35
Хлоритовый	$E = 0,16 \cdot \sigma_3 - 0,003 \cdot \beta + 12,94$	$E = 6,61 \cdot \sigma_3^{0,28} \cdot \beta^{-0,0002}$	0,72; 0,78	16,81; 25,59	3,29
Кварцево-слюдяной	$E = 0,24 \cdot \sigma_3 - 0,07 \cdot \beta + 10,36$	$E = 2,07 \cdot \sigma_3^{0,56} \cdot \beta^{-0,0002}$	0,89; 0,93	62,93; 102,68	3,29
Кварцитовый	$E = 0,14 \cdot \sigma_3 + 0,07 \cdot \beta + 21,89$	$E = 17,31 \cdot \sigma_3^{0,16} \cdot \beta^{-0,0009}$	0,69; 0,68	12,13; 11,63	3,35

В табл. 9 и 10 R – коэффициент корреляции, F – статистика Фишера, $F_{0,05\%}$ – величина статистики Фишера при уровне значимости 0,05. Для столбцов R и F знаком препинания «;» разделены значения для линейной и показательной регрессии.

Обсуждение

Замечено, что для оценки σ_c (табл. 9) среднее значение коэффициента корреляции R равно 0,91, среднее значение F равно 96,77, что свидетельствует о довольно тесной связи между пределом прочности на сжатие и факторами β и σ_3 и убедительной значимости построенных моделей. Что же касается регрессионных соотношений для оценки E (табл. 10), то здесь осредненное значение R равно 0,8, средняя величина F равна 49,87, т. е. здесь наблюдается менее тесная связь между рассматриваемыми величинами и меньший уровень значимости моделей. Во всех случаях статистика F превысила значение $F_{0,05\%}$, поэтому все модели табл. 9, 10 являются значимыми. Также можно отметить, что показательные регрессионные модели более значимы, чем линейные в случае оценки E для биотитового, хлоритового и кварцево-сланцевого сланцев (см. табл. 10). В случае оценки σ_c для биотитового и кварцево-сланцевого сланцев, линейные регрессионные модели оказались более значимы, чем показательные (табл. 9).

Заключение

Таким образом, на основе известных экспериментальных данных получены соотношения множественной (двухфакторной) регрессии, позволяющие оценивать предел прочности на сжатие и модуль деформации сланцевых пород по известному боковому давлению и углу напластования. С помощью значений коэффициента корреляции, показана теснота связи между оцениваемыми величинами и задействованными факторами. Статистикой Фишера произведена оценка значимости каждой из моделей, а также показано для какого вида сланцев более значима линейная регрессия, а для какого более значима множественная регрессия в показательном виде.

Работа выполнена в ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН в рамках проекта ФНИ № гос. рег. АААА-А17-117121140065-7.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cho J.-W., Kim H., Jeon S., Min K.-B. Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2012. – Vol. 50. – С. 158–169.
2. Gholami R., Rasouli V. Mechanical and Elastic Properties of Transversely Isotropic Slate // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2014. – Vol. 47(5). – С. 1763–1773.

3. Xiao-Ping Zhang, Louis Ngai Yuen Wong, Si-Jing Wang, Geng-You Han. Engineering properties of quartz mica schist // *Engineering Geology*. – 2011. – Vol. 121(3-4). – C. 135–149.
4. Vervoort A., Min K.-B., Konietzky H., Cho J.-W., Dehecker B., et al. Failure of transversely isotropic rock under Brazilian test conditions // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2014. – Vol. 70. – C. 343–352.
5. Tan X., Konietzky H., Frühwirth T., Dinh Quoc Dan. Brazilian Tests on Transversely Isotropic Rocks: Laboratory Testing and Numerical Simulations // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Vol. 48(4). – C. 1341–1351.
6. Xu G., He C., Chen Z., Su A. Transverse Isotropy of Phyllite Under Brazilian Tests: Laboratory Testing and Numerical Simulations // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2017. – Vol. 51(4). – C. 1111–1135.
7. Heng S., Guo Y., Yang C., et al. Experimental and theoretical study of the anisotropic properties of shale // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2015. – Vol. 74. – C. 58–68.
8. Ghazvinian A., Geranmayeh Vaneghi R., Hadei M.R., Azinfar M.J. Shear behavior of inherently anisotropic rocks // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2013. – Vol. 61. – C. 96–110.
9. Hen Y.-F., Wei K., Liu W. et al. Experimental Characterization and Micromechanical Modelling of Anisotropic Slates // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2016. – Vol. 49(9). – C. 3541–3557.
10. Ghazvinian A., Hadei M.R. Effect of discontinuity orientation and confinement on the strength of jointed anisotropic rocks // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2012. – Vol. 55. – C. 117–124.
11. Mohamed A. Ismael, Hassan F. Imam, Yasser El-Shayeb. A simplified approach to directly consider intact rock anisotropy in Hoek–Brown failure criterion // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2014. – Vol. 6(5). – C. 486–492.
12. Omid Saeidi, Vamegh Rasouli, Rashid Geranmayeh Vaneghi et al. A modified failure criterion for transversely isotropic rocks // *Geoscience Frontiers*. – 2014. – Vol. 5(2). – C. 215–225.
13. Tsoi P. A., Usol'tseva O. M., Semenov V. N. Effect of structure of transversely isotropic artificial geomaterials on strength and deformation characteristics under uniaxial compression. Theory and experiment. // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk : NSTU – 2014– Pt. 1. – C. 109–111.
14. Vostrikov V., Usol'tseva O., Tsoi P., Semenov V. Stagerwise deformation of rocks and character of change in parameters of microseismic signal // 16 International multidisciplinary scientific geoconference (SGEM 2016) : proc. of conf., Bulgaria, Albena, 30 Jun–6 Jul., – 2016 – Vol. 2. – C. 811–818.
15. Usol'tseva O. M., Tsoi P. A., Semenov V. N. Effects of structure on deformation and strength characteristics of transversely isotropic man-made geomaterials // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – Vol. 53. – 5 c.
16. Vostrikov V. I., Usol'tseva O. M., Tsoi P. A., Semenov V. N. Evolution of microseismicity parameters depending on geomaterial deformation stages // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – Vol. 53. – 4 C.
17. Usol'tseva O., Tsoi P., Semenov V. The influence of anisotropy angle on the strength and deformation properties of artificial geomaterials and rocks // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 191. – C. 512–519.
18. Usol'tseva O., Vostrikov V., Tsoi P., Semenov V. Integrated research into features of physical fields in model geomedium with discontinuity generated under external stresses // 17 International multidisciplinary scientific geoconference (SGEM 2017) : proc. of conf., Bulgaria, Albena, 29 Jun–5 Jul., – 2017– Vol. 17(13). – C. 461–469.
19. Коврижных А. М., Усольцева О. М., Коврижных С. А., Цой П. А., Семенов В. Н. Исследование прочности анизотропных горных пород в условиях осевого сжатия с боковым

давлением // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 5. – С. 37–43.

20. Nasser M.H.B., Rao K.S., Ramamurthy T. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2003. – Vol. 40(1). – С. 3–23.

REFERENCES

1. Cho J.-W., Kim H., Jeon S., Min K.-B. (2012). Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 50, 158-169. doi: 10.1016/j.ijrmms.2011.12.004.
2. Gholami R., Rasouli V. (2014). Mechanical and Elastic Properties of Transversely Isotropic Slate. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(5), 1763-1773. doi: 10.1007/s00603-013-0488-2.
3. Xiao-Ping Zhang, Louis Ngai Yuen Wong, Si-Jing Wang, Geng-You Han (2011). Engineering properties of quartz mica schist. *Engineering Geology*, 121, 0013-7952. doi: 10.1016/j.enggeo.2011.04.020.
4. Vervoort A., Min K.-B., Konietzky H., Cho J.-W., Dehecker B., et al. (2014). Failure of transversely isotropic rock under Brazilian test conditions. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 70, 343-352. doi: 10.1016/j.ijrmms.2014.04.006.
5. Tan X., Konietzky H., Frühwirth T., Dinh Quoc Dan. (2015). Brazilian Tests on Transversely Isotropic Rocks: Laboratory Testing and Numerical Simulations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(4), 1341-1351. doi: 10.1007/s00603-014-0629-2.
6. Xu G., He C., Chen Z., Su A. (2017). Transverse Isotropy of Phyllite Under Brazilian Tests: Laboratory Testing and Numerical Simulations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(4), 1111-1135. doi: 10.1007/s00603-017-1393-x.
7. Heng S., Guo Y., Yang C., et al. (2015). Experimental and theoretical study of the anisotropic properties of shale. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 74, 58-68. doi: 10.1016/j.ijrmms.2015.01.003.
8. Ghazvinian A., Geranmayeh Vaneghi R., Hadei M.R., Azinfar M.J. (2013). Shear behavior of inherently anisotropic rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 61, 96-110. doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.01.009.
9. Hen Y.-F., Wei K., Liu W. et al. (2016). Experimental Characterization and Micromechanical Modelling of Anisotropic Slates. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(9), 3541-3557. doi: 10.1007/s00603-016-1009-x.
10. Ghazvinian A., Hadei M.R. (2012). Effect of discontinuity orientation and confinement on the strength of jointed anisotropic rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 55, 117-124. doi: 10.1016/j.ijrmms.2012.06.008.
11. Mohamed A. Ismael, Hassan F. Imam, Yasser El-Shayeb (2014). A simplified approach to directly consider intact rock anisotropy in Hoek–Brown failure criterion. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(5), 486-492. doi: 10.1016/j.jrmge.2014.06.003.
12. Omid Saeidi, Vamegh Rasouli, Rashid Geranmayeh Vaneghi et al. (2014). A modified failure criterion for transversely isotropic rocks. *Geoscience Frontiers*, 5(2), 215-225. doi: 10.1016/j.gsf.2013.05.005.
13. Tsoi P. A., Usol'tseva O. M., Semenov V. (2016) N. Effect of structure of transversely isotropic artificial geomaterials on strength and deformation characteristics under uniaxial compression. Theory and experiment. *11 International forum on strategic technology (IFOST 2016)* : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016, 109-111, Pt. 1.
14. Vostrikov V., Usol'tseva O., Tsoi P., Semenov V. (2016) Stagewise deformation of rocks and character of change in parameters of microseismic signal. *16 International multidisciplinary scientific geoconference (SGEM 2016)* : proc. of conf., Bulgaria, Albena, 30 Jun–6 Jul, 2016, 811-818, Book 1, vol. 2, doi: 10.5593/SGEM2016/B12/S03.104.

15. Usol'tseva O. M., Tsoi P. A., Semenov V. N. (2017) Effects of structure on deformation and strength characteristics of transversely isotropic man-made geomaterials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 5 p., Vol. 53, doi: 10.1088/1755-1315/53/1/012009.
16. Vostrikov V. I., Usol'tseva O. M., Tsoi P. A., Semenov V. N. (2017) Evolution of microseismicity parameters depending on geomaterial deformation stages. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 4 p., Vol. 53, doi: 10.1088/1755-1315/53/1/012008.
17. Usol'tseva O., Tsoi P., Semenov V. (2017) The influence of anisotropy angle on the strength and deformation properties of artificial geomaterials and rocks. *Procedia Engineering*, 512-519, Vol. 191, doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.211.
18. Usol'tseva O., Vostrikov V., Tsoi P., Semenov V. (2017) Integrated research into features of physical fields in model geomedium with discontinuity generated under external stresses. 17 *International multidisciplinary scientific geoconference (SGEM 2017)* : proc. of conf., Bulgaria, Albena, 29 Jun–5 Jul, 2017, 461-469, 17(13), doi: 10.5593/SGEM2017/13/S03.059.
19. Kovrizhnykh A. M., Usol'tseva O. M., Kovrizhnykh S.A., Tsoi P.A., Semenov V.N. (2017) Issledovanie prochnosti anizotropnykh gornyykh porod v usloviyakh oseвого szhatija s bokovym davleniem // *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 37-43, 5, [in Russian], doi: 10.15372/FTPRPI20170505.
20. Nasser M.H.B., Rao K.S., Ramamurthy T. (2003). Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40(1), 3-23. doi: 10.1016/S1365-1609(02)00103-X.

© П. А. Цой, О. М. Усольцева, В. Н. Семенов, 2018

ДЕФОРМАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ЕЕ АНАЛИЗ***Анвар Исмагилович Чанышев***

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52, зав. кафедрой математики и естественных наук, тел. (383) 335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Ильгизар Маратович Абдулин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник, тел. (383) 335-97-50, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

Строятся определяющие соотношения разрушения горных пород деформационного типа, связывающие полные напряжения с полными деформациями. Предполагается, что в процессе разрушения главные оси тензоров напряжений и деформаций совпадают (первоначально изотропная среда). Рассматривается собственный тензорный базис для металлов, включающий в себя шаровой тензор и девиатор. Данный базис не является собственным для горных пород. В результате поворота этого базиса в плоскости, проходящей через шаровой тензор и девиатор, достигается такое его положение, при котором повернутый базис становится собственным для горных пород. Этот факт проверяется с применением данных опытов Ставрогина А.Н. С использованием указанного представления разработаны определяющие соотношения разрушения горных пород при плоской деформации. Показывается, что система дифференциальных уравнений задачи гиперболического типа с четырьмя соотношениями на них, связывающими такие величины как среднее напряжение, максимальное касательное напряжение, угол, задающий главные оси тензора напряжений, угол поворота. Показывается, что граничные условия искомых функций определяются через заданные на границе вектор напряжений Коши, и вектор перемещений.

Ключевые слова: горные породы, разрушение, деформационная теория, паспортные зависимости, характеристики, соотношения на характеристиках, полные напряжения, полные деформации.

DEFORMATION THEORY OF ROCK DESTRUCTION AND ITS ANALYSIS***Anvar I. Chanyshev***

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Chief Researcher; Novosibirsk State University of Economics and Management, 52, Kamenskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Head of Mathematics and Natural Sciences Department, phone: (383)243-94-75, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Il'gizar M. Abdulin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Researcher, phone: (383)335 97 50, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

The article presents constructed defining relations of rock destruction of deformation type connecting the total stresses with total deformations. It is assumed that in the process of destruction the principal axes of stress and deformation tensors coincide (initially an isotropic medium). The authors consider a proper tensor basis for metals, which includes the spherical tensor and the devia-

tor. This basis is not proper for rocks. As a result of the rotation of this basis in the plane passing through the spherical tensor and the deviator, the basis is in the position in which the rotated basis becomes proper for the rocks. This fact is verified using A.N. Stavrogin experimental data. With the help of the data the defining relations of the rock destruction with plane deformation are developed. It is shown that the differential equations system of a problem of a hyperbolic type with four relations on them connects such quantities as the average voltage, the maximum shear stress, the angle specifying the principal axes of the stress tensor and the angle of rotation. It is shown that the boundary conditions of the sought functions are determined through the Cauchy stress vector and the displacement vector given at the boundary.

Key words: rocks, destruction, deformation theory, passport dependence, characteristics, relations on characteristics, total stress, total deformation.

Введение

В механике деформируемого твердого тела различаются теории, в которых связываются напряжения и деформации (теории деформационного типа), и теории, связывающие приращения напряжений с приращениями деформаций (теории типа пластического течения). Для описания разрушения горных пород возможно построение теорий как деформационного типа, так и теорий типа пластического течения. Вариант теории типа пластического течения предложен в [1]. Ниже рассматривается теория разрушения деформационного типа. Для наглядности здесь будет исследован лишь случай плоского деформированного состояния.

Деформационная теория разрушения для плоской деформации

Таким образом вводится прямоугольная декартова система координат $xOyz$, вдоль оси z предполагается, что деформация отсутствует ($\varepsilon_z = 0$), перемещение $u_z = 0$, другие смещения u и v зависят только от координат x, y [2]. Для того чтобы деформация ε_z была равной нулю, необходимо приложение вдоль оси z соответствующие нагрузки σ_z . Будем считать, что эта зависимость определяется из какой-то более общей модели деформирования и разрушения горных пород чем та, которая будет исследоваться ниже.

Для формулировки соотношений между напряжениями и деформациями используем двумерные аналоги тензоров напряжений и деформаций T_σ и T_ε :

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{pmatrix}, T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (2)$$

Рассмотрим тензорный базис

$$T_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, T_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, T_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Базис (3) является собственным для упругих деформаций металлов. Причем вдоль орта T_1 собственное число $2k = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)}$, вдоль ортов T_2 и T_3 эти числа равны $2\mu = \frac{E}{(1+\nu)}$ (корень характеристического уравнения кратный, имеет кратность 2). Базис (3) не является собственным для горных пород. Так, изменение объема, измеряемое величиной $\varepsilon_x + \varepsilon_y$, не пропорционально «гидростатическому» сжатию, измеряемому величиной $\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$. И, кроме того, объем зависит от приложения касательных напряжений. Далее вводятся единичные орты

$$T_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, D = T_2 \cos 2\theta + T_3 \sin 2\theta,$$

где $\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} = \operatorname{tg} 2(1, x)$, θ – угол между первым направлением для тензора T_σ и осью Ox . Предполагаем, что главные оси тензоров T_σ и T_ε совпадают, т. е.

$$\theta = \Omega, \text{ где } \operatorname{tg} 2\Omega = 2\varepsilon_{xy} / (\varepsilon_x - \varepsilon_y). \quad (4)$$

Далее следует поворот тензорного базиса T_1, D вокруг начала координат на некоторый угол φ_* , при котором вдоль нового базисного орта

$$T_m = T_1 \cos \varphi_* - D \sin \varphi_*$$

связь между проекциями тензоров T_σ, T_ε на этом направлении станет линейной (пропорциональной). Тогда вдоль орта

$$T_l = T_1 \sin \varphi_* + D \cos \varphi_*$$

связь между проекциями будет нелинейной, но не зависящей от положения тензоров T_σ, T_ε в данном тензорном пространстве, что подтверждается обработкой экспериментальных данных [3], проведенной в [4].

В итоге в упругости получаются следующие зависимости:

$$\begin{aligned}\Omega_m &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{\sqrt{2}} \cos \varphi_* - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\sqrt{2}} \sin \varphi_* = \\ &= \frac{1}{2k} S_m = \frac{1}{2k} \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sqrt{2}} \cos \varphi_* - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{2}} \sin \varphi_* \right],\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\Omega_l &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{\sqrt{2}} \sin \varphi_* + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\sqrt{2}} \cos \varphi_* = \\ &= \frac{1}{2\mu} S_l = \frac{1}{2\mu} \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sqrt{2}} \sin \varphi_* + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{2}} \cos \varphi_* \right],\end{aligned}\quad (6)$$

где характеристическая связь $\Omega_l = \frac{1}{2\mu} S_l$ отражает упругое состояние горной породы на рис. 1 при сдвигах.

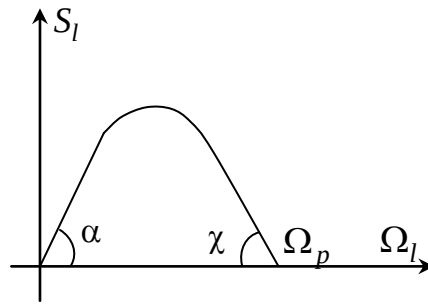


Рис. 1. Диаграмма изменения напряжения S_l с ростом деформации Ω_l .
Угол χ характеризует модуль спада на запредельной стадии деформирования горных пород

Ниже исследуется запредельное деформирование горных пород. Помимо зависимости (5) предполагается еще и выполненным соотношение:

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{S_l}{\Omega_p - \Omega_l} = 2\mu_*, \quad (7)$$

где Ω_p – предельная деформация на рис. 1, $2\mu_*$ – модуль спада на этом рисунке.

Из (7) следует, что

$$\Omega_l = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{\sqrt{2}} \sin \varphi_* + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\sqrt{2}} \cos \varphi_* = \Omega_p - \frac{S_l}{2\mu_*}. \quad (8)$$

Отметим, что в (5)–(8) $\sigma_1, \sigma_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ – главные напряжения и деформации соответственно.

С применением (5)–(8) получаем соотношения

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \Omega_p \sin \varphi_* + A\sigma - BT, \\ \Gamma = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \Omega_p \cos \varphi_* - B\sigma + CT, \end{cases} \quad (9)$$

где $A = \frac{\cos^2 \varphi_*}{2k} - \frac{\sin^2 \varphi_*}{2\mu_*}$, $B = \frac{\sin 2\varphi_*}{4} \left(\frac{1}{\mu_*} + \frac{1}{k} \right)$, $C = \frac{\sin^2 \varphi_*}{2k} - \frac{\cos^2 \varphi_*}{2\mu_*}$, σ, ε – средние напряжение и деформация, T, Γ – максимальное касательное напряжение и сдвиг так, что

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma + T \cos 2\theta, \quad \sigma_y = \sigma - T \cos 2\theta, \quad \tau_{xy} = T \sin 2\theta, \\ \varepsilon_x &= \varepsilon + \Gamma \cos 2\theta, \quad \varepsilon_y = \varepsilon - \Gamma \cos 2\theta, \quad \varepsilon_{xy} = \Gamma \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (10)$$

Характеристики и соотношения на них

Далее используются уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

и уравнения совместности деформаций, записанные в виде

$$\frac{\partial \varepsilon_x}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial w_z}{\partial x}, \quad \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial y}. \quad (12)$$

Подставляя в (11), (12) соотношения (10), (9), получаем в итоге систему четырех дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка для отыскания неизвестных функций $\sigma = \sigma(x, y)$, $T = T(x, y)$, $\theta = \theta(x, y)$, $w_z = w_z(x, y)$. Присоединяя к системе выражения полных дифференциалов искомых функций, определяем условия гиперболичности этой системы уравнений (эллиптическая, параболическая, гиперболическая система уравнений). Если обозначить $\eta = \frac{dy}{dx}$, то характер системы зависит от наличия вещественных корней характеристического уравнения

$$A_4 \eta^4 + A_3 \eta^3 + A_2 \eta^2 + A_1 \eta + A_0 = 0, \quad (13)$$

где коэффициенты A_4, A_3, A_2, A_1, A_0 зависят от многих параметров и, в частности, от угла θ , от коэффициентов системы уравнений (9).

При определении корней (9) будем исходить из следующего предположения: если у этого уравнения есть вещественные характеристики, то они должны быть симметричны относительно первого главного направления. Т.е., если сделать в (13) замену

$$\eta = \operatorname{tg}(\theta + \beta), \quad (14)$$

то относительно β должны получить биквадратное уравнение. Это легко проверяется при подстановке (14) в (13). В результате при обозначении

$$\lambda = \operatorname{tg}\beta \quad (15)$$

вместо (13) приходим к следующему биквадратному уравнению относительно угла β

$$B_4\lambda^4 + B_2\lambda^2 + B_0 = 0, \quad (16)$$

где

$$B_4 = a - b \sin 2\varphi_*, \quad B_2 = -2 \left[\frac{2\Gamma}{T} + b \cos 2\varphi_* \right], \quad B_0 = a + b \sin 2\varphi_*,$$

$$a = \frac{1}{2\mu_*} - \frac{1}{2k}, \quad b = \frac{1}{2\mu_*} + \frac{1}{2k}.$$

Корнями этого уравнения служат выражения

$$\lambda_{1,2,3,4} = \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{\frac{2\Gamma}{T} + b \cos 2\varphi_*}{a - b \sin 2\varphi_*} + \sqrt{\frac{a + b \sin 2\varphi_*}{a - b \sin 2\varphi_*}}} \pm$$

$$\pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{\frac{2\Gamma}{T} + b \cos 2\varphi_*}{a - b \sin 2\varphi_*} - \sqrt{\frac{a + b \sin 2\varphi_*}{a - b \sin 2\varphi_*}}}.$$

Легко видеть вещественность этих корней.

Таким образом получаются четыре вещественные характеристики. Запишем теперь соотношения на них. В результате имеем

$$\lambda \left[T(A + 2B + C)\lambda^2 + (A + 2B - C)T + 2\Gamma \right] d\sigma - 2\lambda(CT - \Gamma)dT +$$

$$+ 2T \left[BT(\lambda^2 + 1) + (CT - \Gamma)(\lambda^2 - 1) \right] d\theta - T(1 + \lambda^2)dw_z = 0$$

или с учетом (16) получаем

$$\left(\cos 2\beta + \frac{2B}{\Gamma - CT} \right) d\sigma + dT + \frac{2T}{\sin 2\beta} \left(\cos 2\beta + \frac{BT}{\Gamma - CT} \right) d\theta - \frac{T}{(\Gamma - CT) \sin 2\beta} dw_z = 0. \quad (17)$$

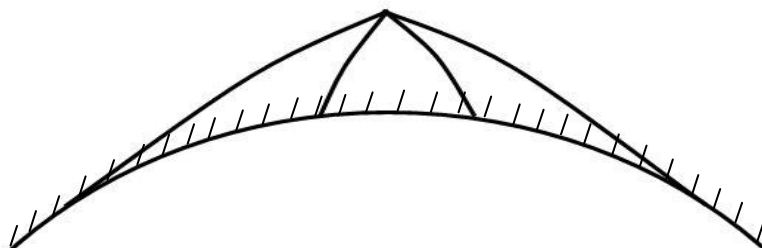


Рис. 2. Характеристические линии запредельной деформации, выходящие из границы области

Решение любой задачи при разрушении горных пород состоит в движении вдоль характеристик (13) так, как показано на рис. 2.

Отметим, что исследованию запредельного деформирования горных пород посвящено множество работ, например, [5–15]. В этих работах параметры разрушения, включая критерии прочности, не связываются с поведением материалов в упругости, в пластичности. Как правило, эти величины носят характер аппроксимаций экспериментальных данных. Мы же предполагаем, что существует связь между упругим поведением материалов и их неупругим. Эта связь осуществляется через одну и ту же (неизменную в процессе деформирования!) структуру среды. Единство структуры выражается в том, что собственные тензоры для всех этих состояний не меняются с ростом деформации. Поэтому предложенные нами соотношения не являются в чистом виде аппроксимациями результатов тех или иных опытов.

Заключение

1. Построена модель запредельной деформации горных пород деформационного типа.

2. Определены характеристики системы дифференциальных уравнений разрушения, соотношения на характеристиках.

3. Граничные значения искомых функций σ , T , θ , w_z находятся однозначно путем задания на границе одновременно и вектора напряжений Коши, и вектора смещений. Поскольку значения искомых функций находятся однозначно

и определитель системы уравнений (17) на характеристиках не обращается в ноль, то отсюда следует еще такой вывод: справедлива теорема единственности решения задач запредельного деформирования горных пород.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ (№ 18-05-00757 А).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Характеристики и соотношения на характеристиках на запредельной стадии деформирования горных пород // ФТПРПИ № 5 – 2008, С. 27–41.
2. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. – Москва: Гостехиздат, 1956. – 324 с.
3. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. С.-П.: Наука, 2001. 344 с.
4. Чанышев А. И. Построение паспортных зависимостей горных пород в допредельной и запредельной областях деформирования // ФТПРПИ. – 2002. – №5.
5. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983, 280 с.
6. Оловянный А. Г. Механика горных пород. Моделирование разрушений. – СПб.: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2012. – 280 с.
7. Tarasov B. G., Randolph M. F. Frictionless shear at great depth and other paradoxes of hard rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008. 45 (3), pp. 316–328.
8. Tarasov B. G. Fan-structure shear rupture mechanism as a source of shear rupture rockbursts // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 114(10), pp. 773–784.
9. Tarasov B. G., Guzev M. A., Sadovskii V. M., Cassidy, M. J. Modelling the mechanical structure of extreme shear ruptures with friction approaching zero generated in brittle materials // International Journal of Fracture 207(1), 2017. pp. 87–97.
10. Hoek E., Bieniawski Z. T. Brittle fracture propagation in rock under compression // International Journal of Fracture, Volume 26, Issue 4, December 1984, pp. 276–294.
11. Hoek E., Martin C. D. Fracture initiation and propagation in intact rock – A review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Volume 6, Issue 4, August 2014, pp. 287–300.
12. Rafiei Renani H., Martin C.D., Hoek E. Application of the Christensen Failure Criterion to Intact Rock // Geotechnical and Geological Engineering, Volume 34, Issue 1, 1 February 2016, P. 297–312.
13. Christensen R.M. Materials failure theory and applications, change is coming // Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME. Volume 139, Issue 4, 2017, 041005
14. Christensen R.M. Perspective on Materials Failure Theory and Applications // Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME. Volume 83, Issue 11, 1 November 2016, 111001.
15. Meng F., Zhou H., Wang Z., Zhang C., Li S., Zhang L., Kong, L. Characteristics of Asperity Damage and Its Influence on the Shear Behavior of Granite Joints // Rock Mechanics and Rock Engineering. Volume 51, Issue 2, 1 February 2018, pp. 429–449.

REFERENCES

1. Chanyshv, A.I., Abdulin, I.M. (2008) *Harakteristiki i sootnosheniya na harakteristikah na zapredel'noj stadii deformirovaniya gornyh porod* [Characteristics and ratios on the characteristics at the outermost stage of rock deformation], FTPRPI, 5. pp. 27–41. [in Russian].

2. Kachanov, L.M. (1956) *Osnovy teorii plastichnosti* [The fundamentals of the theory of plasticity]. – Gostekhizdat. [in Russian].
3. Stavrogin, A.N., Tarasov, B.G. (2001) *Eksperimental'naya fizika i mekhanika gornyh porod* [Experimental physics and mechanics of rocks] S.-P.: Nauka [in Russian].
4. Chanyshiev, A.I. (2002) *Postroenie pasportnyh zavisimostej gornyh porod v dopredel'noj i zapredel'noj oblasti deformatsii* [Construction of passport dependencies of rocks in the near and beyond regions of deformation], FTPRPI, 5. [in Russian].
5. Petukhov, I.M. & Linkov, A.M. (1983). *Mekhanika gornykh udarov i vybrosov* [Mechanics of mountain impacts and emissions]. Moscow: Nedra [in Russian].
6. Olovyannyj, A.G. (2012) *Mekhanika gornyh porod. Modelirovanie razrushenij*. [Mechanics of rocks. Modeling of destructions] – SPb.: ООО «Izdatel'sko-poligraficheskaya kompaniya «KOSTA. [in Russian].
7. Tarasov, B.G., Randolph, M.F. (2008) *Frictionless shear at great depth and other paradoxes of hard rocks* // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45 (3), pp. 316–328.
8. Tarasov, B.G. (2014) *Fan-structure shear rupture mechanism as a source of shear rupture rockbursts*. // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 114(10), pp. 773–784.
9. Tarasov, B.G., Guzev, M.A., Sadovskii, V.M., Cassidy, M.J. (2017) *Modelling the mechanical structure of extreme shear ruptures with friction approaching zero generated in brittle materials* // International Journal of Fracture 207(1), pp. 87–97.
10. Hoek, E., Bieniawski, Z.T. (1984) *Brittle fracture propagation in rock under compression* // International Journal of Fracture, Volume 26, Issue 4, pp. 276-294.
11. Hoek, E., Martin, C.D. (2014) *Fracture initiation and propagation in intact rock – A review* // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Volume 6, Issue 4, pp. 287–300.
12. Rafiei Renani H., Martin, C.D., Hoek, E. (2016) *Application of the Christensen Failure Criterion to Intact Rock* // Geotechnical and Geological Engineering, Volume 34, Issue 1, pp. 297–312
13. Christensen, R.M. (2017) *Materials failure theory and applications, change is coming* // Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME. Volume 139, Issue 4, 041005
14. Christensen, R.M. (2016) *Perspective on Materials Failure Theory and Applications* // Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME. Volume 83, Issue 11, 111001.
15. Meng, F., Zhou, H., Wang, Z., Zhang, C., Li, S., Zhang, L., Kong, L. (2018) *Characteristics of Asperity Damage and Its Influence on the Shear Behavior of Granite Joints* // Rock Mechanics and Rock Engineering. Volume 51, Issue 2, pp. 429–449.

