

ИНТЕРЭКСПО

ISSN 2618-981X

ГЕО-СИБИРЬ

XVII Международный научный конгресс

Форум № 1 в России

Сборник материалов в 8 т.

Т. 2

Международная научная конференция

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

№ 4

Новосибирск
2021

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

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XVII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 8 т.

Т. 2

Международная научная конференция

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

№ 4

Новосибирск
СГУГиТ
2021

Ответственные за выпуск:

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

А. Э. Конторович

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

М. И. Энов

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

И. Н. Ельцов

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

А. П. Хмелинин

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

М. Ю. Смирнов

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

А. И. Неволько

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г.,
Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 8 т. Т. 2 : Междунар. науч. конф.
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки
и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкологи-
гия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 4. – 354 с. – ISSN 2618-981X

DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-4

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622.3

© СГУГиТ, 2021

**КАЛИБРОВОЧНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ СВЯЗИ МЕЖДУ УРАВНЕНИЕМ
АДСОРБЦИИ ЛЕНГМЮРА И КИНЕМАТИЧЕСКИМ ВЫРАЖЕНИЕМ
В. Н. ОПАРИНА ДЛЯ ВОЛН МАЯТНИКОВОГО ТИПА ПО ДАННЫМ
НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КУЗБАССА**

Виктор Николаевич Опарин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, д.ф-м.н., член-корр. РАН, зав. отделом экспериментальной геомеханики, тел. 2053030 доп.113, e-mail: oparin@misd.ru

Татьяна Анатольевна Киряева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, тел: 89231703211, e-mail: coalmetan@mail.ru

В статье показано, что в настоящее время существуют экспериментально-теоретические предпосылки для установления формализованных связей между деформационно-волновыми и физико-химическими процессами, протекающими в реальных многофазных массивах горных пород. Установлены калибровочные коэффициенты связи в операторе соответствия между уравнением адсорбции и кинематическим выражением для маятниковых волн, верифицированные в сравнении с имеющимися измерениями в лабораторных и натуральных экспериментах для углей всего метаморфического ряда: определены количественные значения физико-химического инварианта для углей различных стадий метаморфизма и структурного параметра геосреды, а также скорости распространения продольной волны в геоблоках-носителях маятниковых волн и трансляционного движения «соударяющихся» геоблоков для разных стадий метаморфизма. Показано, что значения полученной дисперсии позволяют учесть все многообразие основных стадий метаморфизма угольных месторождений Кузбасса в теории и прогнозе выбороопасности, т.е. учитывать реальные качества угольных пластов.

Ключевые слова: углеметановые пласты, нелинейные геомеханические и физико-химические процессы, волны маятникового типа, продольные волны, калибровочные коэффициенты связи в операторе соответствия, уравнение Ленгмюра, кинематическое выражение В. Н. Опарина

**CALIBRATION COEFFICIENTS OF CONNECTION BETWEEN
THE LANGMUIR ADSORPTION EQUATION AND V.N. OPARINA'S
KINEMATIC EXPRESSION FOR PENDULUM-TYPE WAVES ACCORDING
TO LOCAL MEASUREMENTS AT THE COAL DEPOSITS OF KUZBASS**

Viktor N. Oparin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Doctor of Physics and Mathematics, Corresponding Member RAS, head. Department of Experimental Geomechanics, 54 Krasny Pr., Novosibirsk, 630091, Russia. Tel: (383) 217-05-36; e-mail: oparin@misd.ru

Tatiana A. Kiryaeva

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

The article shows that at present there are experimental and theoretical prerequisites for establishing formalized relationships between deformation-wave and physicochemical processes occurring in real multiphase rock massifs. The calibration coefficients of the relationship in the correspondence operator between the adsorption equation and the kinematic expression for pendulum waves were established, verified in comparison with the available measurements in laboratory and field experiments for coals of the entire metamorphic series: quantitative values of the physicochemical invariant were determined for coals of different stages of metamorphism and structural parameter of the geomedium, as well as the velocity of propagation of a longitudinal wave in geoblocks-carriers of pendulum waves and translational movement of "colliding" geoblocks for different stages of metamorphism. It is shown that the values of the obtained dispersion allow one to take into account all the variety of the main stages of metamorphism of Kuzbass coal deposits in the theory and forecast of outburst hazard, i.e. take into account the real qualities of coal seams.

Keywords: coal seams, nonlinear geomechanical and physicochemical processes, pendulum waves, longitudinal waves, calibration coupling coefficients in the correspondence operator, Langmuir's and V.N. Oparin's equations

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00051.

Введение

Проведенный комплекс экспериментальных исследований по анализу связей между тепловыми и деформационно-волновыми процессами, возникающими в угольных образцах разного марочного состава (месторождения Кузбасса) при одноосном жестком нагружении до разрушения, а также исследование эволюции полей микродеформаций, проведенное спекл-методом на угольных образцах при одноосном сжатии позволили в [1] дать положительный ответ на вопрос ключевой значимости: существуют ли в настоящее время экспериментально-теоретические предпосылки для установления формализованных связей между деформационно-волновыми и физико-химическими процессами, протекающими в реальных многофазных органогенно-насыщенных массивах горных пород, при нарушении их исходного напряженно-деформированного состояния (источниками различного типа), а также при наличии господствующего на заданных глубинах поля температур.

Научные основы применяемой в настоящей работе методологии и метода определения динамико-кинематических характеристик нелинейных упругих волн маятникового типа достаточно подробно изложены в [1], в основном, на примере рудных и нефтегазовых месторождений полезных ископаемых. Здесь отразим лишь ключевые моменты, необходимые для понимания приводимого ниже экспериментального материала, но относящегося уже к угольным месторождениям, когда источником возникновения маятниковых волн становятся очаги природно-техногенных землетрясений (в т.ч. и горно-тектонические удары

или мощные технологические взрывы), а их «последствием» - газодинамические события на угольных шахтах, «модулируемые» нелинейными деформационно-волновыми процессами, сопряженными с распространением пакетов маятниковых волн.

Во-первых, это использование подробно описанных в [1] физико-механических представлений и феноменологических связей.

Во-вторых, это – энергетическое условие возникновения и распространения волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения:

$$\hbar = \frac{W}{M \mathcal{G}_\rho^2} = \theta \cdot 10^{-9}, \theta \in 1 \div 4, M = \rho \cdot V, \quad (1)$$

$$W = \alpha(V) \cdot [U_0 + W_k] \quad (2)$$

где U_0 – потенциальная (упругая), W_k – кинетическая энергии структурных элементов горных пород в очаговой зоне разрушения объемом V ; $\alpha(V)$ – коэффициент сейсмического действия подземных взрывов по Садовскому М.А.; ρ – плотность горных пород; \mathcal{G}_ρ^2 – аналитическое выражение для упругих волн продольного типа, известным образом зависящее от модуля Юнга, коэффициента Пуассона и плотности пород ρ .