© А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, 2018

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БЛОЧНЫХ СРЕД. УЧЕТ РАЗМЕРОВ БЛОКОВ И КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ

Анвар Исмагилович Чанышев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52, зав. кафедрой математики и естественных наук, тел. (383) 335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Ильгизар Маратович Абдулин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник, тел. (383) 335-97-50, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

Ольга Евгеньевна Белоусова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383) 335-97-50, e-mail: o.e.belousova@mail.ru

Лариса Леонидовна Ефименко

Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, тел. (383) 224-27-31, e-mail: efimenko.larisa@gmail.com

Традиционно для горных пород паспортными зависимостями считаются зависимости, связывающие нагрузку при сжатии образцов с осевой деформацией. При этом совсем неважно, действует ли боковое давление или нет (эксперимент Ставрогина А.Н. демонстрирует это влияние). Исходя из этих зависимостей, делаются определенные выводы относительно усиления прочности горных пород за счет действия нагрузок в других направлениях. Рассмотрение этих и других подобных зависимостей в упругости, пластичности, при разрушении указывает только лишь на тот факт, что они не являются паспортными. Паспортными являются зависимости, которые не зависят ни от вида, ни от способа нагружения. В работе показывается, что эти зависимости следует искать через собственные базисы упругости, т. е. рассмотреть закон упругости (в виде закона Гука), найти для него собственный тензорный базис. Этот базис, определенный в упругости, во многих случаях является собственным для пластичности, для разрушения, для состояний ползучести. В работе показывается, что в основе этого явления лежит «единая» феноменологическая структура среды, в рамках которой тело претерпевает различного рода деформации. При этом паспортная зависимость «касательное напряжение – сдвиг» отражает изменение предельной силы трения на контактах структурных элементов.

Ключевые слова: тензорный базис, главные оси тензоров, собственный базис, структура, блоки, касательное напряжение, сдвиг, размеры блоков, контактное трение, блочные структуры.

MATHEMATICAL MODELS OF BLOCK MEDIA. CONSIDERATION OF BLOCK SIZE AND CONTACT FRICTION

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Chief Researcher; Novosibirsk State University of Economics and Management, 52, Kamenskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Head of Mathematics and Natural Sciences Department, phone: (383)243-94-75, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Il'gizar M. Abdulin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Researcher, phone: (383)335 97 50, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

Olga E. Belousova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)335-97-50, e-mail: o.e.belousova@mail.ru

Larisa L. Efimenko

Novosibirsk State University of Economics and Management, 52, Kamenskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Assistant Professor, Department of Mathematics and Natural Sciences, phone: (383)224-27-31, e-mail: efimenko.larisa@gmail.com

Traditionally, for rocks passport dependencies are those making a connection between the load (when samples are compressed) with axial deformation. At the same time, it does not matter whether lateral pressure is acting or not (the experiment of A.N. Stavrogin demonstrates this influence). According to the dependences, certain conclusions are made regarding the strengthening of rocks due to the action of loads in other directions. The consideration of these and other similar dependencies of elasticity and plasticity indicates only the fact that they are not passport. Passports are dependencies that are not affected by either the form or the loading method. It is shown that these dependences should be sought through their own bases of elasticity, that is, to consider the law of elasticity (in the form of Hooke's law), and to find its own tensor basis for it. This basis, defined in elasticity, in many cases is proper for plasticity, for fracture and for creep states. The paper shows that this phenomenon is based on the "unified" phenomenological structure of the medium, within which the body undergoes various kinds of deformations. In this case, the passport dependence "shear stress-shift" reflects the change in the limiting friction force at the contacts of the structural elements.

Key words: tensor basis, principal tensor axes, proper basis, structure, block, shear stress, shift, block size, contact friction, block structure.

Введение

В работе показывается, что существуют паспортные или «единые» зависимости материалов, которые не зависят от вида нагружения, с их помощью возможно предсказать поведение сред при любом наперед заданном виде нагружения. Вопрос заключается в том, что отражают эти паспортные характеристики, как получить структуру этих выражений?

Суть проблемы

Отметим, что долгое время в горном деле за основу бралась зависимость главного напряжения при сжатии в зависимости от деформации сжатия. Примером может служить зависимость $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ (рис. 1), предложенная в [1–3].

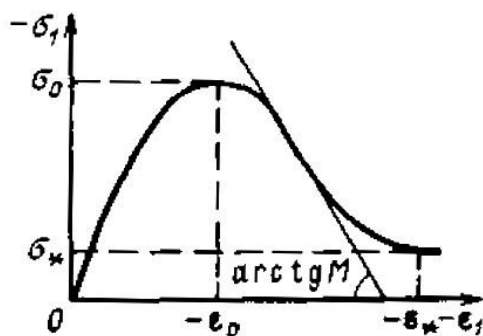


Рис. 1. Зависимость $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, отражающая ниспадающую ветвь [1, с. 8],
где $\mu_* = \arctg M$ – модуль спада

Как следует из работ [4], эта зависимость не является «единой», она зависит от бокового давления, действующего на сжимаемые в осевом направлении образцы (рис. 2).

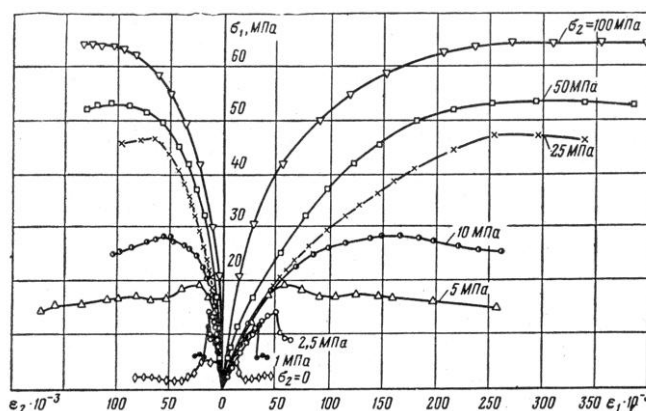


Рис. 2. Зависимость осевого напряжения от осевой деформации, полученная в [4] при двухстороннем сжатии образцов горных пород

Можно продолжить череду этих экспериментов.

Особенность этих и других опытов состоит в том, что зависимостям, представленным на рис. 1, 2, придается особый физический смысл. Как иллюстрацию сказанного возьмем соотношение закона Гука

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu \sigma_y]$$

и программу нагружения образца в виде рис. 3а. Будем считать, что $\tau_{xy} = 0$ и напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ являются главными. Пусть $\sigma_z = 0$.

Из рис. 3, а следует, что на участке ОА напряжение $\sigma_y = 0$, прикладывается только напряжение σ_x . На рис. 3, б этому нагружению отвечает участок ОА, где отрезок ОА наклонен к оси абсцисс под углом α ($\operatorname{tg} \alpha = E$).

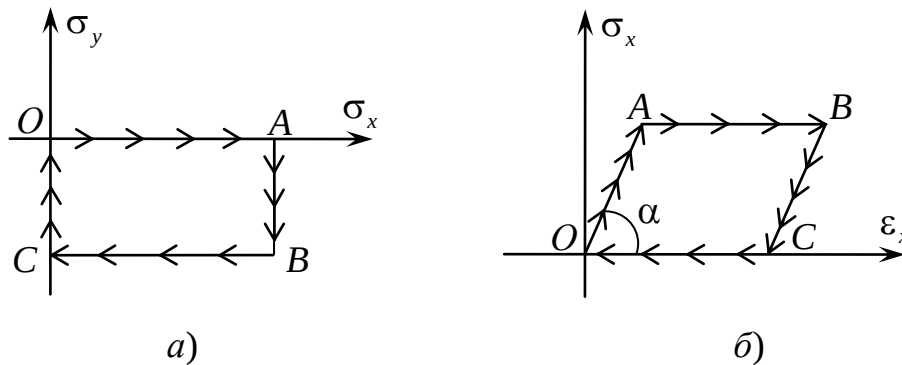


Рис. 3. Гипотетическая программа нагружения образца (а) и диаграмма изменения осевого напряжения (б) (в зависимости от программы нагружения на рис. 3, а)

Далее за участком ОА на рис. 3, а следует участок АВ, на котором напряжение σ_x сохраняется величиной постоянной. Рост ε_x при этом на участке АВ рис. 3, б происходит за счет отрицательного значения напряжения σ_y на рис. 3, а. В силу того, что $\Delta \sigma_x = 0$, $\Delta \sigma_y < 0$ из формулы (1) следует прирост деформации ε_x до значения $\varepsilon_x^{(B)}$. Далее на рис. 3, а следует участок нагружения ВС, на котором $\Delta \sigma_y = 0$, значение σ_x изменяется от значения σ_x в точке В до значения σ_x в точке С. На рис. 3, б этому этапу нагружения соответствует участок «упругой» разгрузки ВС. Таким образом достигается значение ε_x в точке С. Если теперь рассмотреть рис. 3, б, то в целом наблюдается картина, похожая на диаграмму упругопластического деформирования материалов.

Находясь в точке С, невозможно обнаружить отличие между указанной на рисунке диаграммой изменения напряжения σ_x от деформации ε_x и диаграммой изменения такого же напряжения от деформации ε_x для идеально-пластического материала. Здесь имеется участок упругости ОА, участок идеальной пластичности АВ, участок упругой разгрузки ВС. Отличие от упруго-

пластической диаграммы нагружения заключается в том, что после снятия напряжения σ_y деформация ε_x из точки C возвратится в точку O (потому что тело изначально и затем находится в состоянии упругости, а не в состоянии пластичности!). Поэтому особого смысла в таких диаграммах нет и говорить о том, что материал перешел, например, в состояние пластичности не приходится.

Отметим, что такие же диаграммы деформирования, зависящие от действия напряжений на других площадках и направлениях, можно видеть в работах, где исследуются упругопластические деформации [5–10] сложного нагружения материалов. Одним из проявлений сложного нагружения здесь является то, что диаграмма деформирования $\sigma_x = \sigma_x(\varepsilon_x)$, полученная при сложном нагружении, в некоторых случаях оказывается выше упругопластической диаграммы $\sigma_x = \sigma_x(\varepsilon_x)$, полученной при одноосном виде нагружения [4]. На этом основании здесь делается вывод о том, что путем сложной догрузки возможно повысить предельные деформационные прочностные характеристики деформируемых сред.

Эти и другие результаты заставляют задать следующий главный вопрос: какая диаграмма деформирования материала является паспортной? И тут же получить на него ответ: которая не зависит от способа и вида нагружения и с помощью которой (или которых) возможно с удовлетворительной точностью предсказывать поведение материала в других направлениях и на других площадках.

Очевидно то, что кривая $\sigma_x = \sigma_x(\varepsilon_x)$ не является паспортной хотя бы потому, что она зависит от способа и вида нагружения. Как искать кривую, которая не зависит от способа и вида нагружения? Ясно, что она должна быть собственной, т. е. связывать собственные координаты тензоров напряжений и деформаций. Что при этом понимается под собственными координатами?

Вариант решения проблемы

Представим себе для простоты рассмотрения материал, который является первоначально изотропным и деформируемым в упругости по закону Гука. Пусть x_1, x_2, x_3 – главные оси тензоров напряжений и деформаций, в которых эти тензоры имеют вид

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}, T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Закон Гука представим в виде:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = a\sigma_1 - b\sigma_2 - b\sigma_3, & \varepsilon_2 = -b\sigma_1 + a\sigma_2 - b\sigma_3, \\ \varepsilon_3 = -b\sigma_1 - b\sigma_2 + a\sigma_3, & a = 1/E, b = \nu/E. \end{cases} \quad (2)$$

Тензоры T_σ, T_ε будем рассматривать в следующем тензорном базисе

$$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В базисе (3) тензоры T_σ, T_ε имеют координаты

$$S_1 = \sigma_1, \quad S_2 = \sigma_2, \quad S_3 = \sigma_3, \quad \Omega_1 = \varepsilon_1, \quad \Omega_2 = \varepsilon_2, \quad \Omega_3 = \varepsilon_3. \quad (4)$$

В координатах (4) закон (2) имеет векторное представление

$$\begin{pmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & -b & -b \\ -b & a & -b \\ -b & -b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Матрица, связывающая координаты тензоров T_σ, T_ε в базисе (3), симметрическая. Приведем ее к диагональному виду. Имеем характеристическое уравнение

$$\begin{vmatrix} a - \lambda & -b & -b \\ -b & a - \lambda & -b \\ -b & -b & a - \lambda \end{vmatrix} = -\lambda^3 + 3a\lambda^2 - (3a^2 - 3b^2)\lambda + a^3 - 2b^3 - 3ab^2 = 0, \quad (6)$$

корнями которого служат выражения

$$\lambda_1 = \lambda_2 = a + b, \quad \lambda_3 = a - 2b. \quad (7)$$

Собственный вектор для собственного числа λ_3 в базисе (3) имеет координаты $\left(\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$. Тогда собственный тензор $\tilde{T}_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. Собственные тензоры $\tilde{T}_1, \tilde{T}_2$ для собственных чисел $\lambda_1 = \lambda_2$ равны

$$\tilde{T}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{T}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Координаты тензоров (1) в базисе $\tilde{T}_1, \tilde{T}_2, \tilde{T}_3$ получаются равными

$$\begin{cases} \tilde{S}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_1 - \sigma_3), & \tilde{S}_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}(2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3), & \tilde{S}_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \\ \tilde{\Omega}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2), & \tilde{\Omega}_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}(2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3), & \tilde{\Omega}_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3). \end{cases} \quad (8)$$

Из (7), (8) следует, что паспортными зависимостями, не зависящими от вида нагружения в упругости, являются следующие:

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} + \frac{1}{6}(2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)^2} = \frac{1}{\lambda_1} \sqrt{\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}{2} + \frac{1}{6}(2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}, \\ \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\lambda_3} \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (9)$$

Оказывается, что эти зависимости являются собственными или паспортными характеристиками для металлов в пластичности [5, 11], при разрушении [8], поскольку они там не зависят от вида нагружения.

Таким образом собственный тензорный базис для металлов получается состоящим из двух единичных тензоров:

$$\tilde{D} = \cos\theta \tilde{T}_1 + \sin\theta \tilde{T}_2, \quad \tilde{T}_3,$$

где $\operatorname{tg}\theta = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{\mu_\sigma}{\sqrt{3}} = \operatorname{tg}\Omega = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\sqrt{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)} = \frac{\mu_\varepsilon}{\sqrt{3}}$, $\mu_\sigma, \mu_\varepsilon$ – параметры Лодэ – Надаи.

Вариант решения проблемы для горных пород

Для горных пород предлагается собственный тензорный базис $\tilde{T}_3, \tilde{D}$ для металлов повернуть на некоторый угол φ_* и подобрать его таким, чтобы новый базис T_m, T_l оказался собственным для горных пород [12–14] и таких материалов как чугуны [15].

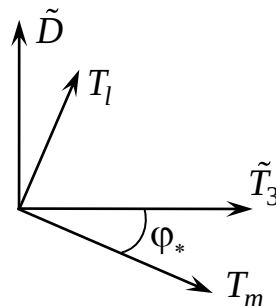


Рис. 4. Поворот собственного базиса для металлов на угол φ_* , так чтобы новый базис оказался собственным для горных пород

Значения угла φ_* получены для разных горных пород (гранит, песчаник, каменная соль).

Как показано в [12–15], собственный тензорный базис отражает поведение материала в блочной структуре, при этом орт T_m отвечает простому удлинению блочной структуры в направлении нормали к блокам, T_l – простым сдвигам. Диаграмма деформирования среды вдоль орта T_l по существу совпадает с диаграммой изменения предельной силы трения с ростом сдвигов. Отметим, что исследованиям контактного трения на границах блоков экспериментально и теоретически посвящены работы [16–18], в которых отмечается нестационарный характер движения блоков.

Заключение

1. Показано, что кривая $\sigma_x = \sigma_x(\varepsilon_x)$ не является паспортной не только для горных пород, но и для металлов.
2. Построен собственный тензорный базис для горных пород.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ (№ 18-05-00757 А).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. – М. : Недра, 1983. – 280 с.
2. Петухов И. М., Егоров П. В., Винокур Б. Ш. Предотвращение горных ударов на рудниках. – М. : Недра, 1984. – 230 с.
3. Петухов И. М., Батугина И. М. Геодинамика недр. – М. : Недра коммюникейшенс, 1999. – 287 с.
4. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М. : Недра, 1985. – 271 с.
5. Жуков А. М. Некоторые особенности кривой нейтрального нагружения // Изв. АН СССР. ОН. 1958. № 8.
6. Аннин Б. Д., Жигалкин В. М. Поведение материалов в условиях сложного нагружения Научное издание. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. – 342 с.
7. Zhigalkin V. M., Semyonov V. N., Usoltseva O. M., Chanyshv A. I., Abdulin I. M. Theoretical and experimental modeling of material hardening and softening by compression tests. 2012 Harmonising Rock Engineering and the Environment – Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. 2012. pp. 563–568.
8. Стружанов В. В., Миронов В. И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. – Екатеринбург : УрО РАН, 1995. 191 с.
9. Вильдеман В. Э., Ломакин Е. В., Третьяков М. П. Закритическое деформирование сталей при плоском напряженном состоянии // Изв. РАН. МТТ. 2014. № 1. С. 26–36.
10. Вильдеман В. Э., Ильиных А. В. Моделирование процессов структурного разрушения и масштабных эффектов разупрочнения на закритической стадии деформирования неоднородных сред // Физ. мезомех. 2007. Т. 10. № 4. С. 23–29.
11. Ильюшин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. – М. : Изд-во АН СССР, 1963.

12. Чанышев А. И. Построение паспортных зависимостей горных пород в допредельной и запредельной областях деформирования // ФТПРПИ. – 2002. – №5.
13. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Характеристики и соотношения на характеристиках на запредельной стадии деформирования горных пород // ФТПРПИ. – 2008, № 5. С. 27–41.
14. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Деформирование и разрушение первоначально изотропных сред с условием нарушения прочности Мизеса // ФТПРПИ. – 2006. – № 4. С. 17–30.
15. Чанышев А.И., Жигалкин В.М., Усольцева О.М. О построении уравнений состояния полухрупких материалов по данным двухосных испытаний // ФТПРПИ. – 2003. – № 4. С. 63–71.
16. Tarasov B.G. Hitherto unknown shear rupture mechanism as a source of instability in intact hard rocks at highly confined compression // Tectonophysics Volume 621, 7 May 2014, pp. 69–84.
17. Tarasov B.G., Guzev M.A., Sadovskii V.M., Cassidy M.J. Modelling the mechanical structure of extreme shear ruptures with friction approaching zero generated in brittle materials // International Journal of Fracture 207(1), 2017. pp. 87–97.
18. Tarasov B.G., Sadovskii V.M. Mathematical modeling of fan-structure shear ruptures generated in hard rocks // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 10187 LNCS, 2017, pp. 648–656.

REFERENCES

1. Petukhov, I.M. & Linkov, A.M. (1983). *Mekhanika gornykh udarov I vybrosov [Mechanics of mountain impacts and emissions]*. Moscow: Nedra [in Russian].
2. Petukhov, I.M., Egorov, P.V. & Vinokur, B.Sh. (1984). *Predotvrashcheniye gornykh udarov na rudnikakh [Prevention of mining impacts at mines]*. Moscow: Nedra [in Russian].
3. Petukhov, I.M. & Batugina, I.M. (1999). *Geodinamika nedr [Geodynamics of subsoil]*. Moscow: Nedra communication [in Russian].
4. Stavrogin, A.N., Protosenya, A.G. (1985). Prochnost' gornykh porod i ustojchivost' vyrabotok na bol'shih glubinah [Rock strength and stability of developments at big depths]. – M.: Nedra [in Russian].
5. Zhukov, A.M. (1958). Nekotorye osobennosti krivoj nejtral'nogo nagruzheniya [Some features of a curve of neutral loading]. Academy of Sciences of the USSR, OTN, No. 8. [in Russian].
6. Annin, B.D., Zhigalkin, V.M (1999). Povedenie materialov v usloviyah slozhnogo nagruzheniya [Behavior of materials under conditions of complex loading]. – Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN [in Russian].
7. Zhigalkin, V.M., Semyonov, V.N., Usoltseva, O.M., Chanyshv, A.I., Abdulin, I.M. (2012) Theoretical and experimental modeling of material hardening and softening by compression tests. 2012 Harmonising Rock Engineering and the Environment – Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics.
8. Struzhanov, V.V, Mironov, V.I. (1995). Deformacionnoe razuprochnenie materiala v ehlementah konstrukcij [Deformation softening of the material in structural elements]. – Ekaterinburg: UrO RAN [in Russian].
9. Vildeman, V.E., Lomakin, E.V., Tretyakov, M.P. (2014). Zakriticheskoe deformirovanie stalej pri ploskom napryazhennom sostoyanii [Supercritical deformation of steels under a plane stressed state], Izv. RAS. MTT. 2, [in Russian].
10. Vildeman, V.E., Ilyinikh, A.V. (2007) Modelirovanie processov strukturnogo razrusheniya i masshtabnykh ehffektov razuprochneniya na zakriticheskoy stadii deformirovaniya neodnorodnykh sred [Simulation of the processes of structural destruction and scale softening effects at the supercritical stage of deformation of inhomogeneous media], Fiz. mesomech. 10, 4, [in Russian].

11. Ilyushin, A.A. (1963) *Plastichnost'. Osnovy obshchej matematicheskoy teorii*. [Plasticity. Fundamentals of general mathematical theory]. – Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences [in Russian].
12. Chanyushev, A.I. (2002) Constitutive dependences for rocks in the pre- and post-limit deformation stages. *Journal of Mining Science* 38(5).
13. Chanyushev, A.I., Abdulin, I.M. (2008) Characteristics and the relations on them at the stage of post-limit deformation in rocks. *Journal of Mining Science* 44(5).
14. Chanyushev, A.I., Abdulin, I.M. (2006) Deformation and failure of originally isotropic media under the Mises strength condition. *Journal of Mining Science* 42(4).
15. Chanyushev, A.T., Zhigalkin, V.M., Usoltseva, O.M (2003) Construction of equations of state for semi-brittle materials by the triaxial test data. *Journal of Mining Science* 39(4).
16. Tarasov, B.G. (2014). Hitherto unknown shear rupture mechanism as a source of instability in intact hard rocks at highly confined compression. *Tectonophysics* Volume 621.
17. Tarasov, B.G., Guzev, M.A., Sadovskii, V.M., Cassidy, M.J. (2017) Modelling the mechanical structure of extreme shear ruptures with friction approaching zero generated in brittle materials. *International Journal of Fracture* 207(1).
18. Tarasov, B.G., Sadovskii, V.M. (2017) Mathematical modeling of fan-structure shear ruptures generated in hard rocks. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 10187 LNCS.

© А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, О. Е. Белоусова, Л. Л. Ефименко, 2018

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ВОЗМУЩЕНИЙ И НДС МАССИВА ПОРОД ВОКРУГ НЕГО ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ СМЕЩЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ. Ч. 1. ПОСТРОЕНИЕ ТЕСТОВОГО ПРИМЕРА

Анвар Исмагилович Чанышев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52, зав. кафедрой математики и естественных наук, тел. (383) 335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Ольга Евгеньевна Белоусова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-97-50, e-mail: o.e.belousova@mail.ru

Лариса Ивановна Торгашова

Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52, старший преподаватель кафедры математики и естественных наук, тел. (383)243-94-75, e-mail: aspirant_igd@mail.ru

Для построения тестового примера решается задача о действии сферического источника в безграничной упругой среде. Решение волнового уравнения для радиального смещения отыскивается при помощи метода разделения переменных. Изменение во времени определяется тригонометрическими функциями, изменение по пространственной координате – цилиндрическими функциями. Построенное решение в сферических координатах преобразуется в решение для прямоугольных декартовых координат. На заданном расстоянии от центра источника задается плоскость, на которой определяются следы от полученного решения для трех перемещений и трех напряжений (нормального и двух касательных). Задача заключается в том, чтобы по этим данным восстановить положение самого источника, характер его воздействия, напряженно-деформированное состояние вокруг источника, условия нагружения полупространства в бесконечно удаленных точках.

Ключевые слова: динамическая задача, источник возмущений, напряжения, деформации, смещения, сферический источник, вектор напряжений, вектор смещений, граница полупространства.

DETERMINATION OF THE POSITION OF SOURCE OF PERTURBANCY AND VAT THE ROCK MASSES ARE AROUND IT FROM THE DATA OF MEASUREMENTS OF OFFSETS ON THE EARTH'S SURFACE. P. 1. CONSTRUCTION OF THE TEST EXAMPLE

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Chief Researcher; Novosibirsk State University of Economics and Management, 52, Kamenskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Head of Mathematics and Natural Sciences Department, phone: (383)243-94-75, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Olga E. Belousova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)335-97-50, e-mail: o.e.belousova@mail.ru

Larisa I. Torgashova

Novosibirsk State University of Economics and Management, 52, Kamenskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Senior Lecturer, Department of Mathematics and Natural Sciences, phone: (383)243-94-75, e-mail: aspirant_igd@mail.ru

The problem of a spherical source action in an infinite elastic medium is solved to construct a test example. The solution of the wave equation for radial displacement is sought using the variable separation method. The time change is determined by trigonometric functions, the change in the spatial coordinate is determined by the cylindrical functions. The constructed solution in spherical coordinates is transformed into a solution for rectangular Cartesian coordinates. At a given distance from the center of the source a plane is defined. On the plane the traces from the obtained solution are determined for three displacements and three stresses (normal and two tangential). The problem is to restore the position of the source itself, the nature of its action, the stress-strain state around the source and the loading conditions of the half-space at infinity points using these data.

Key words: dynamic problem, disturbance source, stress, deformation, displacement, spherical source, stress vector, displacement vector, half-space boundary.

Введение

В науках о Земле в силу объективной причины (невозможно заглянуть внутрь Земли) делаются различные прогнозы. Прогнозируются положения месторождений полезных ископаемых, положения и время наступления катастрофических событий, напряженно-деформированное состояние массива пород вблизи выработок, структура Земли на больших глубинах. В основе оценок лежат те или иные идеи – методы механики деформируемого твердого тела, первая краевая задача, вторая краевая задача, смешанная краевая задача, гипотеза Динника, обратные задачи, лучевые методы исследований [1–28].

В этом множестве идей и работ нет таких, о которых будем говорить ниже. Они предполагают задание на одной и той же известной границе и самой искомой внутри области функции и ее производной по нормали. Отличие от классических постановок состоит в том, что эти условия должны быть заданы одновременно.

Постановка задачи

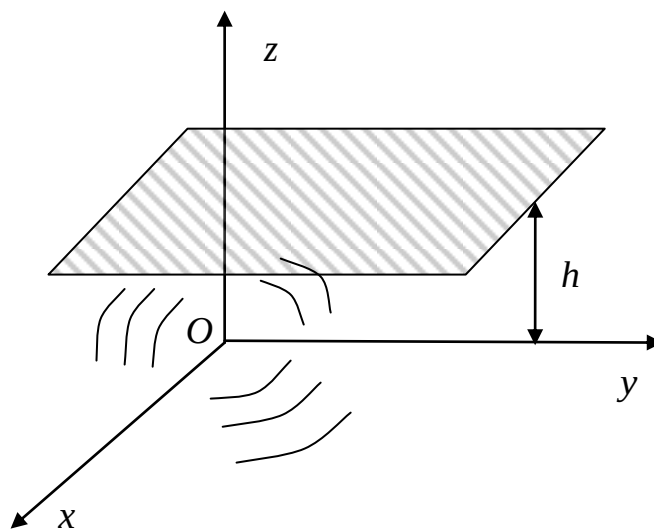
Пусть на поверхности Земли заданы одновременно как функции координат поверхности и времени t вектор напряжений Коши $\sigma_{ij}n_j|_F = \varphi_i(x, y, t)$ и вектор перемещений $u_i|_F = \psi_i(x, y, t)$. Второе условие означает то, что заданная функция, первое условие соответствует, что задана производная от этой функции по нормали. Задача следующая: по известным функциям $\varphi_i(x, y, t)$ и $\psi_i(x, y, t)$ на поверхности Земли найти напряженно-деформированное состояние Земли, най-

ти внутри Земли источники динамических возмущений, приводящие на ее поверхности к катастрофическим событиям в виде землетрясений, определить внутреннюю структуру Земли (наличие в ней пустот, включений и так далее).

В этой работе приведем пример решения этой задачи для случая, когда Земля представляет собой полупространство с неравенством $z \leq 0$, где $z = 0$ – уравнение поверхности Земли. Чтобы проверить разработанный алгоритм и программу вычислений построим в начале тестовый пример. Пример следующий.

Построение тестового примера

Пусть в начале прямоугольной декартовой системе координат $xOyz$ расположен источник динамических возмущений (рисунок).



В точке O действует сферический источник, на высоте $z = h$ фиксируются следы этого источника возмущений в виде зависимостей

$$\sigma_z = \sigma_z(x, y, h, t), \tau_{xz} = \tau_{xz}(x, y, h, t), \tau_{yz} = \tau_{yz}(x, y, h, t), u_x = u_x(x, y, h, t),$$

$$u_y = u_y(x, y, h, t), u_z = u_z(x, y, h, t)$$

Источник действует в безграничном пространстве. На плоскости $z = h$ фиксируются следы от действия источника. Предполагается, что материал вокруг источника возмущений является упругим с известными константами упругости E и ν . Первая задача состоит в нахождении следов от действия источника. Вторая задача состоит в определении положения источника по заданным следам.

Рассмотрим решение первой задачи. Пусть r, θ, φ – сферические координаты, связанные с прямоугольными декартовыми координатами x, y, z формулами

$$x = r \sin \theta \cos \varphi, \quad y = r \sin \theta \sin \varphi, \quad z = r \cos \theta. \quad (1)$$

Пусть u_r – радиальное смещение и два других смещения u_θ и u_φ равны нулю. Смещение u_r удовлетворяет волновому уравнению:

$$u_r'' + \frac{2u_r'}{r} - 2\frac{u_r}{r^2} = \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)E} \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где штрихами обозначаются производные по координате r , ρ – плотность материала, t – время.

Решение (2) отыскиваем в виде

$$u_r = f(r)g(t). \quad (3)$$

Подстановка (3) в (2) дает следующее условие:

$$\frac{f'' + \frac{2f'}{r} - \frac{2f}{r^2}}{f} = \frac{1}{a^2} \frac{g''(t)}{g(t)} = -\lambda^2, \quad (4)$$

где $a^2 = \frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}$ – скорость распространения волны, λ^2 – константа.

Из (4) следует, что

$$g(t) = C_1 \cos(\lambda at) + C_2 \sin(\lambda at). \quad (5)$$

Для определения f получаем уравнение

$$r^2 f'' + 2f'r + [\lambda^2 r^2 - 2]f = 0. \quad (6)$$

Далее вводится новая переменная $\hat{r} = \lambda r$. Две функции $F(\hat{r}) = f\left(\frac{\hat{r}}{\lambda}\right)$ из (6) получаем условие

$$\hat{r}^2 F'' + 2F'\hat{r} + [\hat{r}^2 - 2]F = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) является частным случаем дифференциального уравнения

$$u'' + \frac{1-2\alpha}{z}u' + \left(\beta^2 + \frac{\alpha^2 - \nu^2}{z^2}\right)u = 0, \quad (8)$$

приводящего к цилиндрическим функциям.

В нашем случае $\alpha^2 - \nu^2 = -2$, $\alpha = -\frac{1}{2}$, $\beta = 1$, $\nu = \pm \frac{3}{2}$. Решение (8) представляется в виде $u = z^\alpha Z_\nu(\beta t)$.