Как показано в [2], соотношения (1) и (2) оказываются справедливыми практически в любых нелинейных динамических процессах, связанных с движениями структурных элементов в массивах горных пород в режиме «физических маятников» и, в первую очередь, в очаговых зонах землетрясений, горных ударов, взрывов, при бурении скважин, а также возникновении геомеханических квазирезонансных состояний.

Кинематическое выражение для волн маятникового типа дано в [1]:

$$\mathcal{G}_v = \frac{(1 + \nu[\sigma]) \mathcal{G}_\varepsilon \mathcal{G}_p}{\mathcal{G}_\varepsilon + \nu[\sigma] \mathcal{G}_p}, \quad (3)$$

где \mathcal{G}_v – скорость распространения маятниковых волн; \mathcal{G}_p – скорость распространения продольных волн в геоблоках-носителях маятниковой волны; \mathcal{G}_ε – средняя скорость (по модулю) трансляционного движения соударяющихся геоблоков диаметром Δ ; $\nu[\sigma]$ – структурный параметр геосреды, зависящий от напряженного состояния σ и аппроксимируемый параболической зависимостью на допредельной стадии деформирования в виде:

$$\nu[\sigma] = \nu_0 \left[2 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где σ_0 – предел прочности структурных элементов размера Δ ; v_0 – минимальное значение этого параметра при действующем в заданном объеме горных пород виде напряженно-деформированного состояния.

На внешней поверхности очаговой зоны таких динамических событий скоростная характеристика \mathcal{G}_ε в формуле (3) становится непосредственно зависящей от энергетической характеристики W . Так, в работе [3] показано, что при $\alpha(V) \cong 1,5 \cdot 10^{-2}$, $W_k = 0$ – условия «порядкового» преобладания уровня действия литостатического давления ($U_0 \gg W_k$), а также при $3 \cdot 10^3 \leq \mathcal{G}_\rho \leq 6 \cdot 10^3$ м/с значения \mathcal{G}_ε в (4) можно оценить диапазоном:

$$\mathcal{G}_\varepsilon \in 2,52 \div 10 \text{ м/с.} \quad (5)$$

В-третьих, это доказательство в [1] операторной $\Omega\{\dots\}$ связи кинематического выражения для маятниковых волн В.Н. Опарина (3) и уравнения Ленгмюра (изотермы адсорбции):

$$\Omega\{\dots\} \equiv \left\{ \begin{array}{l} A \rightarrow \mathcal{G}_v \\ p \rightarrow \mathcal{G}_\varepsilon \\ \kappa \rightarrow \frac{1}{v[\sigma]\mathcal{G}_p} \\ A_* \rightarrow \mathcal{G}_p(v[\sigma]+1) \end{array} \right\}. \quad (6)$$

$$X_{\text{сорб}} = a \frac{bp}{1+bp}. \quad (7)$$

В (7) $X_{\text{сорб}}$ – абсорбционный аналог «изотермы мономолекулярной абсорбции» (газов/жидкости); a – предельное значение $X_{\text{сорб}}$ (максимальная абсорбция при заполнении абсорбентом пор и трещин в заданном геомеханическом состоянии пород или геоматериала); b – параметр, характеризующий отношение скоростей абсорбции и удаления газов/жидкости из заданного объема пор и/или трещин (аналог соответствующего коэффициента в исходном идеализированном уравнении Ленгмюра для изотерм мономолекулярной адсорбции газов/жидкостей).

Формулы (6) и (7), с учетом изложенных в [1] закономерностей, свидетельствуют о существовании непосредственной связи между нелинейными деформационно-волновыми и массо-газообменными (в т.ч. и физико-химическими) процессами в многофазных напряженных геосредах блочно-иерархического строения, осуществляемой через механизм знакопеременного движения геоблоков-носителей пакетов маятниковых волн. Иными словами, имеет место «модуляция» массо-газообменных процессов в реальных массивах горных пород деформационно-волновыми процессами за счет «осциллирующего» движения их структурных элементов [2].

**Определение калибровочных коэффициентов связи
между уравнением адсорбции и кинематическом выражением
для маятниковых волн на основе натуральных данных
для продуктивных угольных пластов**

Для установления конкретной количественной связи между уравнением адсорбции и кинематическом выражении для маятниковых волн в (3) введем калибровочные коэффициенты α и β для оператора соответствия Ω (6):

$$a = \vartheta_v \cdot \alpha, b = 1/\nu[\sigma]\vartheta_\rho \cdot \beta. \quad (8)$$

Следовательно, из (8) имеем:

$$\alpha = \frac{a}{\vartheta_v}, \beta = b \cdot \nu[\sigma]\vartheta_\rho, \quad (9)$$

где a, b – обобщенные коэффициенты сорбции из (7).

Очевидно, что для количественного определения калибровочных коэффициентов α и β необходимо иметь данные о геомеханическом инварианте $\mu_\Delta(\delta)$ (или его аналоге для углеродных сеток каменных углей – физико-химическом инварианте μ_Δ^*) и соответственно параметре $\nu[\sigma]$, а также скоростях распространения P, S и μ -волн в углях различных стадий метаморфизма [1].

Определение количественных значений физико-химического инварианта μ_Δ^* для углей различных стадий метаморфизма, а также структурного параметра геосреды $\nu[\sigma]$

На основе изложенных выше экспериментальных исследований структурных особенностей углей [4], их пористости и с учетом $Lc=\Delta$ были оценены значения физико-химического инварианта μ_Δ^* для разных стадий метаморфизма (табл. 1). Для количественного определения физико-химического инварианта μ_Δ^* , с учетом [1] необходимо обратиться к схеме структуры каменных углей (рис. 1), исходя из которой можно определить μ_Δ^* и толщину углеродной сетки lc для разупорядоченной области:

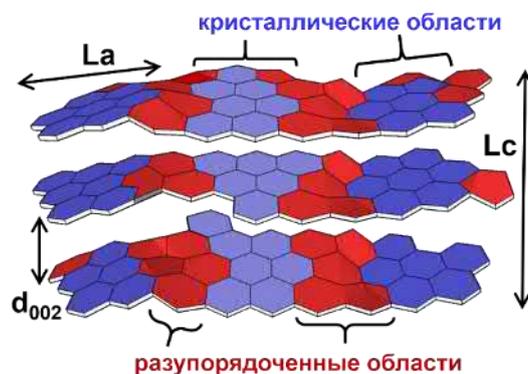


Рис. 1. Схема структуры каменных углей

$$l_c = \frac{L_c}{(N-1)} - d_{002}, \mu_{\Delta}^* = \frac{d_{002}}{l_c}. \quad (10)$$

Для кристаллической области углеродной сетки ее толщину можно считать равной диаметру атома углерода 0,154 нм [5]. Поскольку отделяющие структурные неоднородности (геоблоки) трещины или поры всегда частично заполнены газом, жидкостью или более мелким фрагментированным твердым веществом, для реальных массивов горных пород применяется упрощенная связь [1]:

$$v_{\Delta}(\delta) \sim 10^{-1} \mu_{\Delta}(\delta). \quad (11)$$

Структурный параметр геосреды $v[\sigma]$ можно определить из (11), с учетом полученных экспериментальных значений скоростей распространения P , S и μ -волн в углях различных стадий метаморфизма.