При $\nu = \frac{3}{2}$ функцию $Z_{\frac{3}{2}}(t)$ принимаем в виде

$$Z_{\frac{3}{2}}(t) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \left(\frac{\sin z}{z} - \cos z \right). \quad (9)$$

При $\nu = -\frac{3}{2}$ функцию $Z_{-\frac{3}{2}}(t)$ равна

$$Z_{-\frac{3}{2}}(t) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \left(-\sin z - \frac{\cos z}{z} \right). \quad (10)$$

Используя эти результаты, примем, что функция u_r изменяется вдоль координаты r и во времени t по правилу:

$$u_r = C_1 \left[\frac{\sin(\lambda r)}{(\lambda r)^2} - \frac{\cos(\lambda r)}{\lambda r} \right] \sin(\lambda at). \quad (11)$$

Определим с помощью (11)

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} = C_1 \lambda \sin(\lambda at) \left[\frac{2 \cos(\lambda r)}{(\lambda r)^2} - \frac{2 \sin(\lambda r)}{(\lambda r)^3} + \frac{\sin(\lambda r)}{\lambda r} \right], \quad (12)$$

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} = C_1 \lambda \sin(\lambda at) \left[\frac{\sin(\lambda r)}{(\lambda r)^3} - \frac{\cos(\lambda r)}{(\lambda r)^2} \right]. \quad (13)$$

Далее, из того, что

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - 2\nu \sigma_\varphi] \\ \varepsilon_\varphi = \frac{1}{E} [\sigma_\varphi - \nu \sigma_r - \nu \sigma_\theta] = \frac{1}{E} [\sigma_\varphi (1 - \nu) - \nu \sigma_r] \end{cases},$$

получаем

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[(1-\nu)\varepsilon_r + 2\nu\varepsilon_\varphi \right] = \\ &= \frac{C_1\lambda\sin(\lambda at)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\frac{2(1-2\nu)\cos(\lambda r)}{(\lambda r)^2} - \frac{2(1-2\nu)\sin(\lambda r)}{(\lambda r)^3} + \frac{(1-\nu)\sin(\lambda r)}{\lambda r} \right],\end{aligned}\quad (14)$$

$$\begin{aligned}\sigma_\theta &= \sigma_\varphi = \frac{\varepsilon_\varphi + \nu\varepsilon_r}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \\ &= \frac{C_1\lambda\sin(\lambda at)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\frac{(1-2\nu)\sin(\lambda r)}{(\lambda r)^3} - \frac{(1-2\nu)\cos(\lambda r)}{(\lambda r)^2} + \frac{\nu\sin(\lambda r)}{\lambda r} \right].\end{aligned}\quad (15)$$

Искомые граничные условия

Используя (11)–(15) для формулировки смещений u_x, u_y, u_z . Имеем

$$\begin{cases} u_x = \vec{u}_r \vec{i} = C_1 \left[\frac{\sin(\lambda r)}{(\lambda r)^2} - \frac{\cos(\lambda r)}{\lambda^2} \right] \sin(\lambda at) \sin\theta \cos\varphi, \\ u_y = \vec{u}_r \vec{j} = u_r \sin\theta \sin\varphi, \\ u_z = \vec{u}_r \vec{k} = u_r \cos\theta. \end{cases}\quad (16)$$

Будем считать, что эти величины u_x, u_y, u_z заданы на границе $z = h$, т. е. как следует из (1), при

$$r = \frac{h}{\cos\theta}.$$

Определим теперь напряжения $\sigma_z, \tau_{zx}, \tau_{zy}$. Поскольку орты сферической системы координат имеют в системе координат $xOyz$ следующие координаты:

$$\begin{aligned}\vec{e}_r &= (\sin\theta \cos\varphi, \sin\theta \sin\varphi, \cos\theta), \\ \vec{e}_\theta &= (\cos\theta \cos\varphi, \cos\theta \sin\varphi, -\sin\theta), \\ \vec{e}_\varphi &= (-\sin\varphi, \cos\varphi, 0)\end{aligned}$$

то отсюда следует, что орт $\vec{k}$, например, в этой же системе координат равен $\vec{k} = (\cos\theta, -\sin\theta, 0)$. Отсюда находим вектор напряжения Коши на площадке с нормалью $\vec{k}$, он будет равен

$$\vec{p}_n = \sigma_r \cos \theta \vec{e}_r - \sigma_\theta \sin \theta \vec{e}_\theta. \quad (17)$$

Составляя скалярное произведение вектора $\vec{p}_n$ с ортом $\vec{k}$, получаем напряжение σ_z :

$$\sigma_z = \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta. \quad (18)$$

Составляя теперь скалярное произведение (17) с ортом $\vec{i} = (\sin \theta \cos \varphi, \cos \theta \cos \varphi, -\sin \varphi)$ и ортом $\vec{j} = (\sin \theta \sin \varphi, \cos \theta \sin \varphi, \cos \varphi)$, получаем другие напряжения

$$\tau_{zx} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \sin 2\theta \cos \varphi, \tau_{zy} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \sin 2\theta \sin \varphi. \quad (19)$$

Подставляя сюда (15) находим

$$\begin{cases} \tau_{zx} = \frac{C_1 \lambda \sin(\lambda at)}{2(1+\nu)} \left[\frac{3 \cos(\lambda r)}{(\lambda r)^2} + \frac{3 \sin(\lambda r)}{(\lambda r)^3} + \frac{\sin(\lambda r)}{\lambda r} \right] \cos 2\theta \cos \varphi, \\ \tau_{zy} = \frac{C_1 \lambda \sin(\lambda at)}{2(1+\nu)} \left[\frac{3 \cos(\lambda r)}{(\lambda r)^2} + \frac{3 \sin(\lambda r)}{(\lambda r)^3} + \frac{\sin(\lambda r)}{\lambda r} \right] \sin 2\theta \sin \varphi. \end{cases} \quad (20)$$

В этих формулах, как и в (18) полагаем $r = h / \cos \theta$.

В результате построен тестовый пример, в котором на плоскости $z = h$ задаются перемещения (16), напряжения (18), (20). Задача: получить по этим данным распределения (14), (15) для любых значений z при r и, кроме того, установить величину h и значение C_1 , входящее в (11).

Отметим, что в этих формулах

$$\theta = \arctg \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}, \quad \varphi = \arctg \frac{y}{x}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Заключение

Создан набор граничных условий для проверки расчетной схемы определения источника динамических возмущений в упругом полупространстве, его интенсивности, напряженно-деформированного состояния полупространства.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090002-5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bu, W., Liu, X., Tang, Y. & Yang, J. (2015). Finite element multigrid method for multi-term time fractional advection diffusion equations // *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 6 (1).
2. Buterin, S.A. (2018). On an inverse spectral problem for first-order integro-differential operators with discontinuities // *Applied Mathematics Letters*, – Vol. 78. – P. 65–71.
3. Buterin, S.A. & Sat, M. (2017). On the halfinverse spectral problem for an integro-differential operator // *Inverse Problems in Science and Engineering*, – Vol. 25, Iss. 10. – P. 1508–1518.
4. Timofeev, V.Y., Kalish, E.N., Ardyukov, D.G., Valitov, M.G., Timofeev, A.V., Stus, Y.F., Kulinich, R.G., Nosov, D.A., Sizikov, I.S. & Ducarme, B. (2017). Gravity observation at continental borderlands // *Geodesy and Geodynamics*, Volume 8, № 3. – P. 193–200.
5. Протасов М. И., Чеверда В. А., Правдухин А. П., Исаков Н. Г. Трехмерная анизотропная миграция данных 3D сейсморазведки на основе Гауссовых пучков // *Технологии сейсморазведки*. – 2017. – № 1. – С. 35–47.
6. Костин В. И., Лисица В. В., Решетова Г. В., Чеверда В. А. Локальное пространственно-временное измельчение сеток для конечно-разностного моделирования упругих волн в трехмерно-неоднородных разномасштабных средах // *Сибирский журнал вычислительной математики*. – 2013. – Т.16 (1). – С. 45–65.
7. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V. & Tcheverda, V.A. (2016). Statistical analysis of free-surface variability's impact on seismic wavefield. // *Proceedings of 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences*. Pages 434-438. Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences. Saint Petersburg. Russian Federation.
8. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V., Tcheverda, V.A., Alexandrov, D. & Bakulin, A. (2015). Effect of surface sand topography changes on repeatability of land Seismic data in desert environment // *Proceedings of 77th EAGE Conference and Exhibition 2015: Earth Science for Energy and Environment 2015*. Pages 1400-1404. 77th EAGE Conference and Exhibition 2015: Earth Science for Energy and Environment. Madrid. Spain
9. Castro C.E., Kaser M., & Toro, E.F. (2009). Space-time numerical methods for geophysical applications // *Philosophical Transactions of the Royal Society: series A*. – № 367. – P. 4613–4631.
10. Diaz, J. & Grote, M.J. (2009). Energy conserving explicit local time stepping for second-order wave equations // *SIAM J. Scientific Comput.* – Vol. 31, iss. 3. – P. 1985–2014.
11. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V., Reshetova, G.V., Vishnevsky, D.M. & Tcheverda, V.A. (2013). Hybrid algorithm for simulation of seismic wave propagation in complex media – Anisotropy, attenuation, multi-scale // *Proceedings of 75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers 2013*, Pages 5634-5638. 75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers. London. United Kingdom.
12. Fei, T.V. & Liu, Q. (2005). Wave equation migration for 3D VSP using phase-shift plus interpolation // *Society of Exploration Geophysicists*.
13. Тимошкина Е. П., Леонов Ю. Г., Михайлов В. О. Формирование системы горное сооружение – предгорный прогиб: геодинамическая модель и ее сопоставление с данными по северному Предкавказью // *Геотектоника*. – 2010. – № 5. – С. 3–21.
14. Mikhailov, V.O., Smolyaninova, E.I. & Sebrier, M. (2002). Numerical modeling of neotectonic movements find the state of stress in the North Caucasus foredeep // *Tectonics*, 21. Pages 7-1 – 7-14.

15. Чанышев А.И., Вологин Д.А. Определение напряженно-деформированного состояния и дефективности массива пород по данным измерений смещений на его поверхности. Ч.1: построение аналитических решений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011, № 4. – С. 3–11.
16. Чанышев А.И. Об одном методе определения теплового состояния среды // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012, № 4. – С. 83–93.
17. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременных реакций горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014, № 4. – С. 10–38.
18. Adushkin, V.V., Spivak, A.A. & Kharlamov, V.A. Results of instrumental observations of tidal wave propagation in the atmosphere // *Doklady Earth Sciences*. Volume 469, Issue 1, 1 July 2016. – P. 758–761.
19. Spivak, A.A. (2010). The specific features of geophysical fields in the fault zones // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 46 (4), Pages 327–338.
20. Kabanikhin, S.I. & Krivorot'ko, O.I. (2016). A numerical algorithm for computing tsunami wave amplitudes // *Numerical Analysis and Applications*. Volume 9, Issue 2, 1 April 2016, Pages 118–128.
21. Kabanikhin, S.I. & Shishlenin, M.A. (2015). Two-dimensional analogs of the equations of gelfand, levitan, krein, and marchenko // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. Volume 3, Issue 2, 2015. – P. 70–99.
22. Belonosova, A.V. & Belonosov, V.S. (2013). Direct and inverse problems of reservoir bottom sounding // *Sib. electron. matem. izv*, 10, P. 10–15.
23. Kabanikhin, S.I. & Krivorot'ko, O.I. (2013). A numerical method for determining the amplitude of a wave edge in shallow water approximation // *Applied and Computational Mathematics* Volume 12, Issue 1, 2013, P. 91–96.
24. Kabanikhin, S.I., Gasimov, Y.S., Nurseitov, D.B., Shishlenin, M.A., Sholpanbaev, B.B. & Kasenov, S. (2013). Regularization of the continuation problem for elliptic equations // *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems* Volume 21, Issue 6, 1 December 2013, P. 871–884.
25. Isakov, V. & Kindermann, S. (2011). Subspaces of stability in the Cauchy problem for the Helmholtz equation // *Methods Appl. Anal*, 18, P. 1–30.
26. Regińska, T. & Tautenhahn, U. (2009). Conditional stability estimates and regularization with applications to cauchy problems for the helmholtz equation // *Numerical Functional Analysis and Optimization* Volume 30, Issue 9–10, September 2009, P. 1065–1097.
27. Борщ-Компониец В. И. Практическая механика горных пород. – М.: Издательство «Горная книга». – 2013. – 322 с.
28. Казикаев Д. М., Савич Г. В. Практический курс геомеханики подземной и комбинированной разработки руд : Учебное пособие. – М.: Издательство «Горная книга». – 2012. – 224 с.

REFERENCES

1. Bu, W., Liu, X., Tang, Y. & Yang, J. (2015). Finite element multigrid method for multi-term time fractional advection diffusion equations // *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 6 (1).
2. Buterin, S.A. (2018). On an inverse spectral problem for first-order integro-differential operators with discontinuities // *Applied Mathematics Letters*, – Volume 78. Pages 65–71.
3. Buterin, S.A. & Sat, M. (2017). On the halfinverse spectral problem for an integro-differential operator // *Inverse Problems in Science and Engineering*, – Volume 25, Issue 10. Pages 1508–1518.

4. Timofeev, V.Y., Kalish, E.N., Ardyukov, D.G., Valitov, M.G., Timofeev, A.V., Stus, Y.F., Kulinich, R.G., Nosov, D.A., Sizikov, I.S. & Ducarme, B. (2017). Gravity observation at continental borderlands // *Geodesy and Geodynamics, Volume 8, № 3. Pages 193–200.*
5. Protasov, M.I., Tcheverda, V.A., Pravduhin, A.P. & Isakov, N.G. (2017). 3D anisotropic imaging of 3D seismic data on the basis on Gaussian beams // *Tekhnologii seysmorazvedki [Technologies of seismic prospecting], 1, 35–47.* [in Russian].
6. Kostin, V.I., Lisitsa, V.V., Tcheverda, V.A. & Reshetova, G.V. (2013). Finite difference simulation of elastic wave propagation through 3D heterogeneous multiscale media based on locally refined grids // *Numerical Analysis and Applications, 6(1), 40–47.*
7. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V. & Tcheverda, V.A. (2016). Statistical analysis of free-surface variability's impact on seismic wavefield. // *Proceedings of 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences. Pages 434-438.* Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences. Saint Petersburg. Russian Federation.
8. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V., Tcheverda, V.A., Alexandrov, D. & Bakulin, A. (2015). Effect of surface sand topography changes on repeatability of land Seismic data in desert environment // *Proceedings of 77th EAGE Conference and Exhibition 2015: Earth Science for Energy and Environment 2015. Pages 1400-1404.* 77th EAGE Conference and Exhibition 2015: Earth Science for Energy and Environment. Madrid. Spain.
9. Castro C.E., Kaser, M., & Toro, E.F. (2009). Space-time numerical methods for geophysical applications // *Philosophical Transactions of the Royal Society: series A. – № 367. – Pages 4613–4631.*
10. Diaz, J. & Grote, M.J. (2009). Energy conserving explicit local time stepping for second-order wave equations // *SIAM J. Scientific Comput. – Vol. 31, iss. 3. – Pages 1985–2014.*
11. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V., Reshetova, G.V., Vishnevsky, D.M. & Tcheverda, V.A. (2013). Hybrid algorithm for simulation of seismic wave propagation in complex media – Anisotropy, attenuation, multi-scale // *Proceedings of 75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers 2013, Pages 5634-5638.* 75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers. London. United Kingdom.
12. Fei, T.V. & Liu, Q. (2005). Wave equation migration for 3D VSP using phase-shift plus interpolation // *Society of Exploration Geophysicists.*
13. Timoshkina, E.P., Leonov, Y.G. & Mikhailov, V.O. (2010). Formirovaniye sistemy gornoye sooruzhenie – predgornyy progib: geodinamicheskaya model i tyo sopostovleniye s dannymi po severnomu Predkavkazyu [The formation of the system is a mountain structure – piedmont deflection: the geodynamic model and its comparison with the data for the northern Ciscaucasia] // *Geotektonika, № 5. Pages 3–21* [in Russian].
14. Mikhailov, V.O., Smolyaninova, E.I. & Sebrier, M. (2002). Numerical modeling of neotectonic movements and the state of stress in the North Caucasus foredeep // *Tectonics, 21. Pages 7-1 – 7-14.*
15. Chanyshv, A.I. & Vologin, D.A. (2011). Determination of the stress-strain state and damages in a rock mass by the displacement measurements on its surface. Part I: Analytical solutions // *Journal of Mining Science Volume 47, Issue 4. Pages 395–403.*
16. Chanyshv, A.I. (2012). A method to determine a body's thermal state // *Journal of Mining Science Volume 48, Issue 4, July 2011. Pages 660–668.*
17. Adushkin V.V. & Oparin V.N. (2014). From the alternating-sing explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomedia. Part III. // *Journal of Mining Science. T. 50. № 4. Pages 623–645.*

18. Adushkin, V.V., Spivak, A.A. & Kharlamov, V.A. (2016). Results of instrumental observations of tidal wave propagation in the atmosphere // *Doklady Earth Sciences*. Volume 469, Issue 1, 1 July 2016, Pages 758-761.
19. Spivak, A.A. (2010). The specific features of geophysical fields in the fault zones // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 46 (4), Pages 327–338.
20. Kabanikhin, S.I. & Krivorot'ko, O.I. (2016). A numerical algorithm for computing tsunami wave amplitudes // *Numerical Analysis and Applications*. Volume 9, Issue 2, 1 April 2016, Pages 118–128.
21. Kabanikhin, S.I. & Shishlenin, M.A. (2015). Two-dimensional analogs of the equations of gelfand, levitan, krein, and marchenko // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. Volume 3, Issue 2, 2015, Pages 70–99.
22. Belonosova, A.V. & Belonosov, V.S. (2013). Direct and inverse problems of reservoir bottom sounding // *Sib. electron. matem. izv*, 10, Pages 10–15.
23. Kabanikhin, S.I. & Krivorot'ko, O.I. (2013). A numerical method for determining the amplitude of a wave edge in shallow water approximation // *Applied and Computational Mathematics Volume 12, Issue 1, 2013, Pages 91–96*.
24. Kabanikhin, S.I., Gasimov, Y.S., Nurseitov, D.B., Shishlenin, M.A., Sholpanbaev, B.B. & Kasenov, S. (2013). Regularization of the continuation problem for elliptic equations // *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems Volume 21, Issue 6, 1 December 2013, Pages 871–884*.
25. Isakov, V. & Kindermann, S. (2011). Subspaces of stability in the Cauchy problem for the Helmholtz equation // *Methods Appl. Anal*, 18, Pages 1–30.
26. Regińska, T. & Tautenhahn, U. (2009). Conditional stability estimates and regularization with applications to cauchy problems for the helmholtz equation // *Numerical Functional Analysis and Optimization Volume 30, Issue 9–10, September 2009, Pages 1065–1097*.
27. Borshch-Komponiets, V.I. (2013). *Prakticheskaya mekhanika gornyx porod [Practical mechanics of rocks]*. Moscow: “Gornaya kniga” [in Russian].
28. Kazikaev, D.M. & Savich, G.V. (2012). *Prakticheskiy kurs geomekhaniki podzemnoy i kombinirovannoy razrabotki rud [Practical course of geomechanics of underground and combined mining of ores]*. Moscow: “Gornaya kniga” [in Russian].

© А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, Л. И. Торгашова, 2018

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ВОЗМУЩЕНИЙ И НДС МАССИВА ПОРОД ВОКРУГ НЕГО ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ СМЕЩЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ. Ч. 2. ПОСТРОЕНИЕ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ

Анвар Исмагилович Чанышев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52, зав. кафедрой математики и естественных наук, тел. (383) 335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Ольга Евгеньевна Белоусова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-97-50, e-mail: o.e.belousova@mail.ru

Лариса Ивановна Торгашова

Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52, старший преподаватель кафедры математики и естественных наук, тел. (383)243-94-75, e-mail: aspirant_igd@mail.ru

Рассматривается динамическая задача теории упругости с заданными на границе полупространства граничными условиями (заданы одновременно и вектор напряжений Коши и вектор смещений, зависящие от координат поверхности и времени). Задание начальных условий при этом не предполагается. Требуется по граничным условиям задачи восстановить напряженно-деформированное состояние массива пород с определением в нем источника возмущений и интенсивности его воздействия. Строится конечно-разностный алгоритм решения задачи, программа для вычислений. Для проверки расчетной схемы используются результаты решения тестового примера. Показывается удовлетворительное согласие численного решения с аналитическим. Далее рассматривается задача с границей полупространства, свободной от напряжений и заданными на ней смещениями. Также определяется напряженно-деформированное состояние полупространства и источник возмущения в нем.

Ключевые слова: конечно-разностная схема, алгоритм, программа, напряжения на границе, смещения, интенсивность источника возмущения, уравнения теории упругости, численные и аналитические решения.

DETERMINATION OF THE POSITION OF SOURCE OF PERTURBANCY AND VAT THE ROCK MASSES ARE AROUND IT FROM THE DATA OF MEASUREMENTS OF OFFSETS ON THE EARTH'S SURFACE. P. 2. FINITE-DIFFERENCE SCHEME CONSTRUCTION

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Chief Researcher; Novosibirsk State University of Economics and Management, 52, Kamenskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Head of Mathematics and Natural Sciences Department, phone: (383)243-94-75, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Olga E. Belousova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)335-97-50, e-mail: o.e.belousova@mail.ru

Larisa I. Torgashova

Novosibirsk State University of Economics and Management, 52, Kamenskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Senior Lecturer, Department of Mathematics and Natural Sciences, phone: (383)243-94-75, e-mail: aspirant_igd@mail.ru

The article studies the dynamic problem of the elasticity theory with the given half-space boundary conditions (both the Cauchy stress vector and the displacement vector are defined simultaneously depending on the coordinates of the surface and time). The initial conditions are not assumed here. It is required by the boundary conditions of the problem to restore the stress-strain state of the rock mass with the definition of the disturbance source and its impact intensity. A finite-difference algorithm solving the problem is constructed as well as a program for calculations. To check the calculation scheme the results of the solution of the test example are used. A satisfactory agreement between the numerical solution and the analytical solution is shown. Then, the authors consider the problem with the stress-free boundary of a half-space with the specified shifts. Also, the stress-strain state of the half-space and the disturbance source in it are determined.

Key words: finite-difference scheme, algorithm, program, boundary stress, displacement, disturbance source intensity, elasticity theory equations, numerical and analytical solutions.

Введение

Решению поставленной задачи посвящено множество работ [1–12], в основе которых лежат данные, полученные с помощью аэрофотосъемки, GPS наблюдений, сканированию поверхностей. Для создания и изучения смещений на поверхности Земли создаются и изучаются сейсмические колебания [13–19].

Эта часть работы посвящена численному решению задачи для полупространства $z \leq R$, на границе которого задаются одновременно смещения u_x, u_y, u_z как функции координат $x, y, z = h$ и времени t и координаты вектора напряжений $\sigma_z, \tau_{zx}, \tau_{zy}$:

$$u_x = u_x(x, y, h, t), \quad u_y = u_y(x, y, h, t), \quad u_z = u_z(x, y, h, t), \quad (1)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{zx}(x, y, h, t), \quad \tau_{zy} = \tau_{zy}(x, y, h, t), \quad \sigma_z = \sigma_z(x, y, h, t). \quad (2)$$

Целью решения является определение НДС массива пород, заключенного в полупространстве $z \leq h$ при условиях (1), (2), определения структуры массива пород (есть ли в нем пустоты, жесткие включения), отыскания в нем источников динамических возмущений.

Разработка численного алгоритма и вычислительной схемы

Для решения задачи имеем уравнения равновесия:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xt}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{xt}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}, \end{cases} \quad (3)$$

соотношения Коши:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right), \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right), \\ \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right), \\ \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \end{cases} \quad (4)$$

закон Гука:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y - \nu \sigma_z), \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x - \nu \sigma_z), \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu \sigma_x - \nu \sigma_y), \\ \varepsilon_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{2\mu}, \\ \varepsilon_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{2\mu}, \\ \varepsilon_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{2\mu}. \end{cases} \quad (5)$$

Рассмотрим схему решения. Поскольку u_x, u_y, u_z заданы на поверхности $z=0$, то отсюда следует. Что на поверхности $z=0$ задана деформация ε_{xy} и, следовательно, напряжение τ_{xy} . Из того, что задано u_x определяется деформация $\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}$. Из того, что задано смещение u_y , находим деформацию $\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}$. Далее при известных $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \sigma_z$ из первых двух уравнений (5) находятся напряжения σ_x, σ_y :

$$\sigma_x = \frac{\sigma_z(v^2 + v) + E\varepsilon_x + Ev\varepsilon_y}{1 - v^2}, \quad \sigma_y = \frac{\sigma_z(v^2 + v) + Ev\varepsilon_x + E\varepsilon_y}{1 - v^2}. \quad (6)$$

При известных $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ из третьего уравнения (5) находится деформация ε_z :

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z(1 - 3v^2 - 2v^3) - E\varepsilon_x(v + v^2) - E\varepsilon_y(v + v^2)}{E(1 - v^2)}. \quad (7)$$

Поскольку заданы при $z=0$ напряжения τ_{xz}, τ_{yz} . То в соответствии с последними двумя уравнениями (5) находятся деформации $\varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$. Затем рассматривается система уравнений (4). При известных на границе $z=0$ деформациях $\varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_z$ и известных смещениях, т. е. при известных производных $\frac{\partial u_z}{\partial x}, \frac{\partial u_z}{\partial y}$ далее находятся производные $\frac{\partial u_x}{\partial z}, \frac{\partial u_y}{\partial z}, \frac{\partial u_z}{\partial z}$. Интегрированием этих выражений находятся смещения u_x, u_y, u_z на $z = h - h_z$:

Для определения напряжений $\tau_{xz}, \tau_{yz}, \sigma_z$ на этом слое интегрируем дифференциальные уравнения равновесия (1). Из первого уравнения (3) находим

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}, \quad (8)$$

из второго уравнения

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y}, \quad (9)$$

из третьего

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_t}{\partial t^2} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}. \quad (10)$$

Таким образом, в результате интегрирования указанных уравнений находим значение величин $u_x, u_y, u_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \sigma_z$ на слое $z = h - h_z$ [20–21]. Процесс вычислений продолжается по изложенной выше схеме.

Проверка расчетной схемы

В качестве тестового примера берутся значения $u_x, u_y, u_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \sigma_z$ полученные из решения задачи заглубленного источника (часть 1 данной статьи). Зависимости $u_x, u_y, u_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \sigma_z$ представлены на рис. 1–3. При этом

$$u_x|_{z=h} = C_1 \left(\sin \left(\frac{\lambda h}{\cos \left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)} \right) \right) / \left(\frac{\lambda h}{\cos \left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)} \right)^2 -$$

$$- \cos \left(\frac{\lambda h}{\cos \left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)} \right) / \lambda^2 \times$$

$$\times \sin(\lambda a t) \sin \left(\sqrt{x^2 + y^2} / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \cos x / \sqrt{x^2 + y^2}; \quad (11)$$

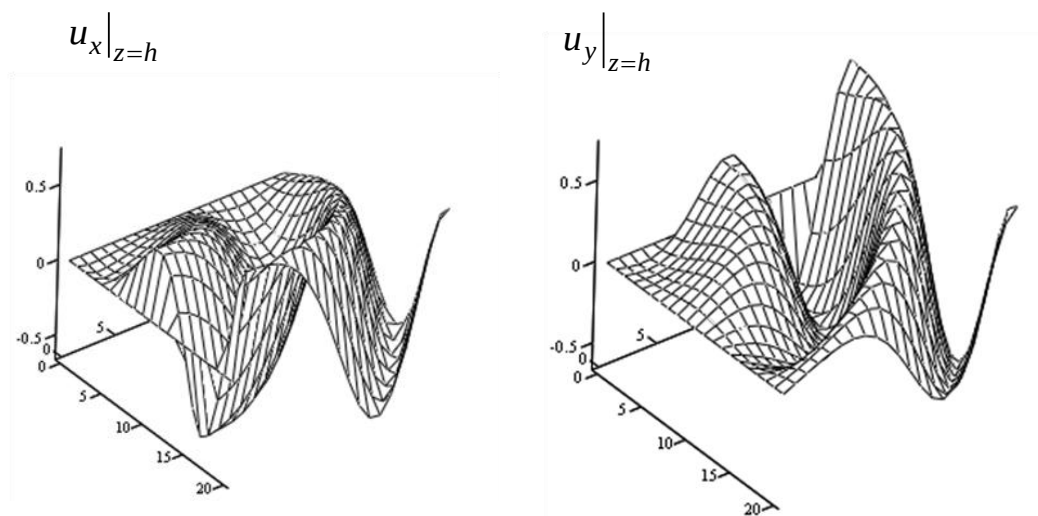


Рис. 1. Зависимость смещений u_x, u_y, u_z от координат на поверхности заглубленного источника, рассчитанного по формулам (11), (12)

$$\begin{aligned}
u_y|_{z=h} = & C_1 \left(\sin \left(\frac{\lambda h}{\cos \left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)} \right) \right) / \left(\frac{\lambda h}{\cos \left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)} \right)^2 - \\
& - \cos \left(\frac{\lambda h}{\cos \left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)} \right) / \lambda^2 \times \\
& \times \sin(\lambda a t) \sin \left(\sqrt{x^2 + y^2} / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \sin x / \sqrt{x^2 + y^2}; \quad (12)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_z|_{z=h} = & C_1 \left(\sin \left(\frac{\lambda h}{\cos \left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)} \right) \right) / \left(\frac{\lambda h}{\cos \left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)} \right)^2 - \\
& - \cos \left(\frac{\lambda h}{\cos \left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)} \right) / \lambda^2 \times \sin(\lambda a t) \cos \left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right); \quad (13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{zx}|_{z=h} = & \frac{C_1 \lambda \sin(\lambda a t)}{2(1+\nu)} \left(\frac{3 \cos \left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)}{\lambda^2 (x^2 + y^2 + z^2)} + \frac{3 \sin \left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)}{\left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)^3} + \right. \\
& \left. + \frac{\sin \left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)}{\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \cos \left(2z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \cos x / \sqrt{x^2 + y^2}; \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{zy}|_{z=h} = & \frac{C_1 \lambda \sin(\lambda a t)}{2(1+\nu)} \left(\frac{3 \cos \left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)}{\lambda^2 (x^2 + y^2 + z^2)} + \frac{3 \sin \left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)}{\left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)^3} + \right. \\
& \left. + \frac{\sin \left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)}{\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \sin \left(2 \sqrt{x^2 + y^2} / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \sin \left(x / \sqrt{x^2 + y^2} \right); \quad (15)
\end{aligned}$$

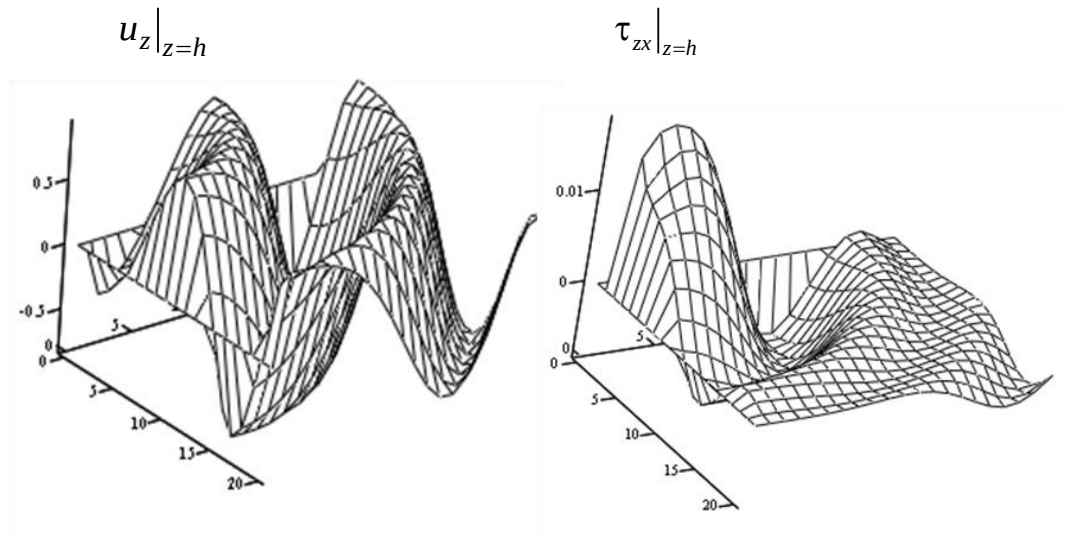


Рис. 2. Зависимость смещений u_z и напряжений τ_{xz} от координат на поверхности заглубленного источника, рассчитанного по формулам (13), (14)

$$\begin{aligned}
 \sigma_z|_{z=h} = & \frac{C_1 \lambda \sin(\lambda a t)}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\frac{2(1-2\nu) \cos\left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)}{\lambda^2 (x^2 + y^2 + z^2)} - \right. \\
 & \left. - \frac{2(1-2\nu) \sin\left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)}{\left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)^3} + \frac{(1-\nu) \sin\left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)}{\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \times \\
 & \times \cos^2\left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right) + \frac{C_1 \lambda \sin(\lambda a t)}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\frac{(1-2\nu) \sin\left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)}{\left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)^3} - \right. \\
 & \left. - \frac{(1-2\nu) \cos\left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)}{\lambda^2 (x^2 + y^2 + z^2)} + \frac{(\nu \sin\left(\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right))}{\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \times \\
 & \times \sin^2\left(\sqrt{x^2 + y^2} / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right). \tag{16}
 \end{aligned}$$

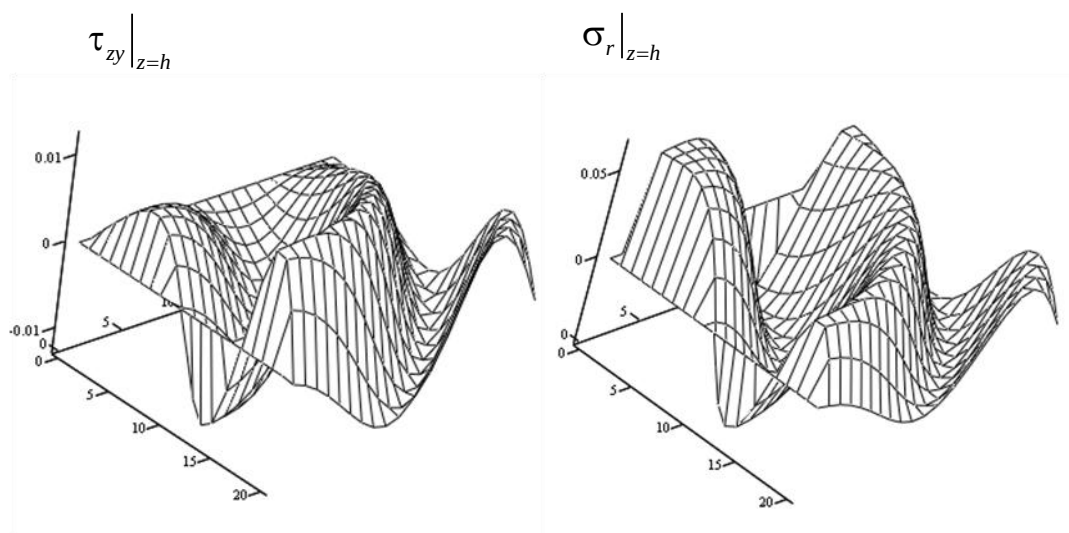


Рис. 3. Зависимость напряжений τ_{yz}, σ_z от координат на поверхности заглубленного источника, рассчитанного по формулам (15), (16)

На основе алгоритма, представленного выше в виде соотношений (6)–(10), разработана конечно-разностная программа численного счета, позволяющая находить НДС массива пород внутри полупространства при любых граничных условиях (1)–(2). Процедура вычислений носит характер томографических снимков, когда напряжения, деформации и смещения определяются послойно. Сделаны сопоставления расчетных зависимостей по данному алгоритму с тестовыми, полученными при возбуждении полупространства одиночным сферическим источником. Получено хорошее совпадение расчетных и тестовых значений, что позволяет использовать эту программу для расчетов других (реальных) ситуаций.

Заключение

Разработан алгоритм решения задачи об определении источника возмущений в полупространстве по заданным одновременно на его границе векторе напряжений Коши и векторе смещений. Сделана проверка расчетной схемы.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090002-5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Antipov, A.V. (2010). Ground point classification using molding filter in TERRASOLID / Antipov, A., Martemyanova, O. // International summer Student Seminar. – Pages 18–22. Novosibirsk.
2. Ayrapetian, V.S. (2006). IR lidar based on OPO / Hakobyan, A.V., Apresyan, G.M., Poghosyan, E.M., Sahakyan, A.N., Sargsyan, K.A. & Sargsyan T.K.// SPIE. – V. 6160. – Pages 708–713.

3. Chujkova, N.A., Nasonova, L.P. & Maximova, T.G. The new method to find the anomalous internal structure of terrestrial planets and its test on the earth // *Proceedings International Association of Geodesy Symposia*. Volume 144, 2016, Pages 209–219. 3rd International Gravity Field Service. Shanghai. China.
4. Chujkova, N.A., Kazaryan, S.A. & Maximova, T.G. (2003). The Earth's crust: The global structure of the boundaries and their connection // *Vestnik Moskovskogo Universita. Ser. 3 Fizika Astronomiya* № 2, Pages 55–62.
5. Jin, S., van Dam, T. & Wdowinski, S. (2014). A Tikhonov regularization method to estimate Earth's oblateness variations from global GPS observations // *Journal of Geodynamics* 79. – Pages 23–29.
6. Jin, S., van Dam, T. & Wdowinski, S. (2013). Observing and understanding the Earth system variations from space geodesy // *Journal of Geodynamics* 72. – Pages 1–10.
7. Mikhailov, V.O., Gordin, V.M., Timoshkina, E.P., Kiseleva, E.A. & Smolyaninova, E.I. (2007). Geodynamic models and their application in the combined interpretation of geological and geophysical data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* Volume 43, Issue 1, January 2007, Pages 2–12.
8. Тимофеев В. Ю., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В., Бойко Е. В. Поля смещений Алтае-Саянского региона и эффективные реологические параметры земной коры // *Геология и геофизика*. 2014. – Т. 55, № 3. – С. 481–497.
9. Timofeev, V.Y., Kalish, E.N., Ardyukov, D.G., Valitov, M.G., Timofeev, A.V., Stus, Y.F., Kulinich, R.G., Nosov, D.A., Sizikov, I.S. & Ducarme, B. (2017). Gravity observation at continental borderlands // *Geodesy and Geodynamics*, Volume 8, № 3. Pages 193–200.
10. Протасов М.И., Чеверда В.А., Правдухин А.П., Исаков Н.Г. Трехмерная анизотропная миграция данных 3D сейсморазведки на основе Гауссовых пучков // *Технологии сейсморазведки*. – 2017. – №1. – С 35-47.
11. Костин В. И., Лисица В. В., Решетова Г. В., Чеверда В. А. Локальное пространственно-временное измельчение сеток для конечно-разностного моделирования упругих волн в трехмерно-неоднородных разномасштабных средах // *Сибирский журнал вычислительной математики*. – 2013. – Т. 16 (1). – С. 45–65.
12. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V. & Tcheverda, V.A. (2016). Statistical analysis of free-surface variability's impact on seismic wavefield. // *Proceedings of 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences*. Pages 434–438. Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences. Saint Petersburg. Russian Federation.
13. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V., Tcheverda, V.A., Alexandrov, D. & Bakulin, A. (2015). Effect of surface sand topography changes on repeatability of land Seismic data in desert environment // *Proceedings of 77th EAGE Conference and Exhibition 2015: Earth Science for Energy and Environment* 2015. Pages 1400–1404. 77th EAGE Conference and Exhibition 2015: Earth Science for Energy and Environment. Madrid. Spain
14. Castro C.E., Kaser M., & Toro, E.F. (2009). Space-time numerical methods for geophysical applications // *Philosophical Transactions of the Royal Society: series A*. – № 367. – Pages 4613–4631.
15. Diaz, J. & Grote, M.J. (2009). Energy conserving explicit local time stepping for second-order wave equations // *SIAM J. Scientific Comput.* – Vol. 31, iss. 3. – Pages 1985–2014.
16. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V., Reshetova, G.V., Vishnevsky, D.M. & Tcheverda, V.A. (2013). Hybrid algorithm for simulation of seismic wave propagation in complex media – Anisotropy, attenuation, multi-scale // *Proceedings of 75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers* 2013, Pages 5634–5638. 75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference

and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers. London. United Kingdom.

17. Fei, T.V. & Liu, Q. (2005). Wave equation migration for 3D VSP using phase-shift plus interpolation // Society of Exploration Geophysicists.

18. Тимошкина Е. П., Леонов Ю. Г., Михайлов В. О. Формирование системы горное сооружение – предгорный прогиб: геодинамическая модель и ее сопоставление с данными по северному Предкавказью // Геотектоника. – 2010. – № 5. – С. 3–21.

19. Mikhailov, V.O., Smolyaninova, E.I. & Sebrier, M. (2002). Numerical modeling of neotectonic movements find the state of stress in the North Caucasus foredeep // Tectonics, 21. Pages 7-1 – 7-14.

20. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М., 1977. – 656 с.

21. Чанышев А. И., Вологин Д. А. Определение напряженно-деформированного состояния и дефективности массива пород по данным измерений смещений на его поверхности. Ч.1: построение аналитических решений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 4. – С. 3–11.

REFERENCES

1. Antipov, A.V. (2010). Ground point classification using molding filter in TERRASOLID / Antipov, A., Martemyanova, O. // *International summer Student Seminar*. – Pages 18–22. Novosibirsk.

2. Ayrapetian, V.S. (2006). IR lidar based on OPO / Hakobyan, A.V., Apresyan, G.M., Poghosyan, E.M., Sahakyan, A.N., Sargsyan, K.A. & Sargsyan T.K. // *SPIE*. – V. 6160. – Pages 708–713.

3. Chujkova, N.A., Nasonova, L.P. & Maximova, T.G. (2016). The new method to find the anomalous internal structure of terrestrial planets and its test on the earth // *Proceedings International Association of Geodesy Symposia. Volume 144, Pages 209–219*. 3rd International Gravity Field Service. Shanghai. China.

4. Chujkova, N.A., Kazaryan, S.A. & Maximova, T.G. (2003). The Earth's crust: The global structure of the boundaries and their connection // *Vestnik Moskovskogo Universita. Ser. 3 Fizika Astronomiya № 2, Pages 55–62*.

5. Jin, S., van Dam, T. & Wdowinski, S. (2014). A Tikhonov regularization method to estimate Earth's oblateness variations from global GPS observations // *Journal of Geodynamics* 79. – Pages 23–29.

6. Jin, S., van Dam, T. & Wdowinski, S. (2013). Observing and understanding the Earth system variations from space geodesy // *Journal of Geodynamics* 72. – Pages 1–10.

7. Mikhailov, V.O., Gordin, V.M., Timoshkina, E.P., Kiseleva, E.A. & Smolyaninova, E.I. (2007). Geodynamic models and their application in the combined interpretation of geological and geophysical data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* Volume 43, Issue 1, Pages 2–12.

8. Timofeev, V.Y., Ardyukov, D.G., Timofeev, A.V. & Boyko, E.V. (2014). Polya smeshcheniy Altae-Sayanskogo regiona I effektivnye reologicheskie parametry zemnoy kory [The displacement fields of the Altai-Sayan region and the effective rheological parameters of the earth's crust] // *Geologiya I geofizika, Volume 5, № 3, Pages 481–497* [in Russian].

9. Timofeev, V.Y., Kalish, E.N., Ardyukov, D.G., Valitov, M.G., Timofeev, A.V., Stus, Y.F., Kulinich, R.G., Nosov, D.A., Sizikov, I.S. & Ducarme, B. (2017). Gravity observation at continental borderlands // *Geodesy and Geodynamics, Volume 8, № 3. Pages 193–200*.

10. Protasov, M.I., Tcheverda, V.A., Pravduhin, A.P. & Isakov, N.G. (2017). 3D anisotropic imaging of 3D seismic data on the basis on Gaussian beams // *Tekhnologii seysmorazvedki [Technologies of seismic prospecting], 1, 35–47*. [in Russian].

11. Kostin, V.I., Lisitsa, V.V., Tcheverda, V.A. & Reshetova, G.V. (2013). Finite difference simulation of elastic wave propagation through 3D heterogeneous multiscale media based on locally refined grids // *Numerical Analysis and Applications*, 6(1), 40–47.
12. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V. & Tcheverda, V.A. (2016). Statistical analysis of free-surface variability's impact on seismic wavefield. // *Proceedings of 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences*. Pages 434–438. Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences. Saint Petersburg. Russian Federation.
13. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V., Tcheverda, V.A., Alexandrov, D. & Bakulin, A. (2015). Effect of surface and topography changes on repeatability of land seismic data in desert environment // *Proceedings of 77th EAGE Conference and Exhibition 2015: Earth Science for Energy and Environment 2015*. Pages 1400–1404. 77th EAGE Conference and Exhibition 2015: Earth Science for Energy and Environment. Madrid. Spain.
14. Castro C.E., Kaser, M., & Toro, E.F. (2009). Space-time numerical methods for geophysical applications // *Philosophical Transactions of the Royal Society: series A*. – № 367. – Pages 4613–4631.
15. Diaz, J. & Grote, M.J. (2009). Energy conserving explicit local time stepping for second-order wave equations // *SIAM J. Scientific Comput.* – Vol. 31, iss. 3. – Pages 1985–2014.
16. Kolyukhin, D.R., Lisitsa, V.V., Reshetova, G.V., Vishnevsky, D.M. & Tcheverda, V.A. (2013). Hybrid algorithm for simulation of seismic wave propagation in complex media – Anisotropy, attenuation, multi-scale // *Proceedings of 75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers 2013*, Pages 5634–5638. 75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers. London. United Kingdom.
17. Fei, T.V. & Liu, Q. (2005). Wave equation migration for 3D VSP using phase-shift plus interpolation // *Society of Exploration Geophysicists*.
18. Timoshkina, E.P., Leonov, Y.G. & Mikhailov, V.O. (2010). Formirovaniye sistemy gornoye sooruzhenie – predgornyy progib: geodinamicheskaya model' i tyo sopostovleniye s dannymi po severnomu Predkavkazyu [The formation of the system is a mountain structure – piedmont deflection: the geodynamic model and its comparison with the data for the northern Ciscaucasia] // *Geotektonika*, № 5. Pages 3–21 [in Russian].
19. Mikhailov, V.O., Smolyaninova, E.I. & Sebrer, M. (2002). Numerical modeling of neotectonic movements and the state of stress in the North Caucasus foredeep // *Tectonics*, 21. Pages 7-1 – 7-14.
20. Samarsky, A.A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]*. Moscow: Nauka [in Russian].
21. Chanyshv, A.I. & Vologin, D.A. (2011). Determination of the stress-strain state and damages in a rock mass by the displacement measurements on its surface. Part I: Analytical solutions // *Journal of Mining Science* Volume 47, Issue 4. Pages 395–403.

© А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, Л. И. Торгашова, 2018

ВАРИАЦИЯ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ И ЕЕ УЧЕТ В РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧИ О ДВИЖЕНИИ ПРОБОЙНИКА

Анвар Исмагилович Чанышев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52, зав. кафедрой математики и естественных наук, тел. (383) 335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Ирина Валерьевна Гутарова

Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52, старший преподаватель кафедры математики и естественных наук, тел. (383)243-94-75, e-mail: max_ira@ngs.ru

Ирина Владимировна Фролова

Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52, старший преподаватель кафедры математики и естественных наук, тел. (383)243-94-75, e-mail: sten9@rambler.ru

Рассматривается движение пробойника в грунте, когда сила трения не является постоянной величиной, а зависит от координаты погружения. При этом различаются минимальное значение силы трения и максимальное. Исследуется вопрос о влиянии степени изменения этой реактивной силы (от минимального до максимального значений) на характер движения самого пробойника при заданной начальной его скорости. При этом анализируется влияние слагаемого, учитывающего вязкость, а также нарастание сил бокового давления вследствие внедрения пробойника в грунт. Для расчетов построена конечно-разностная схема типа крест со вторым порядком аппроксимации условий Коши на границе области интегрирования. Полученное численное решение сравнивалось с тестовым, при этом имеет место хорошее совпадение численного решения с аналитическим.

Ключевые слова: боковое давление, вязкость, грунт, пробойник, переменная сила трения, перемещение, закон движения.

CONTACT FRICTION VARIATION AND ITS ROLE IN A SOLUTION OF A PUNCH MOTION PROBLEM

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Chief Researcher; Novosibirsk State University of Economics and Management, 52, Kamenskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Head of Mathematics and Natural Sciences Department, phone: (383)243-94-75, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Irina V. Gutarova

Novosibirsk State University of Economics and Management, 52, Kamenskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Senior Lecturer, Department of Mathematics and Natural Sciences, phone: (383)243-94-75, e-mail: max_ira@ngs.ru

Irina V. Frolova

Novosibirsk State University of Economics and Management, 52, Kamenskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Senior Lecturer, Department of Mathematics and Natural Sciences, phone: (383)243-94-75, e-mail: sten9@rambler.ru

The article reviews motion of the punch in the ground when the friction force is not constant, but it depends on the submergence coordinate. In this case, the minimum and the maximum values of the friction force differ. The influence of the reaction force variation degree (from the minimum to the maximum values) on the punch motion at a given initial velocity is investigated. At the same time, the influence of the summand that takes viscosity into account is analyzed, as well as an increase in lateral pressure forces due to the introduction of a punch into the ground. A finite-difference scheme of a cross type is constructed with the second order of approximation of the Cauchy conditions at the integration domain boundary. The obtained numerical solution has been compared to the test one, and there is a good agreement between the numerical solution and the analytical one.

Key words: lateral pressure, viscosity, soil, punch, variable friction force, displacement, law of motion.

Введение

В горном деле сложилось представление о том, что все тела состоят из блоков. Блоки могут быть самых разных размеров – от нескольких десятков и сотен километров до мельчайших частиц в виде, например, наночастиц. В этой связи необходимо говорить о взаимодействии блоков, о том, как поведение одного блока влияет на поведение соседних [1–22]. Говоря о блоках, следует иметь в виду то, что блоки имеют поверхность, шероховатую поверхность, взаимодействующие блоки имеют поверхности разной шероховатости. Это означает, что при взаимодействии блоков будет проявляться коэффициент трения как что-то среднее, отражающее шероховатости контактирующих поверхностей. Традиционно коэффициент трения задается в виде некоторого постоянного числа. На самом деле он таковым может не являться – все зависит от координат точек соприкосновения одного блока с другим. В данной работе ставится задача определения влияния неоднородного распределения коэффициента трения на характер изменения пути движения одного блока по другому от времени t .

Постановка задачи

Представим себе следующую ситуацию. Пусть имеется тело с массой m , находящееся на горизонтальной поверхности (рис. 1). К телу прикладывается сила $\vec{F}$, действует реакция или сопротивление R , препятствующее движению. Пусть под действием силы $\vec{F}$ тело приобрело начальную скорость v_0 . Пусть на движущееся под действием сил инерции тело действуют сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ и сила вязкого трения $\vec{F}_{\text{в.тр}}$. Если сила трения $\vec{F}$ обуславливается только напряжени-

ем выступов на шероховатых поверхностях (как на рис. 2), то силу трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ возможно определить как

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -\lambda x \vec{i}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент пропорциональности, x – смещение, $\vec{i}$ – орт оси Ox . Отметим, что такой вид сопротивления свойственен упругости. Другое сопротивление, обусловленное наличием вязкого материала на контакте «тело-поверхность», может быть задано в виде

$$\vec{F}_{\text{в.тр}} = -\mu \dot{x} \vec{i}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент пропорциональности, $\dot{x}$ – скорость смещения тела вдоль контактной поверхности.

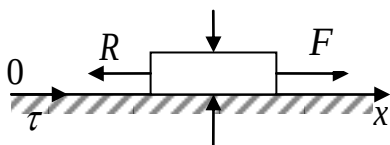


Рис. 1. Абсолютно твердое тело, движущееся по шероховатой поверхности

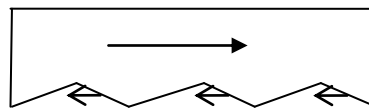


Рис. 2. Напряжение выступов на шероховатых поверхностях без перекосов одних выступов через другие

В совокупности с уравнением движения Ньютона из (1), (2) получаем уравнение для определения x :

$$m\ddot{x} = -\lambda x - \mu \dot{x}, \quad (3)$$

решение которого приводится и анализируется во многих работах, например [1–5].

В отличие от предыдущего будем считать, что уже процесс напряжения выступов на рис. 2 преодолен и теперь одно тело скользит по другому. В этом случае предельная сила трения постоянна и равна

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -mgk_{\text{тр}} \vec{i}, \quad (4)$$

где $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения скольжения. При этом вместо (3) необходимо решать следующее уравнение, вытекающее из уравнения движения Ньютона:

$$m\ddot{x} = -mgk_{\text{тр}} - \mu \dot{x}. \quad (5)$$

Для (5) поставим условия Коши:

$$x|_{t=0} = 0, \dot{x}|_{t=0} = v_0. \quad (6)$$

Решением (5) при условии (6) служит выражение

$$x = \frac{m}{\mu} (v_0 + gk_{\text{тр}} \frac{m}{\mu}) (1 - e^{-\frac{\mu t}{m}}) - gk_{\text{тр}} \frac{m}{\mu} t. \quad (7)$$

Время t_* , при котором происходит остановка тела, определяется формулой

$$t_* = \ln \left(\frac{v_0 + gk_{\text{тр}} \frac{m}{\mu}}{k_{\text{тр}} g \frac{m}{\mu}} \right)^{\frac{m}{\mu}}. \quad (8)$$

В отличие от предыдущего будем считать, что при движении исходного тела на него в поперечном направлении действует сила $m_0 g$ ($m_0 \neq m$) и коэффициент трения скольжения в (4) не является константой. Пусть он имеет переменный характер, зависящий от координат тела на поверхности скольжения:

$$k_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} (1 + B \sin \beta x), \quad (9)$$

где параметры B и β – постоянные, $|B| < 1$, $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения скольжения при $B = 0$. Можно допустить, что за счет подходящего выбора отношения масс m_0 / m , значений коэффициентов B и β возможно получить распределение трения вдоль пути движения блока массы m на рис. 1, близкое к реальному. Нас интересуют следующие вопросы: каково влияние коэффициентов B и β на зависимость смещения x от t . Отметим, что вид (9) распределения коэффициента трения вдоль оси x , взят только из-за простого решения задачи.

Реализация идеи

Для решения задачи имеем уравнение типа (5):

$$m\ddot{x} = -m_0 g k_{\text{тр}} (1 + B \sin \beta x) - \mu \dot{x}. \quad (10)$$

Учитывая (6), это уравнение при $t = 0$ приводит к условию:

$$(m\ddot{x})_{t=0} = -m_0 g k_{\text{тр}} - \mu v_0. \quad (11)$$

Для решения (10) используем конечно-разностную схему[23]:

$$\frac{x^{n+1} - 2x^n + x^{n-1}}{\tau^2} = -g \frac{m_0}{m} k_{\text{тр}} (1 + B \sin \beta x^n) - \frac{\mu}{m} \frac{x^{n+1} - x^{n-1}}{2\tau}. \quad (12)$$

Для определения значений x^0 и x^1 используем начальные условия (6) и формулу Тейлора:

$$x^1 = x^0 + \dot{x}|_{t=0} \tau + \frac{\ddot{x}}{2} \Big|_{t=0} \tau^2 + \dots \quad (13)$$

С применением (11) и (6) отсюда получаем

$$x^1 = v_0 \tau + \frac{1}{2} \left(-g \frac{m_0}{m} k_{\text{тр}} - \frac{\mu v_0}{m} \right) \tau^2.$$

Значения x^2 , x^3 и так далее получаются на основе (12):

$$x^{n+1} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\mu}{m} \frac{\tau}{2}\right)} \left\{ 2x^n - x^{n-1} - g \frac{m_0}{m} k_{\text{тр}} \tau^2 (1 + B \sin \beta x^n) + \frac{\mu}{m} x^{n-1} \frac{\tau}{2} \right\}. \quad (14)$$

На рис. 3 приведен график изменения x от времени t для разных значений β , B , и $k_{\text{тр}}$, при $\mu = 0,2$, $m = 150$ кг, $g = 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$, $n = 5$, $L = 5$. Линия 1 – $\beta = 0$, $B = 0$, и $k_{\text{тр}} = 0,5$; линия 2 – $\beta = 0$, $B = 0$, и $k_{\text{тр}} = 0,8$; линия 3 – $\beta = 1$, $B = 0,2$, и $k_{\text{тр}} = 1$; линия 4 – $\beta = 1$, $B = 0,2$, и $k_{\text{тр}} = 1$; линия 5 – $\beta = 0,7$, $B = -0,2$, и $k_{\text{тр}} = 1$.

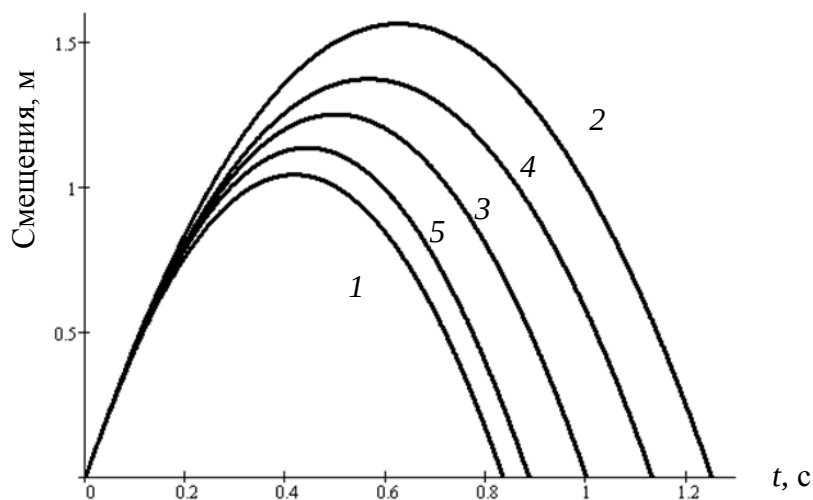


Рис. 3. Зависимость максимальной глубины проникания пробойника от времени для разных значений β , B , и $k_{\text{тр}}$

Как видно из рисунка глубина проникания пробойника при переменном трении находится в коридоре между глубиной проникновения при максимальном трении (линия 1) и при минимальном (линия 2).

Обсуждение результатов

Используем (10) для построения интеграла энергии. Умножим (10) на $\dot{x}$. В результате преобразований получаем тождество

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} m(\dot{x})^2 \right] = -mgk_{\text{тр}} \frac{dx}{dt} + \frac{mgk_{\text{тр}} B}{\beta} \frac{d \cos \beta x}{dt} - \mu \dot{x} \frac{dx}{dt}. \quad (15)$$

Умножая (15) на dt и интегрируя от $x = 0$ до значения $x = x_*$ (где произошла остановка тела), получим

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = mgk_{\text{тр}} x_* + \frac{mgk_{\text{тр}} B(1 - \cos \beta x_*)}{\beta} + \mu \int_0^{x_*} \dot{x} dx. \quad (16)$$

Как видно из (16), кинетическая энергия расходуется здесь на преодоление постоянного трения, на преодоление трения, вызванного изменением его в процессе движения, и на преодоление вязкого трения. Последнее зависит от того как меняется $\dot{x}$ в зависимости от x . Отметим, что коэффициент β в (15), (16) стоит в знаменателе и возникает такое подозрение, что при $\beta \rightarrow 0$ энергия, затрачиваемая на продвижение тела может неограниченно возрастать в связи с уменьшением β . Однако нетрудно видеть в (16), что это слагаемое становится пренебрежимо малым в следствие того, что при $\beta \rightarrow 0$ выражение $1 - \cos(\beta x)$ имеет следующий порядок малости $\beta^2 x_*^2 / 2$.

Заключение

Глубина проникания пробойника при синусоидальной зависимости силы трения находится в коридоре между глубиной проникновения при максимальном трении и при минимальном.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ (№ 18-05-00757 А).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Пороховский Н. Н., Гришин А. Н., Кулинич Н. А., Рублев Д. Е., Юшкин А. В. О влиянии массового взрыва в карьере строительного камня на формирование спектра сейсмических волн // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. № 5. С. 74–89.

2. Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Харлампенков И. Е. Фрактальный анализ траекторий миграции геодинамических событий в Кузбассе // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. № 3. С. 75–81.
3. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Чещин Д. О. Обоснование принципиальных схем отклоняющих устройств в установках горизонтального направленного бурения скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. № 3. С. 106–116.
4. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н. Согласование пневмоударного устройства с пневмотранспортной магистралью установок для бурения горизонтальных скважин в грунте // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. № 3. С. 119–126.
5. Опарин В. Н., Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н. Обоснование принципов построения конструктивной схемы подземной ракеты // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. № 5. С. 44–56.
6. Александрова Н. И., Шер Е. Н. Распространение волн в двумерной периодической модели блочной среды. Ч. 1: особенности волнового поля при действии импульсного источника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. № 6. С. 57–68.
7. Александрова Н. И., Айзенберг-Степаненко М. В., Шер Е. Н. Моделирование распространения упругих волн в блочной среде при импульсном нагружении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2009. № 5. С. 21–32.
8. Александрова Н. И., Шер Е. Н., Черников А. Г. Влияние вязкости прослоек на распространение низкочастотных маятниковых волн в блочных иерархических средах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2008. № 3. С. 3–13.
9. Aleksandrova, N.I. (2014). Asymptotic formulae for the Lommel and Bessel functions and their derivatives // Royal Society Open Science Volume 1, Issue 2, October 2014, № 140176, 8 p.
10. Jentschura, U.D. & Lötstedt, E. (2012). Numerical calculation of Bessel, Hankel and Airy functions // Computer Physics Communications Volume 183, Issue 3, March 2012, Pages 506–519.
11. Gil, A., Segura, J. & Temme, N.M. (2011). Basic methods for computing special functions // Recent Advances in Computational and Applied Mathematics, Pages 67–121.
12. Makarov, V.V., Guzev, M.A., Odintsev, V.N. & Ksendzenko, L.S. (2016). Periodical zonal character of damage near the openings in highly-stressed rock mass conditions // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Volume 8, Issue 2, 1 April 2016, Pages 164–169.
13. Guzev, M.A. & Makarova, N.V. (2004). Experimental and theoretical investigation of concrete fracture on the basis of energy criteria // Proceedings of the Sixth (2004) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium 2004, Pages 129–133. Sixth (2004) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium; Vladivostok; Russian Federation.
14. Guzev, M.A. (2014). Non-classical solutions of a continuum model for rock descriptions // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Volume 6, Issue 3, June 2014, Pages 180–185.
15. Saraikin, V.A., Chernikov, A.G. & Sher, E.N. (2015). Wave propagation in two-dimensional block media with viscoelastic layers (Theory and experiment) // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics Volume 56, Issue 4, 1 July 2015, Pages 688–697.
16. Sadovskii, V.M., Sadovskaya, O.V. & Varygina, M.P. (2013). Analysis of resonant excitation of a block medium on the basis of Cosserat moment continuum equations // *Radioelektron. Nanosist. Informats. Tekhnol.*, 5 (1), Pages 111–118.
17. Saraikin, V.A. (2010). Propagation of a low-frequency wave component in a model of a block medium // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics Volume 50, Issue 6, January 2010, Pages 1063–1070.
18. Чанышев А.И. Построение определяющих соотношений деформируемых сред при сложном нагружении на примере экспериментальных данных стали 40х // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. № 5. С. 44–50.
19. Chanyshchev, A.I., Belousova, O.E. & Abdulin, I.M. (2017). Static and dynamic overdetermined problems in elasticity, plasticity and post-limit deformation // Journal of Physics:

Conference Series Volume 894, Issue 1, 22 October 2017, № 012121. All-Russian Conference with International Participation on Modern Problems of Continuum Mechanics and Explosion Physics: Dedicated to the 60th Anniversary of Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, MPCMEP 2017; Technopark Novosibirsk, Akademgorodok; Russian Federation.