Таблица 1

Значения физико-химического инварианта μ_{Δ}^*
для разных стадий метаморфизма угля

V^{daf} , %	Расстояние между углеродными сетками, d_{002} , 10^{-10} м	Толщина углеродной сетки l_c , 10^{-10} м	μ_{Δ}^*	$v[\sigma]$
14,8	3,50	1,70	2,1	0,21
15,6	3,40	2,10	1,6	0,16
15,8	3,50	1,23	2,9	0,29
18,4	3,50	0,63	5,6	0,56
18,6	3,50	0,50	7,0	0,70
20	3,50	0,53	6,7	0,67
21	3,50	0,58	6,1	0,61
21,9	3,50	0,87	4,0	0,40
22,4	3,50	1,20	2,9	0,29
30,3	3,50	2,00	1,8	0,18
32,6	3,50	1,55	2,3	0,23
35,1	3,60	5,20	0,7	0,04
37	3,60	1,47	2,5	0,25
39,7	3,6	4,50	0,8	0,08

Определение ϑ_{ε} – средней скорости (по модулю) трансляционного движения «соударяющихся» геоблоков диаметром Δ

Н.Н. Пузыревым [7] предложена весьма простая (но достаточно универсальная) линейная зависимость скоростей распространения продольных волн от плотности горных пород вида:

$$\vartheta_p[\text{км/с}] = 6 \cdot \rho[\text{г/см}^3] - 11 \quad (12)$$

При обработке данных из каталога [6] на основе (12) по 735 пластопересечениям углей Кузбасса с различными физико-химическими свойствами ($0,7\% \leq W \leq 9\%$; $1,3\% \leq P \leq 30\%$; $7\% \leq V^{daf} \leq 45\%$; $30 \text{ м} \leq H \leq 1050 \text{ м}$ (W – аналитическая влажность, %; P – пористость, %; V^{daf} – выход летучих, %; H – глубина залегания пласта в точке отбора пробы, м) нами получены результаты, отраженные на рис. 2.

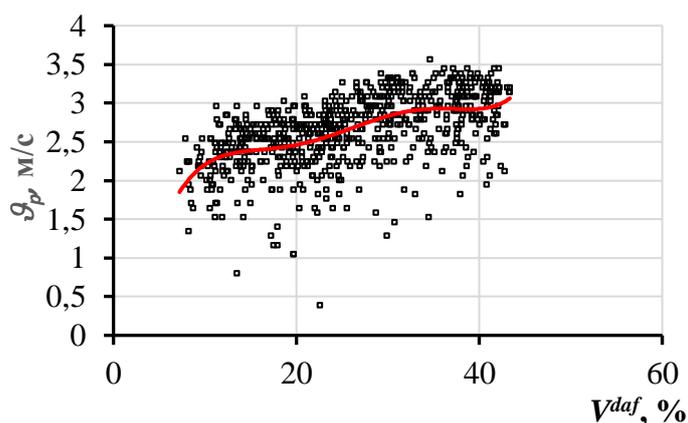


Рис. 2. Распределение скоростей прохождения продольных волн в углях по стадиям метаморфизма

Как видно из приведенных выше данных, скорости распространения продольных волн для углей имеют определенный статистический «разброс». Одной из причин такого «разброса» является распределение углей по стадиям метаморфизма, полученного авторами на основе [8]. На рис. 2 явно выделяются 2 интервала выхода летучих веществ, на которых скорости продольных волн имеют тенденцию к понижению: в области $\sim 20\%$ и 40% . Причем при $V^{daf} \approx 20\%$ скорости продольных волн имеют минимальное значение для каменноугольной стадии метаморфизма.

Средняя скорость (по модулю) трансляционного движения «соударяющихся» геоблоков диаметром Δ определена из формулы (3) с учетом данных рис. 2, табл. 1 и представлена на рис. 3 и в табл. 2:

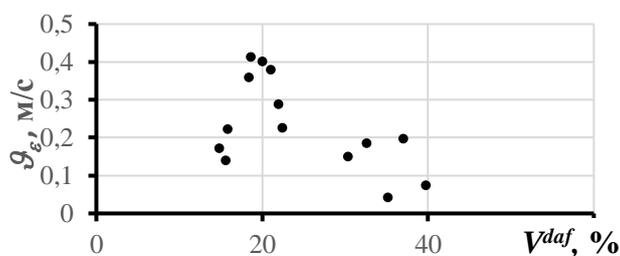


Рис. 3. Средняя скорость (по модулю) трансляционного движения «соударяющихся» геоблоков для разных стадий метаморфизма

Таблица 2

Скорости распространения продольной волны в геоблоках-носителях μ -волны ϑ_p и трансляционного движения ϑ_ε «соударяющихся» геоблоков для разных стадий метаморфизма

V^{daf} , %	ϑ_p , км/с	ϑ_ε , м/с
14,8	2,38	0,17
15,6	2,39	0,14
15,8	2,39	0,22
18,4	2,43	0,36
18,6	2,43	0,41
20	2,46	0,40
21	2,49	0,38
21,9	2,51	0,29
22,4	2,53	0,23
30,3	2,84	0,15
32,6	2,89	0,18
35,1	2,92	0,04
37	2,92	0,20
39,7	2,91	0,07

Экспериментальное определение коэффициентов сорбции a , b и калибровочных коэффициентов α и β

Коэффициенты сорбции a , b определены для разных стадий метаморфизма (табл. 3). Распределение экспериментальных данных в [9] аппроксимируют следующие аналитические выражения для расчета коэффициентов a и b метаноемкости на основе уравнения Ленгмюра (7):

предельная метаноемкость-

$$a = -0,0012 \cdot (V^{daf})^3 + 0,091 \cdot (V^{daf})^2 - 2,25 \cdot V^{daf} + 35,7, \quad 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (13)$$

коэффициент метаноемкости-

$$b = 3,9 \cdot (V^{daf})^{-0,3}, \quad 10^{-6} \text{ 1/Па}, \quad (14)$$

где V^{daf} - среднее значение выхода летучих веществ на глубине 100 м для свит Кузнецкого угольного бассейна.