20. Qi, C.Z., Li, K.R., Bai, J.P., Chanyshv, A.I. & Liu, P. (2017). Strain Gradient Model of Zonal Disintegration of Rock Mass near Deep-Level Tunnels // *Journal of Mining Science* Volume 53, Issue 1, 1 January 2017, Pages 21–33.

21. Bu, W., Liu, X., Tang, Y. & Yang, J. (2015). Finite element multigrid method for multi-term time fractional advection diffusion equations // *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 6 (1).

22. Buterin, S.A. (2018). On an inverse spectral problem for first-order integro-differential operators with discontinuities // *Applied Mathematics Letters*, – Volume 78. Pages 65–71.

23. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М. : Наука, 1983. – 616 с.

REFERENCES

1. Oparin, V.N., Yushkin, V.F., Porokhovskiy, N.N., Grishin, A.N., Kulinich, N.A., Rublev, D.E. & Yushkin, A.V. (2014). *Effect of large-scale blasting on spectrum of seismic waves in a stone quarry* // *Journal of Mining Science*. 2014. T. 50. № 5. Pages 865–877.

2. Oparin, V.N., Potapov, V.P., Giniyatullina, O.L. & Kharlampenkov, I.E. (2012). *Fractal analysis of geodynamic event migration paths in the Kuzbass area* // *Journal of Mining Science*. 2012. T. 48. № 3. Pages 474–479.

3. Danilov, B.B., Smolyanitsky, B.N. & Cheshchin, D.O. (2015). *Justification of basic diagrams of horizontal drilling deflectors* // *Journal of Mining Science*. 2015. T. 51. № 3. Pages 553–561.

4. Danilov, B.B. & Smolyanitsky, B.N. (2013). *Concerted operation of pneumatic percussion tool and air-aided chips removal line in horizontal hole drilling machines* // *Journal of Mining Science*. 2013. T. 49. № 3. Pages 459–464.

5. Oparin, V.N., Danilov, B.B. & Smolyanitsky, B.N. (2010). *"Underground rocket" design principles* // *Journal of Mining Science*. 2010. T. 46. № 5. Pages 536–545.

6. Aleksandrova, N.I. & Sher, E.N. (2010). *Wave propagation in the 2d periodical model of a block-structured medium. Part i: characteristics of waves under impulsive impact* // *Journal of Mining Science*. 2010. T. 46. № 6. Pages 639–649.

7. Aleksandrova, N.I., Ayzenberg-Stepanenko, M.V. & Sher E.N. (2009). *Modeling the elastic wave propagation in a block medium under the impulse loading* // *Journal of Mining Science*. 2009. № 5. Pages 427–437.

8. Aleksandrova, N.I., Sher, E.N. & Chernikov, A.G. (2008). *Effect of viscosity of partings in block-hierarchical media on propagation of low-frequency pendulum waves* // *Journal of Mining Science*. 2008. T. 44 № 3. Pages 225–234.

9. Aleksandrova, N.I. (2014). *Asymptotic formulae for the Lommel and Bessel functions and their derivatives* // *Royal Society Open Science* Volume 1, Issue 2, October 2014, № 140176, 8p.

10. Jentschura, U.D. & Lötstedt, E. (2012). *Numerical calculation of Bessel, Hankel and Airy functions* // *Computer Physics Communications* Volume 183, Issue 3, March 2012, Pages 506–519.

11. Gil, A., Segura, J. & Temme, N.M. (2011). *Basic methods for computing special functions* // *Recent Advances in Computational and Applied Mathematics*, Pages 67–121.

12. Makarov, V.V., Guzev, M.A., Odintsev, V.N. & Ksendzenko, L.S. (2016). *Periodical zonal character of damage near the openings in highly-stressed rock mass conditions* // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* Volume 8, Issue 2, 1 April 2016, Pages 164–169.

13. Guzev, M.A. & Makarova, N.V. (2004). *Experimental and theoretical investigation of concrete fracture on the basis of energy criteria* // *Proceedings of the Sixth (2004) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium 2004*, Pages 129–133. Sixth (2004) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium; Vladivostok; Russian Federation.

14. Guzev, M.A. (2014). *Non-classical solutions of a continuum model for rock descriptions* // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Volume 6, Issue 3, June 2014, Pages 180–185.
15. Saraikin, V.A., Chernikov, A.G. & Sher, E.N. (2015). *Wave propagation in two-dimensional block media with viscoelastic layers (Theory and experiment)* // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics Volume 56, Issue 4, 1 July 2015, Pages 688–697.
16. Sadovskii, V.M., Sadovskaya, O.V. & Varygina, M.P. (2013). *Analysis of resonant excitation of a block medium on the basis of Cosserat moment continuum equations* // Radioelektron. Nanosist. Informats. Tekhnol., 5 (1), Pages 111–118.
17. Saraikin, V.A. (2010). *Propagation of a low-frequency wave component in a model of a block medium* // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics Volume 50, Issue 6, January 2010, Pages 1063–1070.
18. Chanyshchev, A.I. (2014). *Construction of constitutive equations for deformable media under complex loading in terms of steel 40x test data* // Journal of Mining Science. 2014. T. 50. № 5. Pages 841–846.
19. Chanyshchev, A.I., Belousova, O.E. & Abdulin, I.M. (2017). *Static and dynamic overdetermined problems in elasticity, plasticity and post-limit deformation* // Journal of Physics: Conference Series Volume 894, Issue 1, 22 October 2017, № 012121. All-Russian Conference with International Participation on Modern Problems of Continuum Mechanics and Explosion Physics: Dedicated to the 60th Anniversary of Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, MPCMEP 2017; Technopark Novosibirsk, Akademgorodok; Russian Federation.
20. Qi, C.Z., Li, K.R., Bai, J.P., Chanyshchev, A.I. & Liu, P. (2017). *Strain Gradient Model of Zonal Disintegration of Rock Mass near Deep-Level Tunnels* // Journal of Mining Science Volume 53, Issue 1, 1 January 2017, Pages 21–33.
21. Bu, W., Liu, X., Tang, Y. & Yang, J. (2015). *Finite element multigrid method for multi-term time fractional advection diffusion equations* // International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 6 (1).
22. Buterin, S.A. (2018). *On an inverse spectral problem for first-order integro-differential operators with discontinuities* // Applied Mathematics Letters, – Volume 78. Pages 65–71.
23. Samarsky, A.A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]*. Moscow: Nauka [in Russian].

© А. И. Чанышев, И. В. Гутарова, И. В. Фролова, 2018

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЙ ВЫСОТЫ ОТВАЛА, СЛОЖЕННОГО ИЗ ГОРНЫХ ПОРОД

Анвар Исмагилович Чанышев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52, зав. кафедрой математики и естественных наук, тел. (383) 335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Геннадий Михайлович Подыминогин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, тел. (383)335-97-50, e-mail: podyminogin@gmail.com

Ольга Анваровна Лукьяшко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, инженер, тел. (383)335-97-50, e-mail: lykola@yandex.ru

Рассматривается отвал в виде усеченного конуса. Предполагается, что потеря устойчивости борта отвала происходит за счет веса вышележащих слоев, при этом вес этих слоев действует как штамп на горизонтальную поверхность. В результате пол штампом образуется пластическая область, имеющая один и тот же наклон к горизонтальной плоскости вне зависимости от размеров штампа. На этом пути определяется такое положение площадки под штампом, на которой давление (из-за веса вышележащих слоев) будет максимальным. Решая задачу о переходе материала под штампом в пластическое состояние, находим предельную нагрузку для штампа. Нагрузка определяется свойствами горной породы-сцеплением, углом внутреннего трения. При решении пластической задачи использовались результаты, полученные в работах Березанцева В.Г. Как результат сопоставления этих двух нагрузок получается зависимость максимально допустимой высоты отвала, в зависимости от угла наклона его борта, физико-механических свойств материала отвала.

Ключевые слова: отвал, угол наклона борта, максимальное давление, пластичность, предельная нагрузка, горная порода, максимально допустимая высота.

DETERMINATION OF THE MAXIMUM HEIGHT OF A ROCK DUMP

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Chief Researcher; Novosibirsk State University of Economics and Management, 52, Kamenskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Head of Mathematics and Natural Sciences Department, phone: (383)243-94-75, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Gennady M. Podymigin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, phone: (383)335-97-50, e-mail: podyminogin@gmail.com

Olga A. Luk'yashko

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Engineer, phone: (383)335 97 50, e-mail: lykola@yandex.ru

The paper studies a dump in the form of a truncated cone. It is assumed that the stability loss of the dump slope occurs due to the weight of the overlying layers, while the weight of these layers acts as a stamp on the horizontal surface. As a result, a plastic domain is formed under the stamp. The domain has the same slope to the horizontal plane, regardless of the stamp size. Then, the domain position under the stamp, at which the pressure (due to the weight of the overlying layers) will be maximum, is determined. By solving the problem of the material transition under the stamp into a plastic state we find the maximum load for the stamp. The load is determined by the properties of the rock-clutch and the angle of internal friction. For the solution of the plastic problem we have used the results obtained in the works of V.G. Berezzantsev. As a result of comparison of these two loads, the maximum allowed height of the dump is obtained, depending on the slope angle and physical and mechanical properties of the dump material.

Key words: dump, slope angle, maximum pressure, plasticity, ultimate load, rock, maximum allowed height.

Введение

Решению задач об устойчивости бортов карьеров и отвалов посвящено множество работ [1–21]. Практически во всех работах отмечается, что потеря устойчивости указанных объектов происходит за счет веса вышележащих слоев, вводится величина $H|_{90}$ – длина вертикальной трещины, образующейся в момент схода части борта карьера или отвала при потере устойчивости. Очевидно, что три события: вес вышележащих слоев, величина $H|_{90}$ и потеря устойчивости, связаны между собой. Вопрос – каким образом? Решение этого вопроса получим на примере оценки устойчивости отвала конусообразной формы.

Поиск сечения в отвале с максимальным давлением

Представим себе отвал в виде усеченного конуса так, как изображено на рис. 1. Пусть высота отвала есть величина H , радиус окружности в основании отвала обозначим как R , угол наклона борта отвала к плоскости основания представим в виде α . При этом будем иметь в виду, что скольжения при потере устойчивости борта отвала определяются некоторым углом β на рис. 1, зависящим от угла α , физико-механических характеристик массива пород таких как угол внутреннего трения.

Для определенности будем считать, что напряженно-деформированное состояние рассматриваемого отвала – осесимметричное. Ситуацию на рис. 1 исследуем в следующей интерпретации. Пусть имеется отвал высоты H , значение которой постепенно наращивается в следствии отсыпки. При каком-то значении $H = H_*$, произойдет нарушение устойчивости отвала. Задача заключается в определении значения H_* , при котором борт карьера обрушится. Чтобы определить значение H_* решим последовательно следующие две задачи: первая-определение высоты h в отвале на рис. 1, на которой находится площадка AD и на которой вследствие веса вышележащего конусообразного элемента

$ADNL$ давление максимально; вторая задача – определение пластической зоны под штампом, действующим на площадку AD .

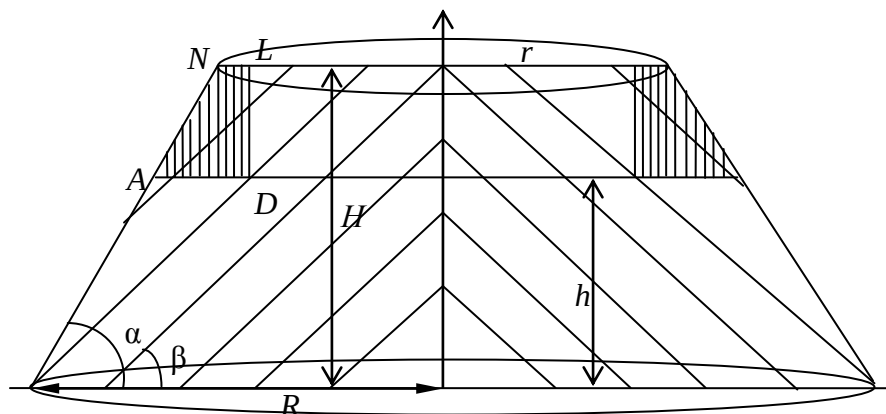


Рис. 1. Отвал горных пород с углом при основании α , с углом сдвижения пластической зоны β , радиусом основания R , высотой H

Решение первой задачи предполагает в первую очередь определение объема тороидального элемента $ADNL$. Этот объем вычисляется по формуле

$$V = \frac{1}{3}\pi(R - h \operatorname{ctg} \alpha)^2 (R \operatorname{tg} \alpha - h) - \frac{1}{3}\pi(R - H \operatorname{ctg} \alpha)^2 (R \operatorname{tg} \alpha - H) - \pi(H - h)(R - h \operatorname{ctg} \beta)^2. \quad (1)$$

В этом выражении три слагаемых: первое слагаемое соответствует объему «большого» конуса с радиусом основания $R - h \operatorname{ctg} \alpha$, второе слагаемое соответствует объему конуса, надстроенного над отвалом, третье слагаемое – это объем цилиндра с радиусом $R - h \operatorname{ctg} \beta$ и высотой $H - h$.

Формулу (1) перепишем с учетом обозначений

$$\frac{R}{H} = a, \quad \frac{h}{H} = x. \quad (2)$$

Тогда

$$\frac{V}{H^3} = \frac{1}{3}\pi(a - x \operatorname{ctg} \alpha)^2 (a \operatorname{tg} \alpha - x) - \frac{1}{3}\pi(a - \operatorname{ctg} \alpha)^2 (a \operatorname{tg} \alpha - 1) - \pi(1 - x)(a - x \operatorname{ctg} \beta)^2. \quad (3)$$

Определим площадь основания тора. Имеем

$$S = \pi(R - h \operatorname{ctg} \alpha)^2 - \pi(R - h \operatorname{ctg} \beta)^2. \quad (4)$$

С учетом (2) из (4) получаем

$$\frac{S}{H^2} = \pi x (\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg} \alpha) (2a - x \operatorname{ctg} \alpha - x \operatorname{ctg} \beta).$$

Найдем давление на площадку AD , оно пропорционально отношению

$$\frac{3V}{HS} = \frac{(a - x \operatorname{ctg} \alpha)^2 (a \operatorname{tg} \alpha - x) - (a - \operatorname{ctg} \alpha)^2 (a \operatorname{tg} \alpha - 1) - 3(a - x \operatorname{ctg} \beta)^2 (1 - x)}{(\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg} \alpha) (2a - x \operatorname{ctg} \alpha - x \operatorname{ctg} \beta) x}. \quad (5)$$

Далее, вычисляем производную по x и приравниваем ее к нулю. В итоге находим уравнение для определения x или h в зависимости от H :

$$B_4 x^4 + B_3 x^3 + B_2 x^2 + B_1 x + B_0 = 0, \quad (6)$$

где $B_4 = (3 \operatorname{ctg}^2 \beta - \operatorname{ctg}^2 \alpha)$,

$$B_3 = -4a(3 \operatorname{ctg}^2 \beta - \operatorname{ctg}^2 \alpha),$$

$$B_2 = 2a(5a \operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \beta - 2a \operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \alpha - 3 \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \beta),$$

$$B_1 = -2(\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \alpha) (a^3 \operatorname{tg} \alpha - (a - \operatorname{ctg} \alpha)^2 (a \operatorname{ctg} \alpha - 1) - 3a^2),$$

$$B_0 = 2a(a^3 \operatorname{tg} \alpha - (a - \operatorname{ctg} \alpha)^2 (a \operatorname{ctg} \alpha - 1) - 3a^2).$$

Вычисляя x из (6) и подставляя это значение в (5), находим с точностью до значения ρg величину максимального давления на площадке AD с известными углами наклонов α и β .

Следующая задача состоит в определении пластической зоны под штампом, действующим на площадку AD .

Решение задачи ищем в условиях осесимметрической деформации, для которой тензоры T_σ, T_ε имеют вид (7)

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_r & \tau_{rz} & 0 \\ \tau_{rz} & \sigma_r & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\varphi \end{pmatrix}; \quad T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_r & \varepsilon_{rz} & 0 \\ \varepsilon_{rz} & \varepsilon_r & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_\varphi \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Сделаем два замечания.

1. Как видно из рис. 1

$$H_{90} = H - h. \quad (8)$$

2. Угол β , определяющий направление сдвига неустойчивой массы отвала, находится из соотношения, следующего из нижеприведенного решения второй задачи

$$\operatorname{ctg} \beta = \operatorname{ctg} \alpha + \frac{\cos 2\mu}{\sin \alpha \sin \mu} e^{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \operatorname{ctg} 2\mu}, \quad (9)$$

где μ – угол внутреннего трения, α – угол наклона борта отвала.

Определение предельной нагрузки для потери устойчивости отвала

Установим теперь формулу (9) и связанные с ней другие зависимости, касающиеся отыскания предельной нагрузки на площадку AD с условием того, что под ней образуется пластическая зона, и определим еще одну зависимость, позволяющую находить максимально допустимую высоту отвала.

Рассмотрим рис. 2, где изображена структура пластической зоны под штампом, действующим на площадку AD .

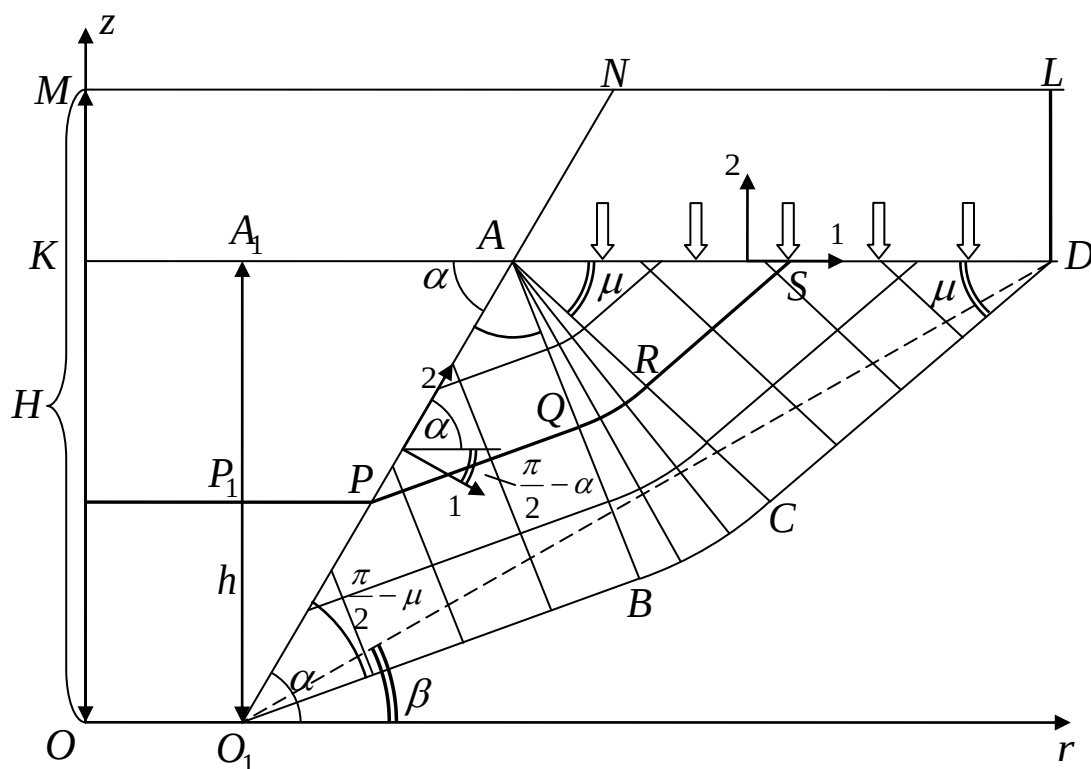


Рис. 2. Отвал с углом наклона α , с углом наклона пластической зоны β , с изображенными полями простых напряженных состояний O_1AB , BAC , CAD

Для решения задачи имеем уравнения равновесия

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{r} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = -\gamma_B \end{cases} \quad (10)$$

где γ_B – удельный вес.

Предполагается, что в зоне пластических деформаций выполняется условие полной пластичности. Условием пластичности здесь является условие Кулона – Мора. Если через θ обозначить угол между первым главным напряжением для тензора T_σ (и деформации T_ε !) и осью r , то характеристики системы дифференциальных уравнений (10) и условия пластичности Кулона – Мора будут следующие:

$$\lambda_1 = \operatorname{tg}(\theta + \mu), \quad \lambda_2 = \operatorname{tg}(\theta - \mu), \quad (11)$$

$\mu = \frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}$, где ψ – угол внутреннего трения. Соотношения на характеристиках

$$2d\theta + \frac{\sin 2\mu \cdot d\sigma}{\sigma \cdot \cos 2\mu + a} + \left[\frac{2 \cos \theta \cdot \sin \mu}{r \cdot \cos(\theta + \mu)} + \gamma_B \cdot \frac{\cos(\theta - \mu)}{(\sigma \cdot \cos 2\mu + a) \cdot \cos(\theta + \mu)} \right] \cdot dr = 0, \quad (12)$$

$$2d\theta - \frac{\sin 2\mu \cdot d\sigma}{\sigma \cdot \cos 2\mu + a} + \left[-\frac{2 \cos \theta \cdot \sin \mu}{r \cdot \cos(\theta - \mu)} + \gamma_B \cdot \frac{\cos(\theta + \mu)}{(\sigma \cdot \cos 2\mu + a) \cdot \cos(\theta - \mu)} \right] \cdot dr = 0. \quad (13)$$

Все основные линии изображены на рис. 2, из которого видно, что действительно угол наклона пластической области, определяемый значением β , зависит только от значений угла α и угла внутреннего трения μ .

Для нахождения предельной нагрузки начнем вычисления с границы O_1A . Борт отвала O_1A свободен от напряжений. Поскольку главные оси T_σ пронумерованы так, что $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, то первое главное направление перпендикулярно O_1A ($\sigma_1 = 0$, по двум другим главным направлениям материал сжат, $\sigma_2 < 0$, $\sigma_3 < 0$). Отсюда угол $\theta|_{O_1A} = -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$, где угол α – угол наклона борта отвала к оси r .

Далее предполагается, что угол θ постоянен во всем треугольнике O_1AD . Это означает, что $d\theta = 0$ в (12), (13).

Будем идти от контура O_1A к контуру AD на рис. 1. Проинтегрируем (12) вдоль характеристики, отвечающей числу λ_1 в (11). Имеем из (12) следующее дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\sin 2\mu \sigma'_r + \frac{2 \cos \theta \sin \mu (\sigma \cos 2\mu + a)}{\cos(\theta + \mu)} \frac{1}{r} + \gamma_B \frac{\cos(\theta - \mu)}{\cos(\theta + \mu)} = 0. \quad (14)$$

Общее решение (14) представляется в виде:

$$\sigma \cos 2\mu + a = \left(\frac{C}{r} \right) \frac{2 \cos \theta \sin \mu}{\cos(\theta + \mu) \operatorname{tg} 2\mu} - \gamma_B \frac{\cos(\theta - \mu)}{\cos(\theta + \mu)} \frac{r}{\operatorname{tg} 2\mu}, \quad (15)$$

где C – произвольная константа интегрирования. При r соответствующим границе O_1A ,

$$\sigma|_{O_1A} = -\frac{a}{2 \cos^2 \mu}$$

Отсюда и из (15) при данном значении r находим C .

Далее на рис. 2 следует центрированное поле BAC , в котором вводятся полярные координаты, отсчитываемые от точки A . При этом $r = r_A + \rho \cdot \cos \chi$, $z = h + \rho \cdot \sin \chi$, где r_A – абсцисса точки A на рис. 1, h – ее ордината. Рассматривая это поле, находим, что угол θ здесь можно считать равным

$$\theta = \chi + \mu, \quad (16)$$

где χ – полярный угол, изменяющийся в пределах $\alpha - \mu - \frac{\pi}{2} \leq \chi \leq -\mu$.

Из (16) следует $d\theta = d\chi$. Кроме того на основании уравнений для характеристик (11) получаем в центрированном поле два вида характеристик. С одной стороны, это пучок линий с уравнениями $\chi = \text{const}$, другие характеристики имеют вид логарифмических спиралей с уравнениями вида:

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{(\chi - \chi_0) \cdot \operatorname{ctg} 2\mu}, \quad (17)$$

где ρ_0 – произвольная константа. Теперь необходимо проинтегрировать соотношение (12) на характеристике (17) при условиях $r = r_A + \rho \cos \chi$, $d\theta = d\chi$,

$$dr = d\rho \cos \chi - \rho \sin \chi d\chi = \rho \frac{\cos(\chi + 2\mu)}{\sin 2\mu} d\chi \quad (\text{последнее условие следует из (17)}).$$

В итоге получается дифференциальное уравнение для определения σ следующего вида

$$2(\sigma \cos 2\mu + a) \left(1 + \frac{\cos \theta \sin \mu \cdot \rho \cos(\varphi + 2\mu)}{(r_A + \rho \cos \chi) \cos(\theta + \mu) \sin 2\mu} \right) + \\ + \sin 2\mu \sigma'_\chi + \gamma_B \frac{\cos(\theta - \mu) \rho \cos(\chi + 2\mu)}{\cos(\theta + \mu)} = 0. \quad (18)$$

Уравнение (18) – линейное дифференциальное уравнение первого порядка относительно функции $(\sigma \cos 2\mu + a)$ аргумента χ . Решая его, находим значение σ на границе AC .

В треугольнике ACD (см. рис. 1) принимаем величину θ опять константой, определяемой условиями на стороне AD . На этой стороне $\theta = 0$. Поэтому решением задачи в треугольнике ACD служит выражение, подобное (15), где $\theta = 0$.

Склеивая все эти решения, находим σ на AD и значение σ_z на AD по формуле:

$$\sigma_z = 2 \sin^2 \mu \sigma|_{AD} - a.$$

Естественно σ_z зависит от положения исходной точки на границе O_1A или на AD . Можно вычислить среднее значение σ_z на AD и приравнять его значению, которое соответствует максимальному давлению на площадке, полученному в первой части работы. Отсюда находится максимально допустимое значение высоты отвала, при котором он остается еще устойчивым.

Заключение

1. Разработана математическая модель потери устойчивого отвала конусообразной формы, в которой учитывается вес породы, физико-механические свойства, включая угол внутреннего трения породы.
2. Получено выражение для определения максимально допустимой высоты отвала с точки зрения безопасности ведения работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-00757А).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Frank, U. (2014). Multi-perspective enterprise modeling: Foundational concepts, prospects and future research challenges // *Software and Systems Modeling*, 13 (3), Pages 941-962.
2. Brown, C. (2012). Autonomous vehicle technology in mining // *Engineering and Mining Journal*, 213(1), Pages 30–32.
3. Hahn, S., Pastor, S. & Thompson, R. (2015). Development of mine haul road surfacing condition monitoring through digital image processing // *Engineering and Mining Journal*, 67(9), Pages 34–45.

4. Trubetskoy, K. N., Rylnikova, M. V., Vladimirov, D. Ya. & Pytalev, I. A. (2017). Provisions and prospects for introduction of robotic geotechnologies in open pit mining // *Gornyi Zhurnal* Issue 11, 1 November 2017, Pages 60-64.
5. Abroskin, A. S. (2015). Use of modern systems of automation of open cast mining // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 326 (12), Pages 122-130.
6. Frank, U. (2014). Multi-perspective enterprise modeling: Foundational concepts, prospects and future research challenges // *Software and Systems Modeling*, 13 (3), Pages 941-962.
7. Rylnikova, M. V., Yun, A. B. & Terentieva, I. V. (2015). Prospects and development strategy of Jezkazgan deposit // *Gornyi Zhurnal* Volume 2015, Issue 5, 2015, Pages 44-49.
8. Козырев А. А., Семенова И. Э., Рыбин В. В., Аветисян И. М. Особенности перераспределения полей напряжений при формировании глубокого карьера рудника “железный” ковдорского месторождения // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2015. № 4. С. 24-33.
9. Kozyrev, A. A., Rybin, V. & Konstantinov, K. (2015). Assessment result on geomechanical state of near-wall rock mass in open-pits of the kola region by integrated instrumental methods // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM* Volume 3, Issue 1, 2015, Pages 111-118. 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO, SGEM 2015; Albena; Bulgaria.
10. Stacy, T. R. (2007). Slope Stability in High Stress and Hard Rock Conditions // *Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open-pit Mining and Civil Engineering*, Pages 187-200. Perth, Australia.
11. Makarov, P. V. & Bakeev, R. A. (2015). Simulation of spallation life of metals in relation to operating stresses in the nanosecond loading time range // *AIP Conference Proceedings* Volume 1683, № 020134 International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2015. Tomsk; Russian Federation.
12. Шешенин С. В., Артамонова Н. Б., Фролова Ю. В., Ладыгин В. М. Определение упругих свойств и тензора передачи порового давления горных пород методом осреднения // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2015. № 4. С. 90-97.
13. Frolova Y. V. (2010). Patterns of transformations in the compositions and properties of Icelandic hyaloclastites during lithogenesis // *Moscow University Geology Bulletin*. T. 65. № 2. Pages 104-114.
14. Фролова Ю. В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения/учебное пособие. – М.: КДУ, 2015. – 222с.
15. Zhabko, A. V. (2013). Calculation theory of stability of foundations and slopes // *Proceedings XV International ISM Congress 2013*, Pages 85-97. 16 – 20 September 2013, Aachen, Germany.
16. Zhabko, A. V. (2015). Calculation of stability of inhomogeneous and anisotropic slopes / A. V. Zhabko, V. A. Gordeev // *Mez 278 2015 XXII. konference Společnosti důlních měřičů a geologů. Zasedání odborných komisí ISM. Praha. 24 – 26 června 2015*.
17. Жабко А. В. Расчет устойчивости откосов // *Маркшейдерия и недропользование*. – 2012. – № 2. – С. 55–59.
18. Мельников, Н. Н. Изменение геодинамического режима геологической среды при ведении крупномасштабных горных работ на глубоких карьерах / Мельников Н. Н., Козырев А. А. // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2015. – № 56. «Глубокие карьеры». С. 7-23.
19. Каспарьян Э. В. Геомеханические проблемы при открытых горных работах / Каспарьян Э. В., Козырев А. А. // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2015. – № 56. «Глубокие карьеры». С. 134-143.
20. Подыминогин Г. М., Чанышев А. И. Определение максимально допустимой высоты борта карьера по схеме жесткопластического тела // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2015. – № 3. С. 32-40.

21. Подыминогин Г. М., Чанышев А. И. Определение предельных параметров борта карьера в рамках осесимметричной модели жесткопластического деформирования горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 4. – С. 50-60.

REFERENCES

1. Frank, U. (2014). Multi-perspective enterprise modeling: Foundational concepts, prospects and future research challenges // *Software and Systems Modeling*, 13 (3), Pages 941–962.
2. Brown, C. (2012). Autonomous vehicle technology in mining // *Engineering and Mining Journal*, 213(1), Pages 30–32.
3. Hahn, S., Pastor, S. & Thompson, R. (2015). Development of mine haul road surfacing condition monitoring through digital image processing // *Engineering and Mining Journal*, 67(9), Pages 34–45.
4. Trubetskoy, K. N., Rylnikova, M. V., Vladimirov, D. Ya. & Pytalev, I. A. (2017). Provisions and prospects for introduction of robotic geotechnologies in open pit mining // *Gornyi Zhurnal Issue 11, 1 November 2017*, Pages 60–64.
5. Abroskin, A. S. (2015). Use of modern systems of automation of open cast mining // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 326 (12), Pages 122–130.
6. Frank, U. (2014). Multi-perspective enterprise modeling: Foundational concepts, prospects and future research challenges // *Software and Systems Modeling*, 13 (3), Pages 941–962.
7. Rylnikova, M. V., Yun, A. B. & Terentieva, I. V. (2015). Prospects and development strategy of Jezkazgan deposit // *Gornyi Zhurnal Volume 2015, Issue 5, 2015*, Pages 44–49.
8. Kozyrev, A. A., Semenova, I. E., Rybin, V. V. & Avetisyan, I. M. (2015). Stress redistribution in deep open pit mine zhelezny at kovdor iron ore deposit // *Journal of Mining Science*. 2015. T. 51. № 4. Pages 659–665.
9. Kozyrev, A. A., Rybin, V. & Konstantinov, K. (2015). Assessment result on geomechanical state of near-wall rock mass in open-pits of the kola region by integrated instrumental methods // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM Volume 3, Issue 1, 2015*, Pages 111–118. 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO, SGEM 2015; Albena; Bulgaria.
10. Stacy, T. R. (2007) . Slope Stability in High Stress and Hard Rock Conditions // *Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open-pit Mining and Civil Engineering*, Pages 187–200. Perth, Australia.
11. Makarov, P. V. & Bakeev, R. A. (2015). Simulation of spallation life of metals in relation to operating stresses in the nanosecond loading time range // *AIP Conference Proceedings Volume 1683, № 020134 International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2015*. Tomsk; Russian Federation.
12. Sheshenin S. V., Artamonova N. B., Frolova Y. V. & Ladygin V. M. (2015). Defining the elastic properties and the tensor of the pore-pressure transfer in rocks using the averaging method // *Moscow University Geology Bulletin. T. 70. № 4. Pages 354–361*.
13. Frolova Y. V. (2010). Patterns of transformations in the compositions and properties of Icelandic hyaloclastites during lithogenesis // *Moscow University Geology Bulletin. T. 65. № 2. Pages 104–114*.
14. Frolova Y. V. (2015). *Skal'nye grunty i metody ikh laboratornogo izucheniya [Laboratory Methods for the Study of Hard Rocks]* // Moscow: KDU [in Russian].
15. Zhabko, A. V. (2013). Calculation theory of stability offoundations and slopes // *Proceedings XV International ISM Congress 2013*, Pages 85–97. 16–20 September 2013, Aachen, Germany.

16. Zhabko, A. V. (2015). Calculation of stability of inhomogeneous and anisotropic slopes / A. V. Zhabko, V. A. Gordeev // *Mez 278 2015 XXII. konference Společnosti důlních měřičů a geologů. Zasedání odborných komisí ISM*. Praha. 24–26 června 2015.
17. Zhabko, A. V. (2012). Raschet ustoichivosti otkosov [Calculation of the stability of slopes] // *Marksheideriya I nedropolzovaniye*. – № 2, Pages 55–59 [in Russian].
18. Melnikov, N. N. (2015). Izmenenie geodinamicheskogo rezhima geologicheskoy sredy pri vedenii krupnomasshtabnykh rabot na glubokikh karyerakh [Changes in the geodynamic regime of the geological environment during the conduct of large-scale mining operations in deep quarries] / Melnikov, N. N. & Kozyrev A. A. // *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*. – 2015. -№ 56. “Glubokiye karyery”. Pages 7–23 [in Russian].
19. Kasparyan, E. V. Geomekhanicheskiye problem pri otkrytykh gornykh rabotakh [Geomechanical problems in open mining] / Kasparyan, E.V. & Kozyrev A.A. // *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*. – 2015. – № 56. “Glubokiye karyery”. Pages 134–143 [in Russian].
20. Podyminogin, G. M. & Chanyshchev, A. I. (2015). Estimate of maximum permissible height of pit wall based on a rigid-plastic model // *Journal of Mining Science*, – 2015, T. 51,- № 3, Pages 448–455.
21. Podyminogin, G. M. & Chanyshchev, A. I. (2015). Determination of ultimate pitwall parameters in axisymmetric rigid-plastic model of rocks // *Journal of Mining Science*, – 2015, T. 51,- № 4, Pages 679–688.

© А. И. Чанышев, Г. М. Подыминогин, О. А. Лукьяшко, 2018

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МОЛОТА ДЛЯ ЗАБИВАНИЯ В ГРУНТ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Владимир Васильевич Червов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, зав. лабораторией механизации горных работ, тел. (383)205-30-30, доп. 128, e-mail: chervov@misd.ru

Сделан краткий обзор оборудования, применяемого для забивания стальных элементов в грунт. Обоснованы основные параметры пневмомолота, предназначенного для забивания в грунт труб диаметром больше, чем 1 220 мм, с открытым концом. Описано устройство и особенности работы пневмомолотов с переменной структурой ударной мощности, имеющих в системе воздухораспределения упругий кольцевой клапан. На основе анализа многолетней эксплуатации оборудования для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций и для забивания вертикальных труб сделан прогноз о возможном появлении сложностей при создании крупногабаритного сверхтяжелого пневматического устройства ударного действия. Предложены принципы конструирования, а также возможные пути решения проблем, связанных с созданием пневмомолота с массой ударной части большей, чем 1 000 кг.

Ключевые слова: ударник, корпус, сжатый воздух, частота ударов, упругий клапан, масса.

DETERMINATION OF MAIN PARAMETERS OF PNEUMATIC HAMMER FOR DRIVING INTO SOIL PIPES OF LARGE DIAMETER

Vladimir V. Chervov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Head of Laboratory of Mining Mechanization, phone: (383)205-30-30, extension 128, e-mail: chervov@misd.ru

A brief overview of the equipment used to drive in steel elements into ground is provided. The basic parameters of the pneumatic hammer employed for plugging of pipes with a diameter greater than 1 220 mm and an open end into the ground are justified. The paper describes the design and operation aspects of pneumatic hammers with variable structure of shock power with a system of air distribution resilient annular valve. On the basis of the analysis of long-term operation of the equipment for trenchless laying of underground communications and for hammering of vertical pipes the forecast about possible emergence of difficulties at creation of the large-sized superheavy pneumatic device of shock action is made. The principles of construction, as well as possible ways of solving problems associated with the creation of a pneumatic hammer with a shock mass greater than 1 000 kg.

Key words: drummer, body, compressed air, frequency of impacts, elastic valve, mass.

В современных городских условиях строительство новых подземных коммуникаций невозможно без совершенствования бестраншейных технологий производства работ и создания новой техники. В тесных городских условиях прокладка коммуникаций при помощи пневматических ударных устройств

очень часто бывает безальтернативной. Создание пневмомолота с более высокими эксплуатационными характеристиками остается актуальным.

Самое известное и широко применяемое для бестраншейной прокладки пневматическое ударное устройство – пневмопробойник на протяжении многих десятилетий успешно образует горизонтальные и вертикальные скважины уплотнением грунта [1]; другое его назначение – это пневматический молот для забивания горизонтальных и вертикальных стальных элементов (труб и металлопроката) в грунт. Самая простая и удачная конструкция пневмопробойника была создана в ИГД СО РАН (рис. 1).

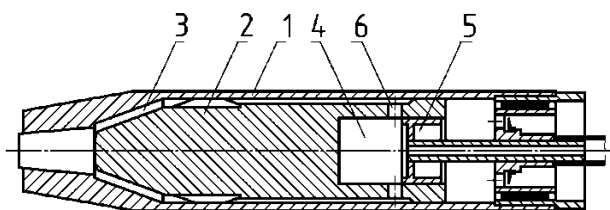


Рис. 1. Пневмопробойник

Пневмопробойник имеет простое устройство: корпус 1, ударник 2, камеру обратного хода 3, камеру прямого хода 4, воздушнораспределительную втулку 5, воздушнораспределительное отверстие 6. Сжатый воздух поступает из магистрали в камеру 4 и через отверстие 6 в камеру 3. Ударник перемещается назад за счет разности площадей. Выхлоп воздуха происходит через отверстие 6 при заднем положении ударника.

Потребитель всегда заинтересован в более высокой производительности машин при сохранении или снижении расхода воздуха. Это обеспечивает снижение эксплуатационных затрат при проведении работ. Исходя из этого, в ИГД СО РАН велись активные поисковые работы, нацеленные на создание нового поколения пневматических ударных машин с переменной структурой ударной мощности, которые должны иметь качественное отличие от своих аналогов. Принципиально новый тип воздушнораспределения с упругим кольцевым и инерционным клапаном был предложен в 1993 г. [2, 3].

На основе нового типа воздушнораспределения был создан и реализуется типоразмерный ряд пневмомолотов «Тайфун» с переменной структурой ударной мощности, самый большой из которых имеет массу ударника 1 000 кг. Их технические характеристики приведены в таблице.

В них достигнуты более высокие по сравнению с отечественными и зарубежными аналогами энергетические показатели и экономичность при одинаковых с ними массе и размерах. Так, например, для выполнения работы пневмопробойником М400 (ИГД СО РАН) или пневмомолотом КОЛОСС (Тракто-Техник, Германия) требуется расход воздуха 20 куб.м в мин. Пневмомолоту «Тайфун-740» с массой ударника 740 кг и энергий удара в 1,3–1,5 раза боль-

шей, чем у аналогов, при одинаковых геометрических размерах достаточно 7–10 куб. м в мин сжатого воздуха.

Таблица 1

Технические характеристики пневмомолотов «Тайфун»

Показатель	Тайфун 40*	Тайфун 70*	Тайфун 130*	Тайфун 140*	Тайфун 190	Тайфун 320	Тайфун 300*	Тайфун 500	Тайфун 740	Тайфун 1000
Энергия удара при давлении 0,6 МПа, Дж (верт.)	400 (450)	700 (800)	1300 (1450)	1370 (1350)	1800 (2150)	2800 (3500)	3000 (3500)	4000 (5000)	6000 (8000)	8300 (11500)
Частота ударов**, мин ⁻¹	126-350	150-250	180-228	220-336	120-175	65-125	114-174	60-115	60-90	42-65
Расход воздуха, м ³ /мин	3-6,3	4-6,3	6,5-8	6,5-9	5-7,5	5-9	5,7-10	6-11	8-12	11-18
Масса ударника, кг	40	70	130	140	190	320	300	500	740	1000
Масса машины, кг	90	140	280	300	380	650	700	1300	1750	2500
Габариты машины, мм:										
– длина	1000	1400	1350	1150	1680	1920	1380	1910	2620	2670
– диаметр корпуса	160	160	240	270	240	270	410	410	410	456
Наибольший*** диаметр забиваемых труб, мм	159	273	325	325	530	630	630	820	1020	1220

*Без инерционного клапана.

**Меньшее значение частоты ударов соответствует меньшему значению расхода воздуха.

***Применение рекомендуемых Ø труб гарантирует забивание труб длиной не менее 40 м.

Пневмомолот «Тайфун» с механическим замыканием упругого клапана показан на рис. 2.

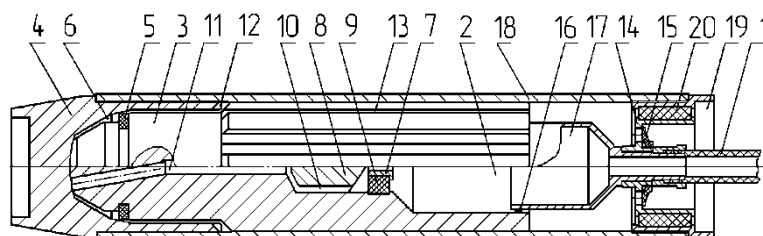


Рис. 2. Пневмомолот «Тайфун» с механическим замыканием упругого клапана:

1 – рукав; 2 – камера прямого хода; 3 – ударник; 4 – наковальня; 5 – резиновое кольцо; 6 – камера обратного хода; 7 – жиклер с калиброванным отверстием; 8 – инерционный клапан; 9 – резиновое седло клапана; 10 – канал; 11 – сквозное отверстие; 12 – пазы для выхлопа; 13 – канал; 14 – ступица; 15 – клапан; 16 – полиэтиленовое кольцо; 17 – патрубок; 18 – корпус; 19 – хвостовик; 20 – демпфер

Принцип действия пневмомолота. Сжатый воздух по рукаву 1 заполняет камеру прямого хода 2. Под действием давления в ней ударник 3 до упора в наковальню 4. Резиновое кольцо 5 касается внутренней конической поверхности наковальни 4 и закрывает сообщение камеры обратного хода (холостого) 6 с атмосферой. Сжатый воздух из камеры прямого хода 2 через калиброванное отверстие в жиклере 7 давит на клапан 8 и отодвигает его от седла 9. По каналу 10 и через сквозное отверстие 11 в ударнике 3 сжатый воздух поступает в камеру обратного хода 6. В ней повышается давление, под действием которого вследствие разности площадей ударник 3 совершает обратный ход. Резиновое кольцо 5 давлением воздуха прижимается к ударнику и к внутренней конической поверхности наковальни, растягивается в диаметре, скользит по ней и герметизирует камеру обратного хода 6. В конце обратного хода ударника резиновое кольцо оказывается на пазах 12 в конце наковальни 4. По этим пазам камера обратного хода 6 сообщается с атмосферой. Давление в ней падает, и под действием упругих сил деформации резиновое кольцо сжимается и уменьшается в диаметре. В образовавшийся между резиновым кольцом и внутренней поверхностью наковальни зазор устремляется весь поток сжатого воздуха из камеры обратного хода, по каналам 13 на ударнике, через отверстия в ступице 14 и клапан 15 в атмосферу. Давлением в камере прямого хода 2 ударник 3 перемещается в сторону наковальни и наносит по ней удар. При этом ударник 3 совершает ускоренное движение без противодействия, так как он вытесняет воздух из камеры обратного хода 6 в атмосферу. Перед ударом резиновое кольцо 5 приходит в соприкосновение с внутренней конической поверхностью наковальни 4.

Энергия удара при забивании расходуется, главным образом, на преодоление силы сопротивления движению трубы в грунте.

Сила сопротивления F при забивании трубы открытым концом в грунт складывается из трех составляющих: силы лобового сопротивления F_1 , силы трения F_2 по боковой поверхности вследствие обжатия окружающим грунтом трубу и сил трения $F_3 + F_4$ в результате действия веса грунтового керна.

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4.$$

Сила F_1 лобового сопротивления пропорциональна площади кольцевого сечения трубы, которая увеличивается как за счет диаметра d , так и за счет толщины δ стенки трубы.

$$F_1 = f(d; \delta).$$

Силы трения F_2 по боковой поверхности пропорциональны площади боковой поверхности трубы, поэтому зависят от диаметра трубы линейно.

$$F_2 = f(d).$$

Силы трения наружной поверхности горизонтально расположенной трубы о грунт F_3 от действия веса грунтового керна возрастают в квадратичной зависимости от диаметра трубы [4].

$$F_3 = f(d^2).$$

При забивании вертикальной трубы открытым концом в грунт силы трения по наружной поверхности от веса грунтового керна, расположенного внутри трубы, можно считать равными нулю $F_3 = 0$.

Силы трения внутренней поверхности горизонтально расположенной трубы о грунтовый kern F_4 также пропорциональны весу керна и квадрату диаметра трубы.

$$F_4 = f(d^2).$$

При забивании вертикальной трубы открытым концом в грунт силы трения по внутренней поверхности от веса грунтового керна определяются не только весом керна и квадратом диаметра трубы, но и высотой этого керна. Давление от веса керна на внутреннюю поверхность трубы распределяется неравномерно по ее длине: в нижней части оно максимально, в верхней части равно нулю. Поэтому при определении силы трения следует учитывать только половину от общего веса керна, который находится внутри погруженной в грунт трубы.

Соппротивление от действия веса грунтового керна с увеличением диаметра забиваемой трубы становится значительным. Поэтому виброударное продавливание как горизонтально расположенными трубами проходного сечения, так и, так и вертикальное погружение труб диаметром более 0,8 м необходимо сопровождать периодическим удалением грунтового керна из трубы. Это позволит уменьшить силу сопротивления F при забивании трубы открытым концом в грунт до двух составляющих F_1 и F_2 , которые зависят линейно от увеличения диаметра d трубы. Устранение сил трения $F_3 + F_4$, действующих от веса грунтового керна, позволяет использовать линейную зависимость энергии удара от диаметра трубы при выборе пневмомолота, требуемого для забивания трубы.

Номинальная длина горизонтальной трубной плети должна быть не менее 40 метров. При наличии нескольких пневмомолотов с разной энергией удара целесообразно забивание первой секции трубной плети начинать пневмомолотом с меньшей энергией удара и силой отдачи. Более мощный пневмомолот целесообразно применять при снижении скорости продвижения трубы в грунте до 1 м/час.

Исходя из многолетнего опыта прокладки стальных труб-кожухов [5] для подземных коммуникаций известно, что для забивания на эту длину стальной трубы открытым концом диаметром 1 420 мм необходим пневмомолот с энергией единичного удара примерно 12 кДж, а при диаметре 325 мм – 1,3 кДж.

Если принять линейную зависимость требуемой для забивания трубы энергии удара от ее диаметра в диапазоне 0,3–1,4 м с открытым концом, то

$$L = f(d_{\text{тр}}) = 9,7 \cdot d_{\text{тр}} - 1,6,$$

где L – требуемая энергия удара, кДж;

$d_{\text{тр}}$ – диаметр забиваемой трубы, м.

Для забивания в грунт трубы большого диаметра $d_{\text{тр}} = 1\,020$ мм потребуется энергия удара $L = 8,3$ кДж; для $2\,020$ мм – 18 кДж; для $2\,220$ мм – 20 кДж.

В качестве основного параметра пневмопробойника для забивания труб, созданного в ИГД СО РАН, была принята энергия удара [6–8]. По величине энергии удара можно спрогнозировать технические возможности данной машины по диаметру и длине забиваемой трубы, а также эксплуатационные требования расходу сжатого воздуха и мощности грузоподъемного механизма.

Энергия удара L (Дж) с зависимости от основных параметров пневмомолота определяется по формуле

$$L = Q / (q \cdot f), \quad (1)$$

где Q – секундный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

f – частота ударов, с^{-1} ;

q – удельный расход воздуха, $\text{м}^3/(\text{Вт} \cdot \text{с})$, для пневмопробойников СО-166, СО-144, ИП-4603, СО-134 и ИП-4605 – $q = (0,36 - 0,76) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{Вт} \cdot \text{с})$ [9]; для пневмомолотов «Тайфун» – $q = (0,22 - 0,29) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{Вт} \cdot \text{с})$ [10].

Масса ударника $M_{\text{уд}}$ при скорости соударения $V_{\text{уд}} = 4$ м/с будет равна

$$M_{\text{уд}} = \frac{2L}{V_{\text{уд}}^2}.$$

Для пневмомолота с энергией удара $L = 8,3$ кДж масса ударника составит $M_{\text{уд}} = 1\,000$ кг; для $L = 18$ кДж – $M_{\text{уд}} = 2\,250$ кг; для $L = 20$ кДж – $M_{\text{уд}} = 2\,500$ кг.

Соотношение C масс неподвижной части без присоединительной насадки и ударника $M_{\text{уд}}$ определится как

$$C = \frac{M - M_{\text{уд}}}{M_{\text{уд}}}.$$

Откуда общая масса M пневмомолота без присоединительной насадки определится

$$M = M_{\text{уд}}(C + 1).$$

Для пневмомолотов «Тайфун» соотношение $C = 1 - 1,7$. Для пневмомолота «Тайфун-1000» $C = 1,5$ при толщине стенки корпуса 31 мм. Для пневмомолота с массой ударника $M_{\text{уд}} = 1\ 000$ кг его общая масса составит $M = 2\ 500$ кг; для $M_{\text{уд}} = 2\ 500$ кг – $M = 6\ 250$ кг.

Наружный диаметр корпуса пневмомолота с массой ударника 2 500 кг, по сравнению с пневмомолотом «Тайфун-1000», потребует увеличения примерно в $\sqrt{2,5} \approx 1,6$ при условии сохранения длины рабочего хода ударника, равной 340 мм. Это составит 730 мм.

Многолетний опыт эксплуатации пневмомолотов показал, что срок службы корпусов из-за появления трещин примерно вдвое меньше срока появления трещины в ударнике. Для увеличения ресурса корпуса можно снизить уровень напряжений, возникающих в корпусе. Для этого в новом пневмомолоте с массой ударника больше, чем 1 000 кг, следует увеличить толщину стенок, что приведет к повышению прочности корпуса.

Для пневмомолота с $M_{\text{уд}} = 1\ 000$ кг и общей массой $M = 2\ 500$ кг увеличение толщины стенки корпуса на 10 мм (с диаметра 456 мм до 476 мм на длине 2 220 мм) приведет к увеличению массы корпуса на 250 кг, и общей массы пневмомолота до $M_+ = 2\ 750$ кг.

Для пневмомолота с $M_{\text{уд}} = 2\ 500$ кг и общей массой $M = 6\ 250$ кг увеличение толщины стенки корпуса на 10 мм (с диаметра 730 мм до 750 мм на длине 2 220 мм) приведет к увеличению массы корпуса на 400 кг, и общей массы пневмомолота до $M_+ = 6\ 650$ кг. При увеличении толщины стенки корпуса на 20 мм до 51 мм общая масса пневмомолота составит $M_{++} = 7\ 050$ кг при наружном диаметре корпуса 770 мм.

Но при увеличении толщины стенок увеличится нагрузка на резьбовое соединение корпуса 18 с наковальней 4 (рис. 2). Для защиты наковальни от преждевременного разрушения целесообразно применение конического соединения деталей 18 и 4 с коническим бандажом, установленным на наружную коническую поверхность корпуса 18. Технологическим недостатком такого решения является невозможность изготовления корпуса из толстостенной горячекатаной стальной высоколегированной трубы. Единичное и мелкосерийное изготовление корпуса с коническим соединением возможно только из поковки.

Энергия удара L (Дж) с зависимости от конструктивных параметров пневмомолота и среднего давления $\bar{p} = 0,5$ МПа в камере прямого хода во время разгона ударника [11].

$$L = \bar{p} \cdot X \cdot S_1 = \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot \bar{p} \cdot X ,$$

где X – длина рабочего хода ударника, м;

S_1 – площадь сечения камеры прямого хода, м²;

D_1 – диаметр камеры прямого хода, м.

Для пневмомолота с ударником массой 1 000 кг с длиной рабочего хода ударника $X = 0,34$ м энергия удара $L = 8\,300$ Дж обеспечивается при диаметре камеры прямого хода $D_1 = 0,25$ м.

Для пневмомолота с ударником массой 2 500 кг с длиной рабочего хода ударника $X = 0,35$ м энергия удара $L = 20\,000$ Дж обеспечивается при диаметре камеры прямого хода $D_1 = 0,38$ м.

Коэффициент хода ударника [11]

$$K_x = X / D_1.$$

Для ударника массой $M_{\text{уд}} = 1\,000$ кг составит $K_x = 1,36$; что соответствует длинноходовому пневмомолоту.

Для ударника массой $M_{\text{уд}} = 2\,500$ кг составит $K_x = 0,92$; что позволяет его определить, как короткоходовой пневмомолот. Например, короткоходовой пневмомолот «Тайфун-500» с массой ударника 500 кг имеет $K_x = 0,95$.

Частота ударов в пневмомолоте «Тайфун-500» находится в пределах: 1,1–1,9 Гц при горизонтальном расположении; 1–1,5 Гц при работе вертикально вниз. Рабочий ход ударника массой 500 кг равен 210 мм [12, 13].

Для пневмомолотов типа «Тайфун» нижняя граница частотных диапазонов обратно пропорциональна длине рабочего хода – чем больше ход, тем меньше частота и наоборот. Так для ударника массой 1 000 кг при длине рабочего хода 340 мм частотный диапазон составляет 0,7–1,1 Гц при горизонтальном положении. Отношение минимальных частот ударов и длин рабочего хода ударника составляет $1,1/0,7 \approx 340/210 \approx 1,6$.

Поэтому минимальная частота ударов пневмомолота с массой 2 500 кг составит около 0,7 Гц при длине рабочего хода 350 мм.

Для работы пневмомолота «Тайфун-2500» на минимальной частоте ударов $f_{\text{мин}} = 0,7$ Гц потребуется расход Q воздуха, который можно определить из формулы (1)

$$Q = L \cdot q \cdot f.$$

С учетом установленного в экспериментах удельного расхода воздуха $q = (0,22 - 0,29) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 / (\text{Вт} \cdot \text{с})$ [10], требуемый минимальный расход сжатого воздуха будет иметь значение в диапазоне: $Q = 18 - 24 \text{ м}^3 / \text{мин}$.

Максимальную частоту ударов и максимальный расход воздуха можно определить исходя из возможной степени C_f регулирования частоты ударов

$$C_f = f_{\text{max}} / f_{\text{min}}.$$

Можно рассмотреть два варианта степени регулирования C_f : для близкого по коэффициенту хода «Тайфун-500» – $C_f = 1,73$; и близкий по абсолютному значению длины хода «Тайфун-1000» – $C_f = 1,55$.

Для $C_f = 1,73$ частота $f_{\max} = 1,2$ Гц; расход воздуха 32–42 м³/мин.

Для $C_f = 1,55$ частота $f_{\max} = 1,1$ Гц; расход воздуха 29–38 м³/мин.

Выбранная степень регулирования для повышения частоты ударов может быть обеспечена простым увеличением калиброванного отверстия жиклера 7 (рис. 2).

В отличие от повышения частоты, снижение частоты ударов ниже минимальной границы частотного диапазона за счет простого уменьшения калиброванного отверстия жиклера 7 (рис. 2) можно обеспечить только ценой потери устойчивой работы пневмомолота на минимальной частоте ударов. Вследствие малой скорости движения ударника в крайнее заднее положение и недостаточного открытия выхлопных пазов наступит режим неполного выхлопа, который будет сопровождаться неритмичной («рваной») работой пневмомолота, и даже его остановкой.

Например, чтобы обеспечить работу пневмомолота «Тайфун-2500» с расходом сжатого воздуха 10 м³/мин, необходимо снизить частоту ударов до $f_{\min} = 0,3 - 0,4$ Гц. Для обеспечения работы на этой частоте ударов, которая вдвое меньше устойчивой минимальной частоты, потребуется введение на стадии проектирования значительных изменений к конструкции пневмомолота [14].

Величина открытия выхлопных пазов x_1 [15]

$$x_1 = (M_{\text{уд}} / (2 \cdot p \cdot S_1)) \cdot (X / (1/f - 2 \cdot X / V_{\text{уд}}))^2,$$

где $p = 0,6$ МПа – давление в камере обратного хода;

Расчетный заброс ударника массой 2 500 кг после открытия выхлопных пазов при частоте ударов $f_{\min} = 0,3 - 0,4$ Гц находится в пределах $x_1 = 0,2 - 0,4$ мм. Это недостаточно для выхлопа, так как экспериментально установленное значение открытия выхлопных пазов, при котором обеспечена минимальная устойчивая частота ударов пневмомолота «Тайфун», равна $x_1 = 0,7$ мм [13].

Основные способы расширения нижнего предела устойчивой ритмичной работы пневмомолота с упругим кольцевым клапаном на стадии проектирования заключаются в следующем:

1. Производится увеличение массы ударника для усиления кинетической энергии движущегося назад ударника и увеличения его заброса для большего открытия выхлопных пазов; это вызовет увеличение габаритов (длины) пневмомолота и уменьшение предударной скорости при сохранении энергии удара.

2. Обеспечивается уменьшение площади сечения камеры прямого хода для снижения сопротивления движению ударника назад путем сохранения рабочего объема этой камеры и увеличения коэффициента хода ударника K_x ; это изменит габаритные размеры пневмомолота – уменьшит диаметр и увеличит длину корпуса.

3. Для повышения ритмичности работы пневмомолота рекомендуется применить разворот упругого кольцевого клапана [16] в канавке ударника и выполнить постоянный дренаж в инерционном клапане [17].

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090003-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гурков К. С., Клиماشко В. В., Костылев А. Д. и др. Пневмопробойники. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 1990. – 217 с.
2. Патент РФ № 2105881. Устройство ударного действия. / Червов В. В., Трубицын В. В., Смоляницкий Б. Н., Вебер И. Э. – опубл. в Б. И. 1998, № 6.
3. Патент РФ № 2085363. Устройство ударного действия. / Червов В. В., Смоляницкий Б. Н., Трубицын В. В., Вебер И. Э. – опубл. в Б. И. 1997, № 21.
4. Бабаков В. А. Об одном варианте расчета движения пневмопробойника в грунте // Горные машины: сб. науч. тр. ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1980. – С. 80–84.
5. Гурков К. С., Клиماشко В. В., Костылев А. Д. и др. Новый типоразмерный ряд пневмопробойников // ФТПРПИ. – 1989. – № 4. – С. 61–65.
6. Смоляницкий Б. Н., Червов В. В., Скачков К. Б. Новые пневмоударные машины Института горного дела СО РАН // Механизация строительства. – 2001. – №12. – С. 7–12.
7. Петреев А. М., Примычкин А. Ю. Влияние типа системы воздухораспределения на энергетические показатели пневмоударного узла кольцевой ударной машины // ФТПРПИ. – 2015. – № 3. – С. 117–123.
8. Петреев А. М., Примычкин А. Ю. Работа кольцевого упругого клапана в пневмоударном приводе // ФТПРПИ. – 2016. – № 1. – С. 132–143.
9. Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Тупицын К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1985. – 134 с.
10. Червов В. В., Тищенко И. В., Червов А. В. Влияние элементов системы воздухораспределения пневмомолота с упругим клапаном на потребление энергоносителя // ФТПРПИ. – 2009. – № 1. – С. 41–47.
11. Червов В. В., Смоляницкий Б. Н. Экспериментальная оценка диапазона изменения энергетических параметров пневмомолота с механическим замыканием упругого клапана // ФТПРПИ. – 2016. – № 5. – С. 92–98.
12. Тищенко И. В. Виброударное продавливание и комбинированный способ очистки труб от грунтового керна // Строительные и дорожные машины. – 2013. – № 11. – С. 39–42.
13. Червов В. В. Минимальная частота ударов пневмомолота с упругим клапаном в системе воздухораспределения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – № 3. – Т. 2 – С. 217–221.
14. Тищенко И. В. Модели пневматических импульсных генераторов с переменной структурой ударной мощности // Известия вузов. Строительство. – 2014. – № 3. – С. 79–87.
15. Червов В. В. Основы конструирования пневмомолота для бестраншейной прокладки коммуникаций // Проблемы и перспективы развития горных наук: международная конференция, 1–5 ноября 2004. – Новосибирск. – С. 127–132.
16. Патент РФ № 2462575. Устройство ударного действия. / Червов В. В., Смоляницкий Б. Н., Трубицын В. В., Червов А. В., Тищенко И. В. – опубл. в Б. И. 2012, № 27.
17. Патент РФ № 2400350. Устройство ударного действия / Червов В. В., Смоляницкий Б. Н., Трубицын В. В. – опубл. в Б. И. 2010, № 27.