Зависимости калибровочных коэффициентов α и β , вычисленных по (8) и (9) с учетом физико-химического инварианта μ_Δ^* для углей различных стадий метаморфизма, представлены на рис. 4.

Коэффициенты сорбции a , b для углей различных стадий метаморфизма

$V^{daf}, \%$	a	b
14,8	18,442	1,751
15,6	18,190	1,724
15,8	18,134	1,717
18,4	17,634	1,640
18,6	17,611	1,635
20	17,500	1,600
21	17,468	1,577
21,9	17,465	1,557
22,4	17,473	1,546
30,3	17,689	1,412
32,6	17,486	1,382
35,1	16,946	1,351
37	16,245	1,330
39,7	14,714	1,302

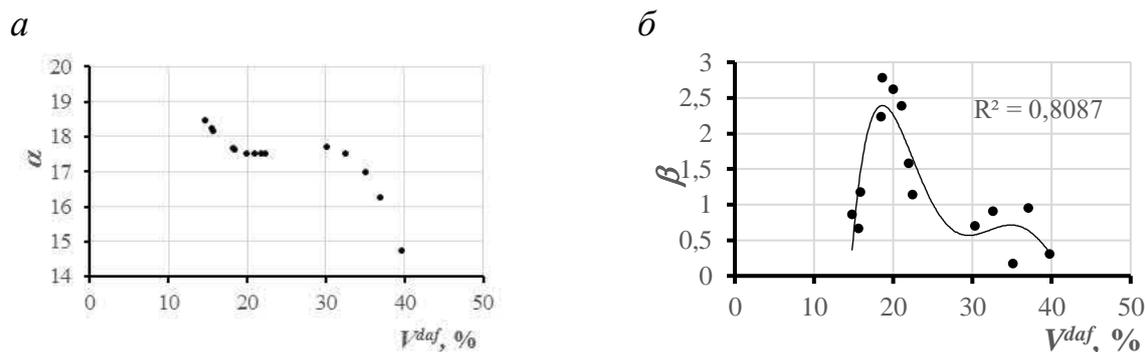


Рис. 4. Зависимости калибровочных коэффициентов α и β от выхода летучих веществ с учетом определенного для них значений физико-химического инварианта μ_{Δ}^*

Величины дисперсий выборки (табл. 4) экспериментальных данных как меры «разброса» значений некоторой оцениваемой величины x_i вычислялись по стандартной формуле:

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1) , \quad (3.3.15)$$

где \bar{x} - выборочное среднее из n значений; S - стандартное отклонение выборки.

Дисперсия и стандартные отклонения калибровочных коэффициентов α и β для физико-химического инварианта μ_{Δ}^*

	α	β
Выборочное среднее	17,36	1,30
Дисперсия	0,86	0,66
Стандартное отклонение	0,93	0,81

Выводы и заключение

Таким образом, впервые определены калибровочные коэффициенты в операторе соответствия $\Omega\{\dots\}$ для уравнений (1) и (3), верифицированные в сравнении с имеющимися измерениями в лабораторных и натуральных экспериментах для углей всего метаморфического ряда. Установленные калибровочные коэффициенты характеризуются практическим постоянством, несмотря на разные стадии метаморфизма углей Кузбасса: коэффициент α имеет значение 17,36 с дисперсией 0,86, что составляет $\approx 5\%$ от выборочного среднего; коэффициент β равен 1,30 с дисперсией 0,66 ($\approx 50\%$). Значения полученных дисперсий весьма важны, т.к. позволяют учесть все многообразие основных стадий метаморфизма угольных месторождений Кузбасса в теории и прогнозе их выбросоопасности, т.е. учитывать реальные качества угольных пластов. На основе определения калибровочных коэффициентов связи между уравнением адсорбции Ленгмюра и кинематическим выражением В.Н. Опарина для волн маятникового типа по данным натуральных измерений на угольных месторождениях Кузбасса впервые установлены непосредственные количественные связи между нелинейными деформационно-волновыми и физико-химическими процессами, протекающими в реальных многофазных органогенно-насыщенных массивах горных пород, при нарушении их исходного напряженно-деформированного и термодинамического состояния источниками различного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опарин В. Н. К теоретическим основам описания взаимодействия геомеханических и физико-химических процессов в угольных пластах // ФТПРПИ. – 2017. – № 2. – С. 3–19.
2. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах: // ФТПРПИ. – Ч. 1. – 2012. – № 2. – С. 3–27; Ч. 2. – 2013. – № 2. – С. 3–46; Ч. 3. – 2014. – № 4. – С. 10–38; Ч. 4. – 2016. – № 1. – С. 3–49.
3. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф. и др. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. – Новосибирск: Наука, 2010. – 404 с.
4. Киряева Т.А. Исследование параметров структуры углей Кузбасса методом рентгеновской дифракции / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018. Междунар.науч.конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений

полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов. – Новосибирск: СГУГиГ, 2018. – Т. 5. – С. 49–52.

5. <https://www.ngpedia.ru/pg4608076QpNuigz0001001822/>.

6. Свидетельство № 2018620264 на БД. Российская Федерация. Каталог метаноемкости углей Кузбасса / Киряева Т.А., Опарин В.Н.; Зарегистр. 13.02.2018 г.

7. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. – Новосибирск. Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. – 301 с.

8. Штумпф Г.Г., Рыжков Ю.А., Шаламанов В.А. и др. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. М.: Недра, 1994. 225 с.

9. Киряева Т. А. Разработка методов энергетического анализа и прогнозирования газодинамической активности углетановых пластов Кузбасса – Riga, Latvia: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 332 с.

© В. Н. Опарин, Т. А. Киряева, 2021

ОБОСНОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВОЗДУХА МЕТРОПОЛИТЕНОВ

Тимофей Сергеевич Ощепков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), Россия, 630091, Новосибирск, Красный проспект 54, инженер лаборатории рудничной аэродинамики, аспирант, тел. (952)921-27-78, e-mail: timofeyoshchepkov@gmail.com

Лаврентий Александрович Кияница

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), Россия, 630091, Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (903)049-31-85, e-mail: Lavrentij.Kijanitz@yandex.ru

Иван Владимирович Лугин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), Россия, 630091, Новосибирск, Красный проспект 54, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383)205-30-30 (доб. 179), e-mail: ivlugin@misd.ru

К метрополитену, как к месту с массовым пребыванием людей, предъявляются высокие требования по поддержанию нормативных параметров микроклимата и качеству воздуха, а именно содержанию взвешенной пыли в нем. Для поддержания концентрации пыли в нормативных пределах, предлагается использовать воздушные фильтры, установленные в пристанционных вентиляционных сбоях в потоке воздуха от поршневого эффекта движущихся поездов. В результате ранее проведенных численных экспериментов были определены параметры нестационарного воздухораспределения от поршневого эффекта поездов и структура воздушного потока в пристанционных вентиляционных сбоях в двумерной постановке, позволяющие определить тип фильтрационного оборудования для очистки воздуха метрополитена от пыли и место его установки в вентиляционной сбоях. Для обоснования выбора типа фильтрационного оборудования проведен обзор и анализ геометрических, конструктивных и эксплуатационных параметров существующего оборудования. Предложен наиболее подходящий тип фильтрационного оборудования для очистки воздуха от пыли.

Ключевые слова: метрополитен, поршневой эффект, воздухораспределение, фильтрационное оборудование, пыль

VALIDATION OF FILTRATION EQUIPMENT FOR AIR DEDUSTING IN SUBWAYS

Timofey S. Oshchepkov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Engineer at the Mine Aerodynamics Laboratory, Post-Graduate Student, +7 952 921 2778, e-mail: timofeyoshchepkov@gmail.com

Lavrenty A. Kiyanitsa

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54, Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher at the Mine Aerodynamics Laboratory, +7 903 049 3185, e-mail: Lavrentij.Kijanitz@yandex.ru

Ivan V. Lugin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54, Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher at the Mine Aerodynamics Laboratory, office: +7 383 205 3030 ext. 179, e-mail: ivlugin@misd.ru

Subways, as the places where a large number of people are present, are put under stringent standards of high microclimate and air quality, namely, the content of air-borne dust. In order to maintain dust concentration within the permissible limits, it is suggested to install air filters at ventilation connections at subway stations, which are affected by the piston effect. Using the earlier experimental results, the nonstationary air flow parameters under the piston effect and the structure of air flow at the ventilation connections at subway stations are determined in two-dimensional layout, which allows selection of filtration equipment for removal of dust from subway air, and enables determination of the equipment location at ventilation connections. In order to validate the filtration equipment selection, the review and analysis of the geometry, design and performance of the available facilities are carried out. The most suitable filtration equipment for air dedusting is suggested.

Keywords: subway, piston effect, air distribution, filtration equipment, dust

Введение

Процесс эксплуатации метрополитена сопровождается постоянным выделением различных вредностей. В данной статье рассматривается одна из основных вредностей – взвешенная пыль. На основании действующих санитарных и нормативных требований [1, 2], концентрацию взвешенной пыли в воздухе метрополитенов необходимо поддерживать не выше допустимых значений ПДК. Ряд проведенных исследований [3-6] указывает на то, что в воздухе присутствуют твердые частицы во взвешенном состоянии в концентрации, превышающей ПДК. К примеру, концентрация пыли на рабочих местах персонала метрополитена превышает норму в 1,3-3,4 раза [3]. Согласно исследованию [5] концентрация взвешенных частиц PM10 и PM2.5, то есть частиц размером 10 мкм и 2,5 мкм соответственно, в метрополитене в 1,9 и 1,8 раза выше, чем для наземного рельсового транспорта. Содержание в воздухе мелкодисперсной пыли в высокой концентрации приводит к возникновению болезней органов дыхания [7]. Кроме этого пыль, оседающая на внутренних поверхностях сооружений метрополитена и обделки тоннелей, является благоприятной средой для распространения патогенных бактерий [8]. На основании выше сказанного следует вывод о необходимости дополнительной фильтрации и обеспыливания воздуха в сооружениях метрополитенов.

Авторами настоящей статьи предлагается устанавливать устройства для очистки воздуха в пристанционных вентиляционных сбойках, так как значительная часть тоннельного воздуха проходит именно через вентсбойки [9-11], образуя циркуляционное кольцо, причем расход воздуха, вовлекаемый в циркуляцию,

увеличивается с повышением количества встреч поездов. Для определения геометрических, конструктивных и эксплуатационных параметров фильтрующих устройств проведен ряд численных экспериментов [11], в ходе которых определены закономерности изменения скорости тоннельного воздуха, инициируемого поршневым эффектом от движения поездов, через вентиляционные сбойки в зависимости от положения поездов в тоннеле и скорости их следования.

Целью данной работы является обоснование выбора наиболее подходящего типа фильтрационного оборудования для очистки воздуха от взвешенной пыли в подземных сооружениях метрополитенов.

Обоснование требований к рабочим параметрам оборудования

В настоящее время оборудование для очистки воздуха от пыли предусматривается только в системе местной вентиляции метрополитенов. Системы местной вентиляции предусматриваются для подземных и наземных производственных, бытовых и других помещений [1]. Причем, забор воздуха осуществляется со станции или из перегонных тоннелей. Выброс воздуха из обслуживаемых помещений осуществляется в перегонные тоннели за станцией по ходу движения поезда. В системах тоннельной вентиляции фильтрационное оборудование не предусматривается. Наружный городской воздух, забираемый, как правило, из зеленых массивов, парков и скверов, подается в тоннели без предварительной его очистки [12, 13]. Помимо взвешенной пыли, вносимой с приточным воздухом, в метрополитене имеются внутренние источники пылеобразования – это истирание тормозных колодок подвижного состава, выветривание полотна и обделки тоннелей, а также пыль и грязь, вносимая пассажирами. Таким образом, очистка воздуха от пыли производится только в системах местной вентиляции, что является недостаточным мероприятием. Воздух, поступающий и циркулирующий в тоннелях метрополитена, не подвергается очистке от взвешенных частиц пыли, которые, в свою очередь, могут оказывать негативное влияние на здоровье человека и имеют тенденцию к накоплению в тоннельном воздухе.

В исследованиях [14, 15] рассмотрен химический состав взвешенных частиц PM_{2.5}, находящихся в воздухе метрополитена города Барселона, Испания. Образцы частиц были собраны во время работы метрополитена и подвергнуты химическому анализу для определения основных показателей. Взвешенные частицы PM_{2.5} были в основном представлены Fe₂O₃ (30–66%) и углеродистыми веществами (18–37%).