REFERENCES

1. Gurkov, K. S., Klimashko V. V., Kostylev, A. D. and others. – Novosibirsk: publishing house of Institute of mining SB RAS, 1990. – 217 p.
2. The patent of the Russian Federation № 2105881. The device of shock action. / Chervov V. V., Trubitsyn V. V., Smolyanitsky B. N., Weber I. E. – publ. in B. I., 1998, № 6.
3. The patent of the Russian Federation № 2085363. The device of shock action. / Chervov V. V., Smolyanitsky B. N., Trubitsyn V. V., Weber I. E. – publ. in B. I., 1997, № 21.
4. Babakov V. A. About one version of the calculation of the movement of the pneumatic in the ground // Mining machines: collection of proceedings MINING INSTITUTE OF USSR ACADEMY OF SCIENCES. – Novosibirsk, 1980. – P. 80–84.
5. Gurkov K. S., Klimashko V. V., Kostylev A. D. and others. New standard series of punches // Journal of mining science. – 1989. – No. 4. – P. 61 – 65.
6. Smolyanitsky B. N., Chervov V. V., Skachkov K. B. New air percussion machines of the Institute of mining of SB RAS //Mechanization of construction. – 2001. – No. 12. – P. 7–12.
7. Petreev A. M., Primychkin A. Y. Effect of the type of system the air distribution on the energy performance of a hammer unit in a circular drum machines // Journal of mining science. – 2015. – No. 3. – P. 117–123.
8. Petreev A. M., Primychkin A. Y. Work annular elastic valve in a pneumatic impact actuator // Journal of mining science. – 2016. – No. 1. – P. 132–143.
9. Sudnishnikov B. V., Esin N. N., Tupitsyn K. K. Study and design of pneumatic machines percussion. – Novosibirsk: Science, 1985. – 134 p.
10. Chervov V. V., Tishchenko I. V., Chervov A.V. Influence of the system elements of air distribution pneumatic hammer with an elastic valve on the energy carrier // Journal of mining science. – 2009. – No. 1. – P. 41–47.
11. Chervov V. V., Smolyanitsky B. N. Experimental evaluation of the range of variation of the energy parameters of pneumatic hammer with elastic mechanical closure of the valve // Journal of mining science. – 2016. – No. 5. – P. 92–98.
12. Tishchenko I. V., Vibro-impact extrusion and a combined method of cleaning tubes from the soil core removal // Construction and road machines. – 2013. – No. 11. – P. 39–42.
13. Chervov V. V. The minimum frequency of the blows of pneumatic hammer with elastic valve in air distribution system // Fundamental and applied problems of mining Sciences. – 2016. – No. 3. – Vol. 2 – P. 217–221.
14. Tishchenko I. V. Models of the pneumatic pulse generators with variable structure of the shock power // News universities. Construction. – 2014. No. 3. – P. 79–87.
15. Chervov V. V. Fundamentals of pneumatic hammer design for trenchless laying of communications // Problems and prospects of mining Sciences: international conference, 1–5 November 2004. – Novosibirsk. – P. 127– 32.
16. The patent of the Russian Federation № 2462575. The device of shock action. / Chervov V. V., Smolyanitsky B. N., Trubitsyn V. V., Chervov A. V., Tishchenko I. V. – publ. in B. I., 2012, № 27.
17. The patent of the Russian Federation № 2400350. The device of shock action. / Chervov V. V., Smolyanitsky B. N., Trubitsyn V. V. – publ. in B. I., 2010, No. 27.

© B. B. Червов, 2018

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ДОЛОТ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН С ОДНОВРЕМЕННОЙ ОБСАДКОЙ

Илья Олегович Шахторин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, тел. (923)399-32-68, e-mail: Scorpion22@bk.ru

Статья содержит описание технологии бурения скважин с одновременной обсадкой, применяемой в горной промышленности, а также в гражданском строительстве. В работе обосновывается актуальность данной технологии и ее преимущества. Приведено описание оборудования, применяемого при бурении с одновременной обсадкой. Выполнен анализ конструкций специальных долот, используемых при бурении с одновременной обсадкой, изложен принцип их действия, отмечены особенности, достоинства и недостатки. Обоснована актуальность повышения качества очистки забоя от бурового шлама при бурении глубоких скважин. Создана математическая модель бурового долота в скважине, позволяющая исследовать параметры потока очистного агента в забойной зоне скважины. С использованием разработанной модели, исследовано влияние расположения продувочных отверстий долота на качество очистки забоя скважины. Определены рациональные параметры системы продувки забоя долота, позволяющие обеспечить эффективную очистку забоя скважины, тем самым повысить скорость бурения.

Ключевые слова: бурение, буровое долото, одновременная обсадка, бурение на воду, пневмоударник.

ANALYSIS OF CONSTRUCTION BIT FOR DRILLING WELLS WITH SIMULTANEOUS CASING

Il'ya O. Shakhtorin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Junior Researcher, phone: (923)399-32-68, e-mail: Scorpion22@bk.ru

The article contains a description of the well drilling technology with simultaneous casing, used in the mining industry, as well as in civil engineering. The work proves the relevance of this technology and its advantages. The description of the equipment used in drilling with simultaneous casing is given. The analysis of the construction of special bits used in drilling with simultaneous casing, the principle of their operation, the features, advantages and disadvantages are noted. The urgency of improving the quality of bottomhole cleaning from drill cuttings while drilling deep wells is substantiated. A mathematical model of a drill bit in a borehole has been created, which makes it possible to study the flow parameters of a cleaning agent in the downhole zone of a well. Using the developed model, the influence of the location of the blowing holes of the bit on the quality of bottomhole cleaning was investigated. The rational parameters of the bottom hole blowdown system are determined, which allow to ensure efficient cleaning of the bottom of the borehole, thereby increasing the drilling speed.

Key words: drilling, drill bit, simultaneous casing, water well drilling, pneumatic punch.

Введение

Проходка скважин в сложных горно-геологических условиях и обсадка их трубами – одна из сложнейших и трудоемких задач, как в горнорудной промышленности, так и в гражданском строительстве. При работе в неустойчивых слабых грунтах существует опасность обрушения стенок пробуренной скважины и как следствие, невозможность установки обсадных труб. Кроме того, существует опасность потери в скважине бурового инструмента без возможности его поднятия на поверхность [1, 2].

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 производить бурение с использованием пневмоударника, но при этом существует необходимость одновременной обсадки скважины. Системы с одновременной обсадкой показывают хорошие результаты при фундаментных работах, они обеспечивают высокую производительность, даже если грунт содержит валуны, бетонные блоки и техногенные включения [3–5].

Основные потребители разрабатываемых технологии и инструмента – строительно-монтажные организации, предприятия по разработке и добыче полезных ископаемых, предприятия геологоразведки и инженерной геологии, в меньшей степени предприятия нефтегазового комплекса [6, 7].

Принципиально система бурения с одновременной обсадкой состоит из специального забурника, установленном в одном корпусе с оригинальным эксцентриковым механизмом (рис. 1) [8].

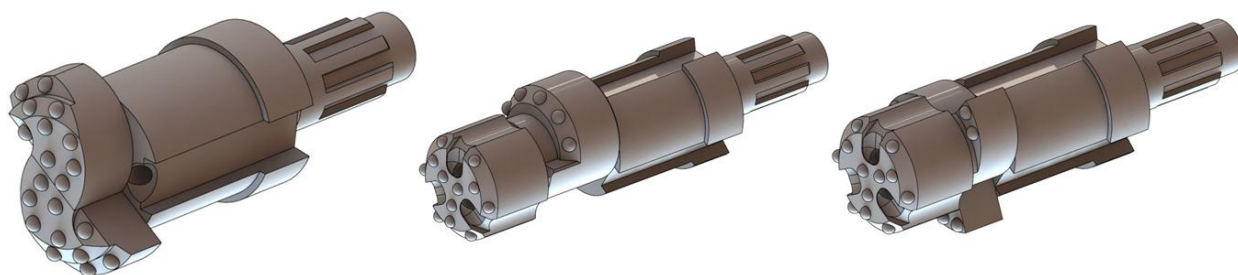


Рис. 1. Долота для бурения с одновременной обсадкой

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 (рис. 2) [9].

В рабочем положении расширитель разбуривает скважину до требуемого диаметра для обсадной трубы, спускающейся в скважину под действием собственного веса и от вибрации ударно-вращательного механизма. После окончания

бурения одним поворотом буровой штанги в противоположном направлении расширитель складывается в транспортное положение, и через обсаженную трубами скважину буровой снаряд поднимается на поверхность [10, 11].

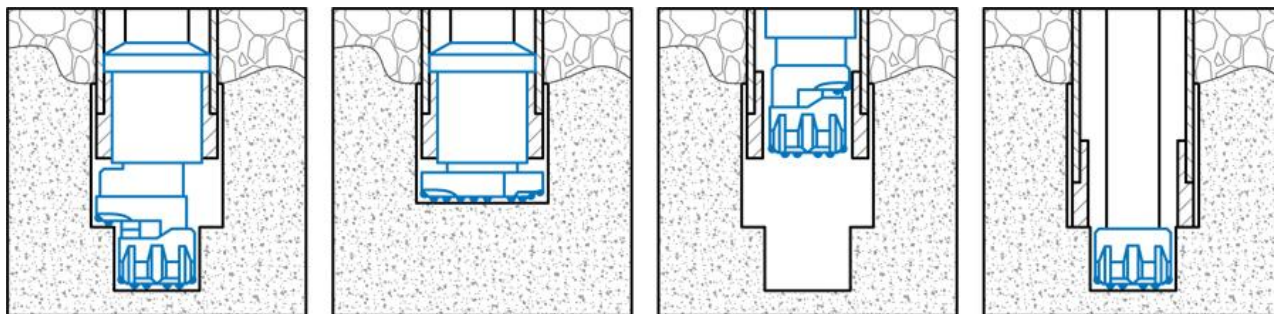


Рис. 2. Принцип работы долота

На сегодняшний день на рынке существуют предложения по долотам для бурения с одновременной обсадкой, но результаты внимательного рассмотрения этих предложений показали, что практически все поставщики предлагают продукцию одного производителя – шведской компании «Атлас Копко» (Atlas Copco) [12]. Реже встречаются предложения по инструменту других производителей, например, финской компании «ROBIT ROCKTOOLS Ltd» [13].

Институтом горного дела СО РАН (ИГД СО РАН им. Н.А. Чинакала) разработаны три типа долот для бурения и одновременного обсаживания скважин в неустойчивых грунтах и горных породах, позволяющих существенно уменьшить время проходки скважины и исключить обрушение ее стенок [14].

Принцип работы разработанного оборудования заключается в том, что бурение осуществляется погружными пневмоударниками со специальным породоразрушающим инструментом, который за счет оригинальной конструкции обеспечивает диаметр бурения больший по отношению к диаметру обсадной трубы. После завершения бурения породоразрушающий инструмент изменяет свои габаритные размеры до внутреннего диаметра обсадной трубы и может быть беспрепятственно извлечен из скважины. При необходимости, дальнейшее бурение в крепких породах можно производить с помощью обычного инструмента [15].

Важнейшей составляющей технологий разведки и разработки месторождений полезных ископаемых, их добычи, как подземным, так и открытым способами является бурение скважин в породном массиве. Перспективы развития буровой техники связаны с ориентацией предприятий горного комплекса на улучшение показателей извлечения полезного ископаемого, повышение безопасности горных работ, особенно в условиях увеличения глубин разработки, развитие эффективных технологий добычи нетрадиционного углеводородного сырья [16].

В настоящее время и в обозримом будущем наиболее эффективным способом проходки скважин в массиве горных пород является ударно-вращательный, обеспечивающий бурение с минимальной энергоемкостью.

Актуальной задачей является повышение скорости бурения скважин ударно-вращательным способом. Одним из вариантов достижения поставленной цели является повышение эффективности очистки забойной зоны от бурового шлама, что позволит получать буровой шлам более крупной фракции, исключить его переизмельчение, и повысить скорость бурения.

Эксперименты

Эффективная очистка забоя от бурового шлама является важной составляющей при ударно-вращательном способе бурения. Увеличение скорости движения очистного агента в забойной зоне положительно сказывается на скорости бурения.

С целью повышения эффективности процесса очистки забоя от бурового шлама при пневмоударном бурении с одновременной обсадкой выполнено исследование влияния параметров продувочной системы долота на скорость движения очистного агента в забойной зоне скважины [17].

В среде Solidworks Flow Simulation создана математическая модель долота, применяемого для бурения с одновременной обсадкой, производства компании Atlas Copco. С использованием метода конечных объемов, определена скорость движения очистного агента в различных участках забойной зоны (рис. 3).

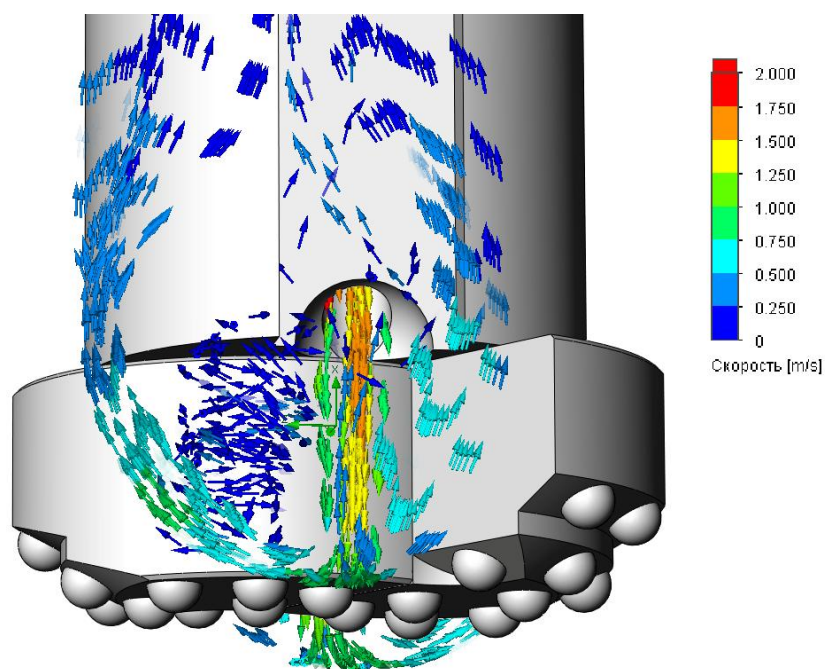


Рис. 3. Распределение воздушных потоков в забойной зоне долота стандартной конструкции

Проанализировав рис. 3, можно заметить, что очистной агент охватывает не всю площадь забоя скважины, также возникают вихревые потоки, препятст-

вующие очистке. Скорость очистного агента заметно снижается по мере удаления от забоя скважины [18].

Выполнено исследование влияния расположения воздухоподводящего и выносного каналов, в результате которого найдены рациональные параметры системы продувки долота (рис. 4), реализация которых позволяет обеспечить повышение скорости движения очистного агента, а также исключить вихревые потоки, препятствующие очистке забоя. Повышение скорости движения очистного агента положительно сказывается на процессе очистки забоя, что повышает скорость бурения скважин [19].

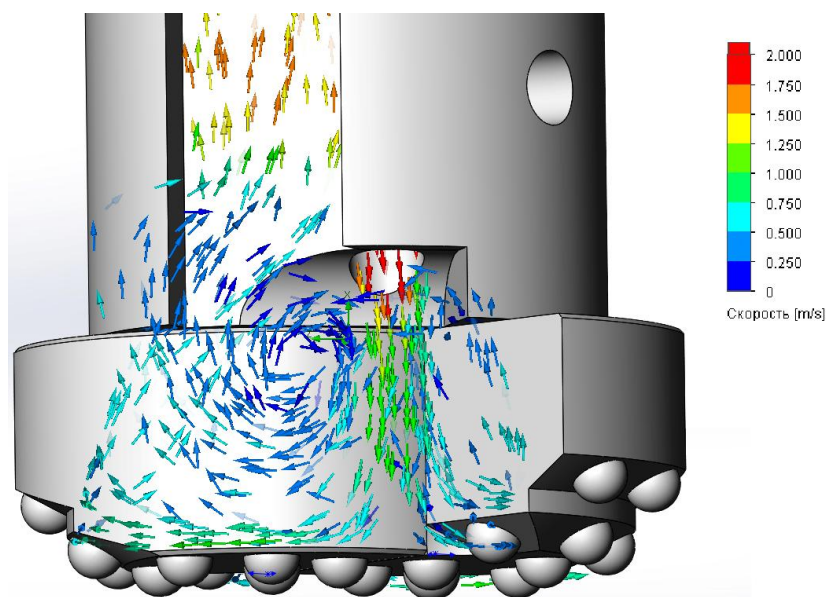


Рис. 4. Изменение расположения воздухоподводящего и выносного каналов

Определена зависимость средней скорости движения очистного агента в забойной зоне от угла α , определяющего расположение воздухоподводящего и выносного каналов (рис. 5) [20].

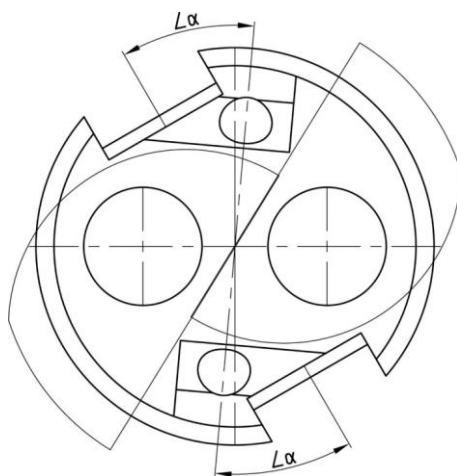


Рис. 5. Расположение воздухоподводящего и выносного каналов

Обсуждение

В ходе исследования определялась средняя скорость движения очистного агента в забойной зоне при различных значениях угла α . По результатам исследования построен график зависимости средней скорости движения очистного агента в забойной зоне от угла α (рисунок 6). Проанализировав данный график, можно сделать вывод, что рациональным значением угла α является 35 градусов, при данном значении обеспечивается максимальная скорость движения очистного агента [21, 22].



Рис. 6. Зависимости средней скорости движения очистного агента в забойной зоне от угла α

Заключение

В ходе работы выполнено исследование влияния параметров продувочной системы долота на скорость движения очистного агента в забойной зоне скважины. С использованием метода математического моделирования, найдены рациональные параметры системы продувки забоя долота для бурения с одновременной обсадкой, позволяющие обеспечить эффективную очистку забоя скважины, тем самым повысить скорость бурения.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории бурения и технологических импульсных машин ИГД СО РАН им. Н.А. Чинакала за активное участие в работе и помощь в проведении исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахторин И. О. Определение параметров погружного пневмоударника // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 199–204.
2. Шахторин И. О. Доводка машин ударного действия при помощи современного программного обеспечения // ФПВГН. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 72–77.
3. Тимонин В. В., Смоленцев А. С., Полушин Н. И., Лаптев А. И., Шахторин И. О. Анализ причин износа рдс-долот и способы повышения их износостойкости // ФПВГН. – 2016. – Т. 2, № 3. – С. 177–183.
4. Шахторин И. О. Обоснование параметров погружного пневмоударника малого диаметра // ФПВГН. – 2016. – Т. 2, № 3. – С. 228–233.
5. Тимонин В. В., Алексеев С. Е., Кокоулин Д. И. Создание системы воздухораспределения погружного пневмоударника для расширенного диапазона рабочего давления // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 283–288.
6. A – Z of DTH drilling // Halco Rock Tools. – 05.2016 – pp.76.
7. Фокс Брайан и др. Бурение взрывных скважин на открытых горных выработках. Издатель: Ульф Линде. Перевод на русский язык. // Atlas Copco Drilling Solutions LLC, Gar-land, Texas, USA. – 2011. – 274 с.
8. Погружные пневмоударники Secoroc QLX5 инструкция по эксплуатации / Перевод на русский язык. Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, Sweden. – 2015. – 34 с.
9. Technical specification DHD hammers / Atlas Copco Secoroc AB. Update, February, – 2005. – 4 p.
10. Atlas Sopco Rock Drilling Tools. Secoroc Down-the-hole equipment: Operators instruction and spare parts list down-the-hole hammers/Atlas Copco Secoroc AB, Fagestra, Sweden, 2002. – 23 p.
11. Тимонин В. В., Алексеев С. Е., Карпов В. Н., Черниенков Е. М. Влияние Энергетических параметров погружного пневмоударника на технико-экономические показатели бурения скважин с одновременной обсадкой // ФТПРПИ. – 2018. – № 1. – С. 61–70.
12. Еременко В. А., Карпов В. Н., Филатов А. Р., Котляров А. Р., Шахторин И. О. Совершенствование разработки с отбойкой руды на зажатую среду при освоении удароопасных месторождений // Горное дело. – 2014. – № 1. – С. 50–55.
13. Репин А. А., Алексеев С. Е. Создание пневмоударников для работы на повышенном давлении энергоносителя // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Т. III. Машиноведение. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. – С. 324.
14. Репин А. А., Алексеев С. Е., Карпов В. Н. Полезн. модель 121854 РФ. Погружной пневмоударник; правообладатель ИГД СО РАН. – № 2012118740/03; заяв. 04.05.2012; опубл. 10.11.2012 Бюл. № 31.
15. Тимонин В. В., Алексеев С. Е., Кокоулин Д. И., Кубанычбек Б. Исследование процесса воздухораспределения для бурения дегазационных скважин // ФПВГН. – 2017. – Т. 1, № 3. – С. 154–159.
16. Репин А. А., Алексеев С. Е., Попелюх А. И. Методы повышения надежности деталей ударных машин // ФТПРПИ. – 2012. – № 4. – С. 94–101.
17. Murakami Yukiitaka. Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions / Yukiitaka Murakami. – Elsevier. – 2002.

18. Петреев А. М., Воронцов Д. С., Примычкин А. Ю. Кольцевой упругий клапан в пневмоударных машинах // ФТПРПИ. – 2010. – № 4. – С. 56–55.
19. Петреев А. М., Примычкин А. Ю. Особенность работы кольцевого упругого клапана круглого сечения в системе воздухораспределения пневмоударных машин // ФТПРПИ. – 2013. – № 3. – С. 64–69.
20. Червов В. В., Смоляницкий Б. Н. Экспериментальная оценка диапазона изменения энергетических параметров пневмомолота с механическим замыканием упругого клапана // ФТПРПИ. – 2016. – № 5. – С. 92–99.
21. Primychkin A.Yu., Kondratenko A.S., Timonin V.V. Determination of variables for air distribution system with elastic valve for down-the-hole pneumatic hammer. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Сер: "All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85th Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya" 2017. С. 012025.
22. Petreev A.M., Primychkin A.Y. Influence of air distribution system on energy efficiency of pneumatic percussion unit of circular impact machine. Journal of Mining Science. 2015. Vol 51. № 3. – С. 562–567.

REFERENCES

1. Shakhtorin I. O. (2017). Opredelenie parametrov pogruzhnogo pnevmoudarnika [Determination of the parameters of a submersible hammer]. Interehkspo GEO-Sibir'-Interexpo GEO-Siberia, Vol. 2, 199–204.
2. Shakhtorin I. O. (2017). Dovodka mashin udar-nogo deystviya pri pomoschi sovremennogo programmnoho obespecheniya [The finishing of impact machines with modern software]. Fundamentalnyie i prikladnyie voprosyi gornyih nauk – Earth and Environmental Science, Vol. 1, 72–77.
3. Timonin V.V., Smolentsev A.S., Polushin N.I., Laptev A.I., & Shakhtorin I. O. (2016). Analiz prichin iznosa pdc-dolot i sposobyi povyisheniya ih iznosostoykosti [Analysis of the causes of wear of pdc-bits and ways to increase their wear resistance]. Fundamentalnyie i prikladnyie voprosyi gornyih nauk – Earth and Environmental Science, Vol. 3, 177–183.
4. Shakhtorin I. O. (2016). Obosnovanie parametrov pogruzhnogo pnevmoudarnika malogo diametra [Justification of the parameters of a small diameter submersible hammer]. Fundamentalnyie i prikladnyie voprosyi gornyih nauk – Earth and Environmental Science, Vol. 3, 228–233.
5. Timonin V. V., Alekseev S. E., & Kokoulin D. I. (2017). Sozdanie sistemy vozduhoraspredeleniya pogruzhnogo pnevmoudarnika dlya rasshirennogo diapazona rabocheho davleniya [The air-distribution system in downhole air hammer with expanded operating] Interehkspo GEO-Sibir'-Interexpo GEO-Siberia, Vol. 2, 283–288.
6. A – Z of DTH drilling. (2016). Halco Rock Tools, 76.
7. B. Fox et al. (2011). Drilling of explosive wells on open excavations. (Ulf Linde, Trans). Texas: Gar-land, 274.
8. Pneumatic impact Secoroc QLX5 maintenance instruction. (2015). Sweden: Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, 2, 34.
9. Technical specification DHD hammers. (2005). Sweden: Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, 4, 4.
10. Atlas Sopco Rock Drilling Tools. Secoroc Down-the-hole equipment: Operators instruction and spare parts list down-the-hole hammers. (2002). Sweden: Atlas Copco Secoroc AB, Fagestra, 23.
11. Timonin V. V., Alekseev S. E., Karpov V. N., & CHernienkov E. M. (2018). Vliyanie EHnergeticheskikh parametrov pogruzhnogo pnevmoudarnika na tekhniko-ehkonomicheskie pokazateli bureniya skvazhin s odnovremennoj obsadkoj [Influence of Power parameters of the

submersible pneumatic impact tool on technical and economic indicators of well-drilling with a casing]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* – Journal of Mining Science, 1, 61–70.

12. Eremenko V.A., Karpov V.N., Filatov A.P., & Kotlyarov A.A. (2014). Sovershenstvovanie razrabotki s otbojkoy rudy tna zazhatuyu sredu pri osvoenii udaroopasnyh mestorozhdenij [Improvement of development from breaking the rock ore on the clamped environment at development of fields which the mountain blows affects]. *Gornyj zhurnal* – Mining Journal, 1, 50–55 [in Russian].

13. Repin A. A., & Alekseev S. E. (2010). Sozdanie pnevmoudarnikov dlya raboty na povyshennom davlenii ehnergonositelya [Creation of pneumatic impact tools for work on the elevated pressure of the energy carrier]. *Fundamental'nye problemy formirovaniya tekhnogennoj geosredy. Mashinovedenie* – Fundamental problems of formation of a technogenic geosreda. Engineering science. Novosibirsk, N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Vol 3, 324 [in Russian].

14. Repin A. A., Alekseev S. E., & Karpov V. N. (2012). *Poleznaya model' RF*, no. 121854. Novosibirsk: IP Russian Federation.

15. Timonin V.V., Alekseev S.E., Kokoulin D.I., & Kubanyichbek B. (2017). Issledovanie protsessa vozduhoraspredeleniya dlya bureniya degazatsionnyih skvazhin [Investigation of the air distribution process for drilling degassing wells]. *Fundamentalnyie i prikladnyie voprosyi gornyyh nauk* – Earth and Environmental Science, Vol. 3, 154–159.

16. Repin A.A., Alekseev S.E., & Popelyuh A.I. (2012). Metody povysheniya nadezhnosti detalej udarnyyh mashin [Enhancing reliability of parts of percussion machines]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* – Journal of Mining Science, 4, 94–101.

17. Murakami Yukitaka. (2002). *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. Yukitaka Murakami. Elsevier.

18. Petreev A. M., Voroncov D. S., & Primychkin A.YU. (2010). Kol'cevoj uprugij klapa v pnevmoudarnyyh mashinah [Ring-shape elastic valve in the air percussion machines] *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* – Journal of Mining Science, 4, 55–65.

19. Petreev A. M., & Primychkin A. YU. (2015). Osobennost' raboty kol'cevogo uprugogo klapan kruglogo secheniya v sisteme vozduhoraspredeleniya pnevmoudarnyyh mashin [Specify of operation of round elastic valve in air distribution system of pneumatic percussion machines]. *Interehkspo GEO-Sibir'-Interexpo GEO-Siberia*, Vol. 3, 201–205.

20. Chervov V. V., & Smolyanickij B. N. (2016). Ehksperimental'naya ocenka diapazona izmeneniya ehnergeticheskikh parametrov pnevmomolota s mekhanicheskim zamykaniem uprugogo klapan [Experimental Estimate of Power Variation Range of Pneumatic Hammer with Mechanical Locking of Elastic Valve] *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* – Journal of Mining Science, 5, 92–98.

21. Primychkin A.Yu., Kondratenko A.S., & Timonin V.V. (2017). Determination of variables for air distribution system with elastic valve for down-the-hole pneumatic hammer. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Cep: "All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85th Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya", 012025.

22. Petreev A.M., & Primychkin A.Y. (2015). Influence of air distribution system on energy efficiency of pneumatic percussion unit of circular impact machine. *Journal of Mining Science*, Vol. 51, 3, 562–567.

© И. О. Шахторин, 2018

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГКОГО ПРОППАНТА НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ УГЛЯ

Татьяна Викторовна Шилова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (923)708-97-29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Леонид Алексеевич Рыбалкин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, аспирант, тел. (983)323-33-62, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

В работе рассмотрен вопрос повышения проницаемости угля методом гидравлического разрыва с использованием легкого проппанта на основе алюмосиликатных микросфер. Приведены результаты экспериментального исследования влияния полых алюмосиликатных микросфер АСПМ 500 на проницаемость длиннопламенного угля. Проницаемость угля с расклиненной трещиной снижается в 4–9 раз при повышении давления всестороннего сжатия в 5 раз с 1 до 5 МПа. Заполнение продольной трещины легким проппантом с толщиной слоя в 0,5 мм приводит к увеличению проницаемости угля в 7–19,5 раз по сравнению с трещиной без проппанта при давлениях сжатия 1–5 МПа. Полученные результаты позволяют оценить влияние легкого проппанта на проницаемость угля в условиях пластовых давлений, характерных для газоносных угольных пластов. Применение легкого проппанта на основе алюмосиликатных микросфер является перспективным направлением развития технологии гидравлического разрыва для дегазации угольных пластов.

Ключевые слова: уголь, проницаемость, легкий проппант, трещина, дегазация, угольный пласт, гидроразрыв, алюмосиликатные микросферы.

EXPERIMENTAL STUDY OF A LIGHTWEIGHT PROPPANT INFLUENCE ON COAL PERMEABILITY

Tatyana V. Shilova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (923)708-97-29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Leonid A. Rybalkin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, phone: (383)335-96-42, e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com

The article studies the increase of the coal permeability by hydraulic fracturing with the use of a lightweight proppant based on aluminosilicate microspheres. The results of an experimental study on the influence of ASPM 500 hollow aluminosilicate microspheres on the permeability of the long flaming coal are presented. The permeability of coal with a wedged crack is reduced by 4–9 times when the pressure of the triaxial compression is increased by 5 times from 1 to 5 MPa. Filling of a longitudinal crack with a lightweight proppant with the 0.5 mm thickness layer leads to an increase in the permeability of coal by 7–19.5 times comparing to a crack without proppant at compression pressures equal to 1–5 MPa. The obtained results provide the opportunity to evaluate the influence of a lightweight proppant on the permeability of coal under reservoir pressure typical for gas-bearing

coal seams. The use of a lightweight proppant based on aluminosilicate microspheres is a promising direction in the development of hydraulic fracturing technology for the degassing of coal seams.

Key words: coal, permeability, lightweight proppant, crack, degassing, coal seam, hydraulic fracturing, aluminosilicate microspheres.

Введение

В настоящее время интенсивно осваиваются нетрадиционные источники природного газа, в том числе газоносные угольные пласты. Низкая проницаемость угля (0,1–10 мД) осложняет извлечение газа из неразгруженных от горного давления пластов [1]. Одним из эффективных способов искусственного повышения проницаемости и интенсификации дегазации угля является гидроразрыв пласта [2–5].