В результате проведенного исследования [11] получены закономерности изменения скорости движения тоннельного воздуха и структура потока в пристанционной вентиляционной сбойке, позволяющие определить месторасположение фильтрующего оборудования и его тип. На основе этих данных фильтрационное оборудование следует размещать в зоне потока воздуха, с однонаправленными векторами скорости, для эффективного улавливания взвешенной пыли. Размер зоны приблизительно составляет 50% сечения вентиляционной сбойки, что видно на рис. 1а – 1г.

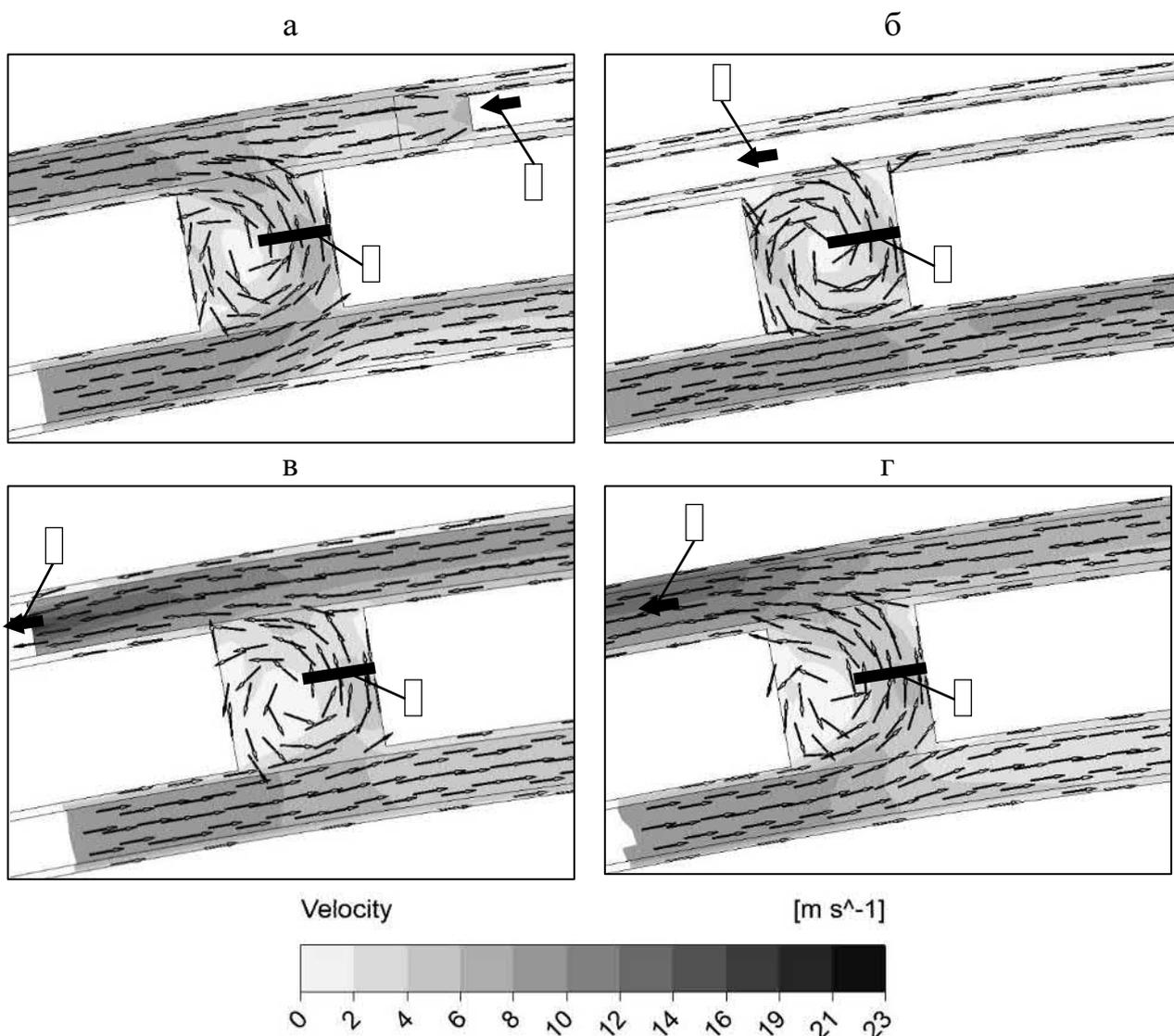


Рис. 1. Векторы и поле скоростей при прохождении поезда вентиляционной сбойки. Рисунок:

а – момент времени, когда поезд подходит к вентиляционной сбойке; б – момент времени, когда сечение вентиляционной сбойки перекрыто движущимся мимо поездом; в, г – момент времени, когда поезд преодолел вентиляционную сбойку. На рисунках стрелками указано направление движения потока воздуха; 1 – место размещения фильтрационного оборудования; 2 – направление движения поезда.

Ключевыми параметрами для подбора оборудования, предназначенного для очистки воздуха метрополитена от взвешенной пыли, является скорость движения воздуха в месте его установки, устойчивость к резкому непродолжительному изменению направления движения воздуха, происходящему в момент времени, когда отправляющийся со станции поезд приближается к вентиляционной сбойке [11], располагаемый перепад давления. Максимальная скорость воздуха в вентсбойке, направленная поперек зоны установки фильтрационного оборудования, составляет 3,1 м/с [11], располагаемый перепад давления в месте установки фильтрационного оборудования – 30 Па.

Из приведенных выше параметров запыленного потока в зоне установки фильтрационного оборудования можно обозначить основные требования к нему:

- размер улавливаемой фракции;
- скорость воздушного потока;
- аэродинамическое сопротивление установки (перепад давления).

Обзор фильтрационного оборудования

Проведем анализ возможности применения выпускаемого промышленностью фильтрационного оборудования, основанного на различных способах очистки воздушного потока, для пылеулавливания в пристанционных вентиляционных сбойках метрополитена. В ходе обзора справочной и нормативной литературы [16-20] составлена сравнительная характеристика пылеулавливающего оборудования, представленная в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики пылеулавливающего оборудования.

Способ очистки воздушного потока (газа)	Тип аппарата	Аэродинамическое сопротивление, Па	Размер улавливаемой фракции, мкм	Скорость воздушного потока, м/с	Способ регенерации (очистки)
Сухая механическая очистка	Инерционные и жалюзийные пылеуловители, центробежные пылеуловители (циклоны)	500-1500	10 и более	5 – 25	Очистка пылесборника
	Экранный инерционный пылеуловитель	25-100	10 и более	5 – 25	Очистка пылесборника
Фильтравание	Рукавные тканевые фильтры	700-1000	1 и более	0,03	Очистка сжатым воздухом или вибровстряхиванием, при снижении эффективности после регенерации замена фильтра
	Фильтры из пористой керамики, металлокерамики, пластмассы, кассетные, картриджные	1000-3000	0,3 и более	3	Очистка фильтрующего материала промывкой в воде или пневматически
Фильтравание	Плоские ячейковые фильтры, панельные фильтры	17-250	10 и более	3	Очистка фильтрующего материала промывкой в воде
Фильтравание	Ячейковые и другие фильтры с тканевыми и неткаными фильтрующими материалами	40-250	0,1 и более	2 – 3	Замена фильтра

Способ очистки воздушного потока (газа)	Тип аппарата	Аэродинамическое сопротивление, Па	Размер улавливаемой фракции, мкм	Скорость воздушного потока, м/с	Способ регенерации (очистки)
Мокрая очистка	Скрубберы, пенные пылеуловители	40-500	5 и более	0,8 – 4	Не требуется
Электрическая очистка	Электрофильтры (сухие и мокрые)	10-250	0,1 и более	0,8 – 3	Чистка (промывка) осадительной камеры, замена угольных катализаторов

Обсуждение

На сегодняшний день промышленностью выпускается широкий спектр фильтрационного оборудования для очистки воздушного потока от взвешенной пыли. Рабочие характеристики данного оборудования, а именно: скорость воздушного потока, размер улавливаемой фракции, аэродинамическое сопротивление и способ регенерации – значительно отличаются в зависимости от конструкции аппарата и способа очистки воздушного потока, что видно из таблицы 1. Помимо основных требований для подбора фильтрационного оборудования, обозначенных ранее, следует принимать во внимание его габариты, необходимость подключения аппарата к системе водоснабжения и водоотведения, к электрической сети. Дополнительно следует уделять внимание автономности фильтрационного оборудования, то есть очистка от осевшей пыли на поверхности конструкции или в специальном бункере должна производиться в автоматическом режиме, при минимальном участии человека в этом процессе, поскольку предлагаемое место установки – пристанционная вентиляционная сбойка, доступ к которой крайне ограничен. Путем сопоставления требований к условиям работы фильтров, при которых будет достигаться наибольшая эффективность фильтрации, и фактических условий работы в подземных сооружениях метрополитенов, выявлено, что наиболее подходящими являются: 1) экранные инерционные пылеуловители; 2) плоские ячейковые и панельные фильтры; 3) электрофильтры. Выбор данных фильтрующих аппаратов обусловлен их: 1) низким начальным аэродинамическим сопротивлением; 2) допустимой скоростью воздушного потока; 3) способом регенерации и возможностью автоматизации этого процесса; 4) размером улавливаемой фракции.

Заключение

Проведен анализ возможности применения выпускаемого промышленностью фильтрационного оборудования, основанного на различных способах очистки воздушного потока, для пылеулавливания в пристанционных

вентиляционных сбойках метрополитена. Определены наиболее подходящие конструкции фильтрационного оборудования.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свод правил 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 [Текст] : утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012 : дата введ. 01.01.2013. — М.: [б.и.], 2013. — 260 с.

2. СП 2.5.2623-10 Санитарные правила эксплуатации метрополитенов. Изменения и дополнения N 1 к СП 2.5.1337-03 [Текст] : утв. Пост. Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2010 : дата введ. 08.06.2010. — М.: [б.и.], 2010. — 15 с.

3. Хунашвили Н.Г. [и др.] Клинико-гигиенические параллели при исследовании условий труда и состояния здоровья работников тбилисского метрополитена / Н.Г. Хунашвили, Р.Г. Кверенчиладзе, М.П. Цимакуридзе, Л.Ш. Бакрадзе, Майя П. Цимакуридзе // Аллергология и иммунология. — 2010. — том 11. — № 2. — с. 135-136

4. Сазонова А. М. Исследование пылевого фактора производственной среды метрополитена / А.М. Сазонова // Гигиена и охрана труда транспортной отрасли. — 2016. — с. 79-85

5. Winnie Kam, Kalam Cheung, Nancy Daher, Constantinos Sioutas. Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro // Atmospheric Environment. Volume 45, 2011, Pages 1506-1516.

6. Senlin Lu, Dingyu Liu, Wenchao Zhang, Pinwei Liu, Yi Fei, Yan Gu, Minghong Wu, Shang Yu, Shinich Yonemochi, Xiaojun Wang, Qingyue Wang. Physicochemical characterization of PM_{2.5} in the microenvironment of Shanghai subway // Atmospheric Research. Volume 153, 2015, Pages 543-552.

7. Сачкова О.С. [и др.] Разработка мероприятий по оздоровлению условий труда тоннельных рабочих / О.С. Сачкова, Т.В. Матвеева, Н.И. Зубрев, М.В. Устинова, В.Л. Кашинцева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. — 2018. — Т. 7. — №3 (43). — с. 145-149

8. Копытенкова О.И., Шилова Е. А., Сазонова А.М. Комплексный подход к оценке биодеструктивных факторов при освоении подземного пространства / О. И. Копытенкова, Е. А. Шилова, А. М. Сазонова // Интернет-журнал «Науковедение». — Том 7. — №1 (январь - февраль 2015). — с. 1-16

9. A. M. Krasnyuk. CIRCULATORY AIR RINGS AND THEIR INFLUENCE ON AIR DISTRIBUTION IN SHALLOW SUBWAYS // Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A. // Journal of Mining Science, 2010. Т. 46. № 4. С. 431-437.

10. Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A. Experimental research into air distribution in a terminal subway station// Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 85, March 2019, Pages 21-28.

11. Ощепков Т.С., Кияница Л.А., Лугин И.В. К вопросу определения поля скоростей воздуха в тоннельных сооружениях линий метрополитена с использованием кольцевых моделей как способа топологической декомпозиции // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 8 т. Т. 2 : Национальная науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – С. 129 – 137.
12. В.Г. Храпов. Тоннели и метрополитены: Учебник для вузов / В.Г. Храпов, Е.А. Демешко, С.Н. Наумов и др. – М.: Транспорт, 1989 – 383 с.
13. В.Я. Цодиков. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов / В.Я. Цодиков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1975 – 568 с.
14. M.C. Minguillóna, C. Reche, V. Martinsa, F. Amato, E. de Miguel, M. Capdevila, S. Centelles, X. Querol, T. Moreno. Aerosol sources in subway environments // *Environmental Research*. Volume 167, 2018, Pages 314–328.
15. Vania Martins, Teresa Moreno, María Cruz Minguillon, Barend L. van Drooge, Cristina Reche, Fulvio Amato, Eladio de Miguel, Marta Capdevila, Sonia Centelles, Xavier Querol. Origin of inorganic and organic components of PM2.5 in subway stations of Barcelona, Spain // *Environmental Pollution*. Volume 208, 2016, Pages 125–136.
16. Чупалов В.С. Воздушные фильтры / В.С. Чупалов. – СПб : СПГУТД, 2005. – 167 с.
17. Алиев Г. М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. Спр. изд. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
18. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. - с.: ил., библиогр.
19. Штокман Е.А. Очистка воздуха: Учеб. пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 312 с.
20. ГОСТ Р ЕН 779-2014 Фильтры очистки воздуха общего назначения. Определение технических характеристик [Текст]: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 октября 2014 г. № 1419-ст: дата введ. 01.12.2015. – М.: Стандартинформ, 2014 – 68 с.