Анализ опыта проведения гидроразрыва угольных пластов показывает, что метод малоэффективен без расклинивания созданных трещин проппантом. Использование раскрепляющих материалов напротив может обеспечить долгосрочное увеличение производительности дегазационной скважины. По данным [6–8] трещины гидроразрыва с раскрытием 3–4 мм, заполненные песчаным проппантом (30/60 меш), и радиусом несколько метров увеличивают на несколько месяцев производительность дегазационной скважины в 5–180 раз в зависимости от проницаемости угольного пласта [6]. Согласно [9] использование песчаного проппанта (70–140 меш) увеличивает проницаемость трещины в антраците и битуминозном угле в 5–10 раз.

Применение традиционных проппантов для гидроразрыва угольного пласта (кварцевый песок, керамики, RCP) осложняется их преждевременным осаждением в трещине. При этом существующие способы решения этой проблемы (использование высоковязких жидкостей, применение маловязких жидкостей при повышенном темпе закачки), требуют значительного повышения стоимости работ, что зачастую нерентабельно при отработке низкопроницаемых угольных пластов [10–12]. Из современных решений в области разработки и исследования расклинивающих материалов перспективным для гидроразрыва угольных пластов является использование легких проппантов с плотностью, близкой к наиболее дешевым жидкостям разрыва на водной основе. Результаты экспериментального исследования скорости оседания песка (плотность 2,65 г/см³) и легкого проппанта на основе термопластичного сплава (плотность 1,08 г/см³) различных фракций при повышении вязкости несущей жидкости приведены в работе [13]. Экспериментальные результаты по влиянию плотности суспензии на перемещение частицы расклинивающего материала приведены в работе [14]. Применение проппантов с низкой плотностью позволит обеспечить длительный перенос и удовлетворительное распределение на всем протяжении трещины гидроразрыва [15–17]. В работе приведены результаты экспериментального исследования влияния легкого проппанта на основе полых алюмосиликатных микросфер АСПМ 500 на проницаемость угля при различных условиях напряжения.

Экспериментальная установка

Эксперименты были выполнены на лабораторной установке, предназначенной для измерения газопроницаемости горных пород при стационарном характере фильтрации линейного потока газа и состоящей из испытательной камеры, блока подготовки газа, пневмогидравлической системы осевого и бокового сжатия породного образца цилиндрической формы. Основные характеристики установки приведены в табл. 1. Подробное описание дано в работе [11].

Таблица 1

Характеристики экспериментальной установки

Параметр	Диапазон значений	Шаг измерения (регулирования)
Время фильтрации, с	0.001 – 432000	0.001
Давление газа, входное, МПа	0 – 5	0.02
Дифференциальное давление P , МПа	0 – 0.3	0.001
Газ	N_2 , CH_4 , CO_2	–
Температура, °С	От – 10 до + 150	0.01
Боковое сжатие, МПа	0 – 20	0.05
Осевое сжатие, МПа	0 – 50	0.05
Фильтрационный объем одного измерения, $дм^3$	0.2 – 0.5	–
Масса камеры, кг	0.7	–

Образец и методика проведения экспериментов

В экспериментах использовали длиннопламенный уголь, отобранный на Караканском каменноугольном месторождении (Пермяковский разрез, Кузнецкий бассейн). Из угля был изготовлен цилиндрический образец диаметром 30 мм и высотой 30 мм. Вдоль оси цилиндра была создана трещина, которую впоследствии заполняли проппантом (рис. 1).

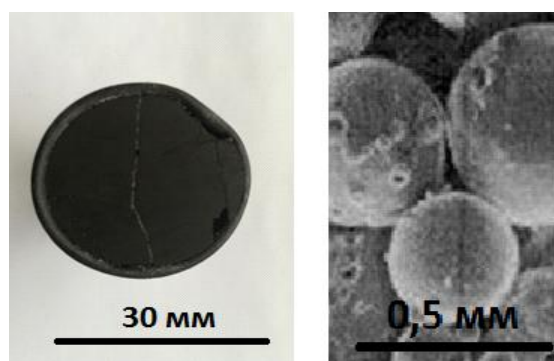


Рис. 1. Экспериментальный образец с трещиной, заполненной проппантом (слева). Проппант – алюмосиликатные микросферы АСПМ 500 (справа)

Средняя ширина расклиненной трещины составила 0,5 мм. В качестве проппанта использовали полые алюмосиликатные микросферы АСПМ 500, свойства которых приведены в табл. 2 [12]. Размер основной фракции – 100–150 мкм.

Таблица 2

Свойства алюмосиликатных микросфер АСПМ-500

Размер, мкм	<500
Истинная плотность, кг/м ³	650-800
Коэффициент укладки	60-80% от теоретической
Насыпная плотность, кг/м ³	350-430
Предел прочности на сжатие, кГ/см ²	150-280
Количество осадка, об.	<5%

На первом этапе была исследована проницаемость угля с трещиной без проппанта. Эксперименты были проведены с использованием азота, фильтрующегося в осевом направлении при постоянных перепадах давления ΔP и давлениях всестороннего сжатия P от 1 до 5 МПа с шагом 1 МПа. Для каждого P из интервала от 1 до 5 МПа выполнена серия тестов при $\Delta P = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1$ МПа.

На втором этапе были выполнены эксперименты по определению проницаемости угля с трещиной, расклиненной полыми алюмосиликатными микросферами АСПМ 500. Проппант равномерно наносили на поверхность трещины, далее составной образец помещали в резиновую манжету и в испытательную камеру, после чего выполняли серию аналогичных экспериментов.

Значения коэффициентов газопроницаемости образца до и после добавления проппанта рассчитывали по формуле для линейного потока газа и стационарного характера фильтрации [13].

Обсуждение результатов

В первой серии экспериментов была исследована зависимость проницаемости длиннопламенного угля с трещиной без проппанта от всестороннего сжатия образца P . Полученные результаты приведены на рис. 2. Установлено, что проницаемость падает с ростом давления всестороннего сжатия, уменьшаясь в 13–24 раза при увеличении P в 5 раз с 1 до 5 МПа. Это свидетельствует о малой эффективности дренирования угля трещинами гидроразрыва без их заполнения расклинивающим материалом.

Во второй серии экспериментов оценивалось влияние давления всестороннего сжатия P на проницаемость длиннопламенного угля с трещиной, заполненной алюмосиликатными микросферами АСПМ-500 при начальном раскрытии 0,5 мм. Результаты приведены на рис. 3. Выявлено, что проницаемость угля снижается в 4–9 раз при повышении всестороннего сжатия P в 5 раз с 1 до

5 МПа. Причиной уменьшения проницаемости может быть уплотнение упаковки проппанта в трещине, для оценки которого необходимо дополнительно определять раскрытие трещины после сжимающих нагрузок.

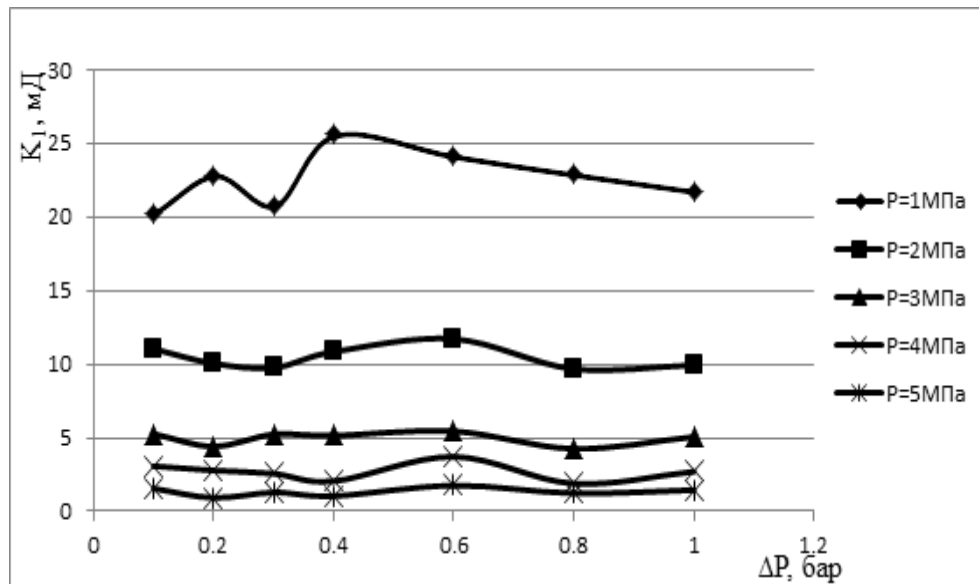


Рис. 2. Зависимость коэффициента газопроницаемости длиннопламенного угля с трещиной без проппанта (K_1) от перепада давления ΔP и давления всестороннего сжатия P

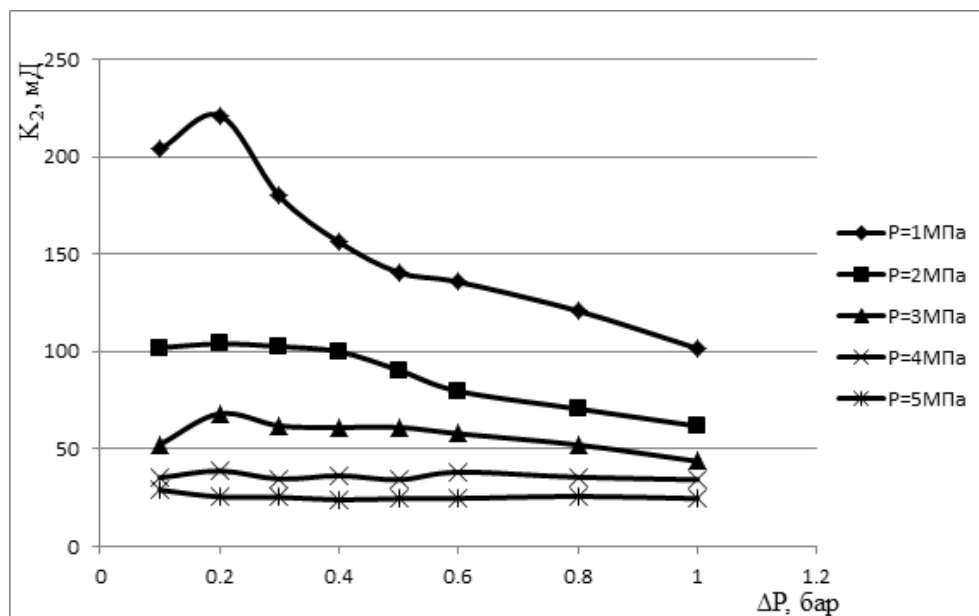


Рис. 3. Зависимость коэффициента газопроницаемости угля с трещиной, заполненной проппантом (K_2) от перепада давления ΔP и давления всестороннего сжатия P

Экспериментальные исследования показали, что использование легкого проппанта для расклинивания искусственной трещины, приводит к увеличению проницаемости угля. Зависимость отношения коэффициентов проницаемости от давления сжатия до и после использования легкого проппанта показана на рис. 4. Эффект от использования проппантов повышается с ростом сжимающих нагрузок. Так, при давлениях сжатия $P = 1, 2$ МПа проницаемость повышается в среднем в 7–8,5 раз, при $P = 3, 4$ МПа в 11–14 раз, а при $P = 5$ МПа в 19,5 раз (рис. 4). Выявленная закономерность позволяет оценить влияние легкого проппанта на проницаемость угля в условиях пластовых давлений, характерных для газоносных угольных пластов. Однако, при этом следует учитывать прочностные характеристики проппантов.

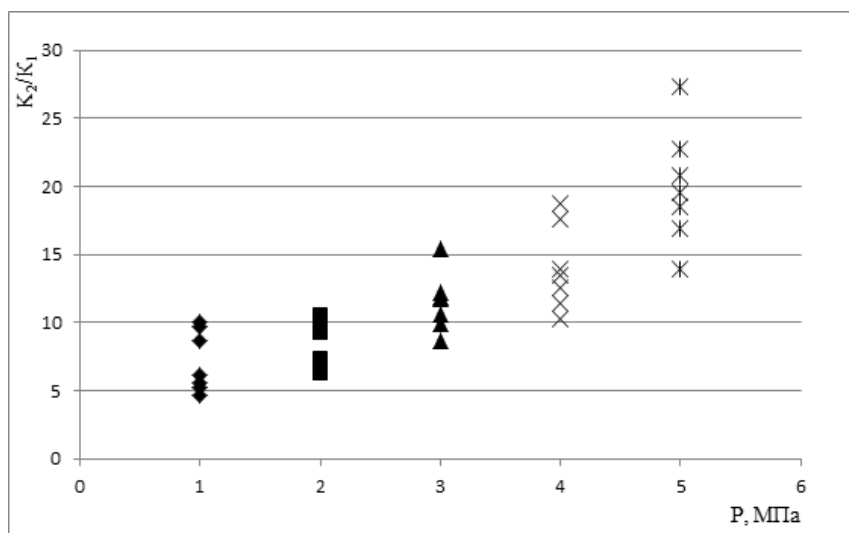


Рис. 4. Зависимость отношения коэффициентов проницаемости угля с трещиной с проппантом и без проппанта (K_2/K_1) от давления всестороннего сжатия образца P

Полученные результаты показали, что применение легких проппантов является перспективным направлением развития технологии гидроразрыва для дегазации угольных пластов.

Выводы

Заполнение трещины легким проппантом на основе алюмосиликатных микросфер АСПМ 500 с толщиной слоя в 0,5 мм увеличивает проницаемость длиннопламенного угля в 7–19,5 раз по сравнению с трещиной без расклинивания. Применение легких проппанта на основе алюмосиликатных микросфер является перспективным направлением развития технологии гидроразрыва для дегазации угольных пластов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект RFMEFI60417X0172).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sander R., Pan Z., Connell L. D. Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: A review of experimental methods // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2017. – Т. 37. – Р. 248-279.
2. Flores R. M. Coal and coalbed gas: Fueling the future. – Newnes, 2013.
3. Ютяев Е. П., Садов А. П., Мешков А. А. и др. Оценка фильтрационных свойств угля в гидродинамических испытаниях дегазационных пластовых скважин // *Уголь*. – 2017. – № 11 (1100). – С. 24–29.
4. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – № 5. – С. 137–142.
5. Плаксин М. С., Родин Р. И., Рябцев А. А. и др. Гидроразрыв угольного пласта в шахтных условиях как панацея решения газовых проблем шахт (основы разработки и внедрения) // *Уголь*. – 2015. – № 2. – С. 48–50.
6. Jeffrey R., Boucher C. Sand Propped hydraulic fracture stimulation of horizontal in-seam gas drainage holes at Dartbrook Coal Mine. – 2004. – Р. 168-179.
7. Курления М.В., Сердюков С.В., Патутин А.В., Шилова Т.В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва. // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2017. – № 6. – С. 3–9.
8. Saldungaray P. M. et al. Hydraulic fracture optimization in unconventional reservoirs // *SPE Middle East unconventional gas conference and exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 2012.
9. Kumar H. et al. Permeability evolution of propped artificial fractures in coal on injection of CO₂ // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2015. – Т. 133. – Р. 695–704.
10. Bokane A. et al. Computational fluid dynamics (CFD) study and investigation of proppant transport and distribution in multistage fractured horizontal wells // *SPE Reservoir Characterization and Simulation Conference and Exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 2013.
11. Bokane A. B. et al. Transport and distribution of proppant in multistage fractured horizontal wells: a CFD simulation approach // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 2013.
12. Mack M. G. et al. Development and field testing of advanced ceramic proppants // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 2013.
13. Parker M. A. et al. New proppant for hydraulic fracturing improves well performance and decreases environmental impact of hydraulic fracturing operations // *SPE Eastern Regional Meeting*. – Society of Petroleum Engineers, 2012.
14. Barree R. D. et al. Experimental and numerical modeling of convective proppant transport // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 1994.
15. Liang F. et al. A comprehensive review on proppant technologies // *Petroleum*. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 26–39.
16. Шилова Т. В., Курления М. В., Сердюков С. В. Экспериментальная оценка проводимости трещин с проппантом из алюмосиликатных микросфер в условиях малоглубинного гидроразрыва нефтяного пласта // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2017. – № 6. – С. 127–132.
17. Rickards A. R. et al. High strength, ultra-lightweight proppant lends new dimensions to hydraulic fracturing applications // *SPE annual technical conference and exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 2003.
18. Сердюков С. В., Шилова Т. В., Дробчик А. Н. Лабораторная установка и методика определения газопроницаемости горных пород // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2017. – № 5. – С. 172–180.
19. ТУ 5717-001-11843486-2004. Микросферы алюмосиликатные, 2004.

20. ГОСТ 26450.2-85. Методы определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 17 с.

REFERENCES

1. Sander R., Pan Z., Connell L. D. Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: A review of experimental methods // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2017. – Т. 37. – P. 248–279.
2. Flores R. M. Coal and coalbed gas: Fueling the future. – Newnes, 2013.
3. Yutyaev E. P., Sadov A. P., Meshkov A. A. et al. Evaluation of coal filtration properties in the hydrodynamic tests of degassing formation wells // *Coal*. – 2017. – № 11 (1100).
4. Lekontsev Y. M., Sazhin P. V. Directional hydraulic fracturing in difficult caving roof control and coal degassing // *Journal of mining science*. – 2014. – № 5. – P. 914–917.
5. Plaksin M. S., Rodin R. I., Riabtsev A. A., Alkov V. I. et al. Hydraulic fracturing of the coal bed in mine conditions as a panacea for solution of gas problems in mine (basic for the development and implementation) // *Coal*. – 2015. – № 2. – P. 48–50.
6. Jeffrey R., Boucher C. Sand Propped hydraulic fracture stimulation of horizontal in-seam gas drainage holes at Dartbrook Coal Mine. – 2004. – P. 168–179.
7. Kurlenya M. V., Serdyukov S. V., Patutin A. V., Shilova T. V. Enhancement of coal bed degassing by hydraulic fracturing // *Journal of mining science*. – 2017. – № 6.
8. Saldungaray P. M. et al. Hydraulic fracture optimization in unconventional reservoirs // *SPE Middle East unconventional gas conference and exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 2012.
9. Kumar H. et al. Permeability evolution of propped artificial fractures in coal on injection of CO₂ // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2015. – Т. 133. – P. 695–704.
10. Bokane A. et al. Computational fluid dynamics (CFD) study and investigation of proppant transport and distribution in multistage fractured horizontal wells // *SPE Reservoir Characterization and Simulation Conference and Exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 2013.
11. Bokane A. B. et al. Transport and distribution of proppant in multistage fractured horizontal wells: a CFD simulation approach // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 2013.
12. Mack M. G. et al. Development and field testing of advanced ceramic proppants // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 2013.
13. Parker M. A. et al. New proppant for hydraulic fracturing improves well performance and decreases environmental impact of hydraulic fracturing operations // *SPE Eastern Regional Meeting*. – Society of Petroleum Engineers, 2012.
14. Barree R. D. et al. Experimental and numerical modeling of convective proppant transport // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 1994.
15. Liang F. et al. A comprehensive review on proppant technologies // *Petroleum*. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 26–39.
16. Shilova T. V., Kurlenya M. V., Serdyukov S. V. Experimental estimate of capacities of shallow hydraulic fracturing with proppant made // *Journal of mining science*. – 2017. – № 6.
17. Rickards A. R. et al. High strength, ultra-lightweight proppant lends new dimensions to hydraulic fracturing applications // *SPE annual technical conference and exhibition*. – Society of Petroleum Engineers, 2003.
18. Serdyukov S.V., Shilova T.V., Drobchik A.N. Laboratory installation and procedure to determine gas permeability of rocks // *Journal of mining science*. – 2017. – № 5.
19. TY 5717-001-11843486-2004. Microspheresaluminosilicate, 2004.
20. GOST 26450.2-85 Methods for determination of absolute gas permeability coefficient by stationary and non-stationary filtration. – М.: P of standards, 1985. – 17 p.

© Т. В. Шилова, Л. А. Рыбалкин, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>Б. Б. Данилов, А. А. Речкин, Б. Н. Смоляницкий.</i> Исследование динамики пневмоударного механизма с эластичным клапаном при работе с противодавлением в выхлопном тракте	3
2. <i>Б. Б. Данилов, А. А. Речкин, Д. О. Чецин.</i> Определение угла поворота отклоняющего элемента корпуса управляемого пневмопробойника	12
3. <i>Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий, В. В. Плохих.</i> Обоснование применения кольцевого упругого клапана с кинематическим замыканием в гидроударных механизмах объемного типа.....	21
4. <i>Д. С. Евстигнеев, А. В. Савченко.</i> Анализ моделей фильтрации в пористых средах с учетом гармонического волнового воздействия	29
5. <i>В. Н. Карпов, В. В. Тимонин, А. И. Конурин, А. К. Ткачук.</i> Анализ проблем нормирования буровых работ при пневмоударной проходке взрывных скважин на горных предприятиях России	43
6. <i>В. Г. Качальский, Д. В. Барышников, Р. Ю. Андреев.</i> Оценка механических свойств горных пород и закладки на руднике «Айхал» АК «АЛРОСА»	58
7. <i>С. А. Кондратьев.</i> Влияние структуры углеводородного фрагмента оксигидрильных и катионных реагентов на их собирательную активность	65
8. <i>А. И. Конурин, А. С. Кондратенко.</i> Численное моделирование процесса формирования грунтовой пробки при погружении трубы открытым торцом в массив	78
9. <i>А. И. Конурин, С. А. Неверов, А. А. Неверов.</i> Особенности построения параметрической модели геосреды для численного моделирования напряженного состояния массива пород.....	89
10. <i>А. М. Красюк, Е. Ю. Русский.</i> К вопросу прочности рабочих лопаток с ячеистой структурой сердечника для осевых шахтных вентиляторов.....	100
11. <i>Л. А. Назарова, П. В. Николенко, В. Л. Шкуратник.</i> Аппаратура для ультразвуковой томографии образцов горных пород при их механическом нагружении	107
12. <i>В. Н. Опарин, Т. А. Киряева.</i> О некоторых особенностях кластеризации угольных месторождений Кузбасса по газодинамической активности с удалением от железорудного узла месторождений Горной Шории и Хакасии.....	116
13. <i>А. В. Панов, А. А. Скулкин, А. В. Леонтьев, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, Н. А. Мирошниченко, Е. В. Рубцова.</i> Определение го-	

ризонтальных составляющих природного поля напряжений по данным измерительного гидроразрыва	126
14. <i>Е. П. Русин, Г. Н. Хан.</i> О несущей способности криволинейных гидрораспорных анкеров	136
15. <i>Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик.</i> Экспериментальный стенд и результаты исследований влияния упругих колебаний на скорости фильтрации газа.....	147
16. <i>А. В. Савченко, Д. С. Евстигнеев, М. Н. Цупов.</i> Численное моделирование вращения дебаланса в жидкости	155
17. <i>А. В. Савченко, М. Н. Цупов, А. Д. Флянтиков, А. В. Козлов.</i> Обоснование конструктивных и энергетических параметров скважинного дебалансного виброисточника	170
18. <i>С. В. Сердюков, А. В. Азаров, А. В. Патутин.</i> Способ шахтного гидравлического разрыва пласта на основе полимерных мостов.....	180
19. <i>С. В. Сердюков, Т. В. Шилова.</i> Проппант и рабочие жидкости для создания дренажных каналов в угольном пласте методом гидроразрыва.....	188
20. <i>П. Н. Тамбовцев.</i> Эффективный рабочий цикл пневмоударной машины	197
21. <i>В. В. Тимонин, С. Е. Алексеев, Д. И. Кокоулин, Б. Кубанычбек, Е. М. Черниенков.</i> Исследование системы воздухораспределения погружного пневмоударника с парой «клапан – ударник».....	207
22. <i>В. А. Усков, Ю. Н. Шапошник.</i> К вопросу поддержания выработки рамной крепью в условиях зоны «Надвиговая» месторождения Бадран	218
23. <i>О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов.</i> Экспериментальное исследование деформационно-прочностных свойств горных пород с нарушениями сплошности в условиях прямого сдвига.....	227
24. <i>Ю. П. Харламов, А. Ю. Примычкин.</i> Методика расчета циркуляционной системы кольцевого погружного пневмоударника.....	237
25. <i>П. А. Цой, О. М. Усольцева, В. Н. Семенов.</i> Определение множественных регрессионных зависимостей предела прочности на сжатие и модуля деформации сланцевых пород от величины бокового давления и угла напластования.....	247
26. <i>А. И. Чанышев, И. М. Абдулин.</i> Деформационная теория разрушения горных пород и ее анализ	257
27. <i>А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, О. Е. Белоусова, Л. Л. Ефименко.</i> Математические модели блочных сред. Учет размеров блоков и контактного трения	266
28. <i>А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, Л. И. Торгашова.</i> Определение положения источника возмущений и НДС массива пород вокруг него по данным измерений смещений на поверхности Земли. Ч. 1. Построение тестового примера.....	276

29. <i>А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, Л. И. Торгашова.</i> Определение положения источника возмущений и НДС массива пород вокруг него по данным измерений смещений на поверхности Земли. Ч. 2. Построение разностной схемы.....	287
30. <i>А. И. Чанышев, И. В. Гутарова, И. В. Фролова.</i> Вариация контактного трения и ее учет в решениях задачи о движении пробойника.....	298
31. <i>А. И. Чанышев, Г. М. Подыминогин, О. А. Лукьяшко.</i> Определение максимально допустимой высоты отвала, сложенного из горных пород	307
32. <i>В. В. Червов.</i> Определение основных параметров пневматического молота для забивания в грунт труб большого диаметра.....	318
33. <i>И. О. Шахторин.</i> Анализ конструкций долот для бурения скважин с одновременной обсадкой	329
34. <i>Т. В. Шилова, Л. А. Рыбалкин.</i> Экспериментальное исследование влияния легкого проппанта на проницаемость угля.....	338

CONTENTS

1. <i>B. B. Danilov, A. A. Rechkin, B. N. Smolyanitsky.</i> Investigation of the Dynamics of Pneumatic Elastic Valve Mechanism when Operating with the Exhaust Back Pressure	3
2. <i>B. B. Danilov, A. A. Rechkin, D. O. Cheshchin.</i> Determination of a Turning Angle of a Deflecting Element Belonging to Controlled Pneumatic Punch	12
3. <i>B. B. Danilov, B. N. Smolyanitsky, V. V. Plokhikh.</i> Justification of Employment of Elastic Ring Valve with Kinematic Closing in Hydraulic Impact Devices	21
4. <i>D. S. Evstigneev, A. V. Savchenko.</i> Analysis of Filtration Models in Porous Media Inclusive of Harmonic Wave Impact.....	29
5. <i>V. N. Karpov, V. V. Timonin, A. I. Konurin, A. K. Tkachuk.</i> Analysis of the Standardization Problems of Drilling in Case of Pneumatic Boring of Blastboreholes at Russian Mining Enterprises	43
6. <i>V. G. Kachalsky, D. V. Baryshnikov, R. Yu. Andreev.</i> Evaluation of Mechanical Properties of Host Rocks and Concrete Backfill at “Aykhal” Mine “Alrosa” Enterprise	58
7. <i>S. A. Kondratiev.</i> Influence of the Structure of Hydrocarbon Fragment of Oxyhydryl and Cationic Reagents on Their Collecting Activity	65
8. <i>A. I. Konurin, A. S. Kondratenko.</i> Numerical Modeling of a Soil Plug Formation During an Open end Pipe Submergence into a Rock Mass	78
9. <i>A. I. Konurin, S. A. Neverov, A. A. Neverov.</i> Constructing Features of the Parametric Model of Geo-Environment for Numerical Modeling of the Rock Mass Stress State.....	89
10. <i>A. M. Krasyuk, E. Yu. Russky.</i> On Strength of Rotating Blades with Cell Structure Core for Axial Mine Fans	100
11. <i>L. A. Nazarova, P. V. Nikolenko, V. L. Shkuratnik.</i> Equipment for Ultrasonic Tomography of Rock Samples under Mechanical Loading	107
12. <i>V. N. Oparin, T. A. Kiryaeva.</i> Features of Kuzbass Coal Deposits Clustering on Gas-Dynamic Activity in a Distance from Gornaya Shoria Iron Ore Unit Deposits	116
13. <i>A. V. Panov, A. A. Skulkin, A. V. Leontiev, L. A. Nazarov, L. A. Nazarova, N. A. Miroschnichenko, E. V. Rubtsova.</i> Determination of Horizontal Components of a Natural Stress Field with Measurement Hydrofrac Data	126
14. <i>E. P. Rusin, G. N. Khan.</i> Bearing Capacity of Curvilinear Hydraulic Expansion Rock Bolts	136
15. <i>L. A. Rybalkin, A. N. Drobchik.</i> Experimental Stand and Results of Research on Elastic Oscillations Dependence on Gas Filtration Velocity	147

16. A. V. Savchenko, D. S. Evstigneev, M. N. Tsupov. Numerical Modeling of Debalance Rotation in a Fluid	155
17. A. V. Savchenko, M. N. Tsupov, A. D. Flyantikov, A. V. Kozlov. Substantiation of Design and Energy Parameters of a Borehole Debalance Vibration Source.....	170
18. S. V. Serdyukov, A. V. Azarov, A. V. Patutin. A Method of Underground Hydraulic Fracturing Based on Polymer Bridges	180
19. S. V. Serdyukov, T. V. Shilova. A Proppant and Working Fluids for Drainage Channels Formation in a Coal Seam Using Hydraulic Fracturing	188
20. P. N. Tambovtsev. Effective Operating Cycle of a Pneumatic Punch Machine	197
21. V. V. Timonin, S. E. Alekseev, D. I. Kokoulin, B. Kubanychbek, E. M. Chernienkov. Research on Air Distribution System of a Downhole Hammer Paired with "Valve – Hammer"	207
22. V. A. Uskov, Yu. N. Shaposhnik. On Galleries Support by Frame Timber at Badran Deposit “Nadvigovaya” Area	218
23. O. M. Usol'tseva, P. A. Tsoi, V. N. Semenov. Experimental Investigation of Deformation-Strength Properties of Rocks Discontinuities under Direct Shear Conditions	227
24. Yu. P. Kharlamov, A. Yu. Primychkin. Calculation Technique for Circulation System of an Annual Downhole Hammer	237
25. P. A. Tsoi, O. M. Usol'tseva, V. N. Semenov. Determination of Multiple Regression Dependence of Ultimate Compressive Strength and Deformation Modulus of Shists on Lateral Pressure and Bedding Angle	247
26. A. I. Chanyshev, I. M. Abdulin. Deformation Theory of Rock Destruction and Its Analysis	257
27. A. I. Chanyshev, I. M. Abdulin, O. E. Belousova, L. L. Efimenko. Mathematical Models of Block Media. Consideration of Block Size and Contact Friction.....	266
28. A. I. Chanyshev, O. E. Belousova, L. I. Torgashova. Determination of the Position of Source of Perturbancy and Vat the Rock Masses are around it from the Data of Measurements of Offsets on the Earth's Surface. P. 1. Construction of the Test Example.....	276
29. A. I. Chanyshev, O. E. Belousova, L. I. Torgashova. Determination of the Position of Source of Perturbancy and Vat the Rock Masses are around it from the Data of Measurements of Offsets on the Earth's Surface. P. 2. Finite-Difference Scheme Construction	287
30. A. I. Chanyshev, I. V. Gutarova, I. V. Frolova. Contact Friction Variation and Its Roleina Solution of a Punch Motion Problem	298
31. A. I. Chanyshev, G. M. Podyminogin, O. A. Luk'yashko. Determination of the Maximum Height of a Rock Dump	307
32. V. V. Chervov. Determination of Main Parameters of Pneumatic Hammer for Driving into Soil Pipes of Large Diameter.....	318

33. <i>I. O. Shakhtorin.</i> Analysis of Construction Bit for Drilling Wells with Simultaneous Casing.....	329
34. <i>T. V. Shilova, L. A. Rybalkin.</i> Experimental Study of a Light- weight Proppant Influence on Coal Permeability	338

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

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

Т. 6

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Е. М. Федяевой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 20.09.2018. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 20,46. Тираж 100 экз. Заказ 131.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 8.