© Т. С. Ощепков, Л. А. Кияница, И. В. Лугин, 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОДОЛЬНЫХ ПЕРЕГОРОДОК

Станислав Александрович Павлов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, тел. (383) 205-30-30 (доб. 179), e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

В статье приведены результаты исследования аэродинамических процессов, протекающих в протяженных тупиковых выработках, проветриваемых за счёт эжекционного эффекта, возникающего при установке продольной перегородки. В программном комплексе Ansys проведено вычислительное моделирование процессов воздухораспределения на сопряжении с тупиковой выработкой, имеющей продольную перегородку. Отражено изменение местного аэродинамического сопротивления при прямом и реверсивном режиме работы шахтной вентиляции. Проведена оценка изменения скорости воздуха в протяженной тупиковой выработке, при осуществлении регулирования путем изменения угла открытия подвижной створки продольной перегородки. На основании полученных результатов, в статье показано, что применение продольных перегородок позволяет проветривать протяженные тупиковые выработки без применения механической вентиляции, за счет возникающего эжекционного эффекта.

Ключевые слова: вентиляция, проветривание шахт, продольная перегородка, вычислительное моделирование, тупиковая выработка, расход воздуха, аэродинамическое сопротивление

VENTILATION METHOD FOR LONG BLIND DRIFTS WITH LONGITUDINAL BAFFLES

Stanislav A. Pavlov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54, Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), office: +7 (383) 205 30 30 ext. 179), e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

The study focuses on aerodynamic processes in long blind drifts ventilated owing to ejection effect generated thanks to construction of longitudinal baffles. The numerical modeling of air distribution at the junction with a blind drift with a longitudinal baffle is implemented in ANSYS. The change in the local air drag in case of forward and reverse air flows is shown. The velocity variation in air flow in a long blind drift with adjustment of ventilation efficiency by alteration of the opening angle of the longitudinal baffle flap is estimated. Based on the obtained results, the author shows that construction of longitudinal baffles allows efficient ventilation in long blind drifts owing to the ejection effect, without forced ventilation arrangement.

Keywords: ventilation, mine ventilation, longitudinal baffle, computational modeling, blind drift, air flow rate, air drag

Введение

Забои в период проведения горных выработок образуют тупики, проветривание которых возможно только при помощи специальных устройств, позволяющих направлять часть воздуха сквозной струи в забои этих выработок [1-9].

Проветривание тупиковых выработок может осуществляться: за счет турбулентной диффузии, сжатым воздухом, при помощи вентиляторов местного проветривания (ВМП), за счет общешахтной депрессии. В некоторых случаях перечисленные способы комбинируются [10-13].

Согласно п. 154 ФНиП [14], за счет диффузии допускается проветривание тупиковых горных выработок длиной до 6 м при условии, что горные работы в них не ведутся.

Проветривание тупиковых выработок за счет непосредственного выпуска сжатого воздуха из воздухопровода неэффективно, так как при этом не обеспечивается быстрое очищение выработки по всей ее длине от вредных примесей. Кроме того, стоимость проветривания таких выработок будет очень высока [15].

На практике принято осуществлять проветривание тупиковых выработок при помощи ВМП. Поскольку в настоящее время это наиболее универсальный и надежный способ обеспечения подачи требуемого количества свежего воздуха в забой [16].

Из всех способов проветривания за счет общешахтной депрессии для тупиковых выработок большой длины наиболее приемлемы два: параллельными выработками и путем устройства продольной перегородки [10].

С целью поиска эффективных и экономичных способов проветривания тупиковых выработок без применения вентиляторов местного проветривания, рассмотрим вариант с применением продольной перегородки подробнее.

Методы

В п. 124 ФНиП [14] сказано, что в тупиковых горных выработках негазовых шахт, проветриваемых за счет общешахтной депрессии, средняя по сечению скорость воздуха должна быть не менее 0,15 м/с. Максимально допустимые скорости воздуха в очистных и тупиковых горных выработках – не более 4 м/с.

Согласно п. 83 ФНиП [14] допускается проветривание тупиковой выработки за счет общешахтной депрессии с использованием продольных перегородок из воздухонепроницаемого материала длиной не более 60 м на шахтах не выше II категории.

Достоинства проветривания тупиковых выработок большой длины при использовании продольной перегородки за счет общешахтной депрессии: надежность проветривания в связи с отсутствием вентиляционного оборудования; наличие непрерывной дежательной струи воздуха в забое [10, 12].

В тоже время недостатками такого способа проветривания является: загромождение выработки, что затрудняет транспортирование горной массы и материалов, особенно при проведении выработок малого сечения; значительные утечки воздуха через перегородку в связи с большой площадью ее поверхности; большой расход строительных материалов на возведение перегородки; снижение скорости проходки вследствие затрат времени на возведение перегородки; высокая стоимость проветривания [10, 12]. Кроме того, применение продольных

перегородок существенно увеличивает аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка вентиляционной сети.

В настоящей работе рассматривается проветривание протяженной тупиковой выработки за счет эжекционного эффекта, возникающего при обособленном применении продольной перегородки для одного из вариантов формирования глухого забоя. В общем виде, фрагмент исследуемого участка вентиляционной сети шахты представляет собой «колесо с нишей» (рис. 1). Все выработки исследуемой модели упрощены и имеют прямоугольное сечение с размерами сторон: 4,6 х 2,6 м. Длина тупиковой части выработки составляет 100 м. Рассмотрены варианты установки продольной перегородки у правого и левого бортов тупиковой выработки. Таким образом между перегородкой и ближайшем к ней бортом выработки образуется вентиляционный канал. Общим условием для расположения перегородки в выработке являлось следующее: один ее край, оснащенный подвижной створкой, устанавливается в потоке сквозной струи, а другой – вблизи груди забоя (рис. 1). Согласно п. 153 ФНиП [14], на негазовых шахтах допускается отставание продольной перегородки от груди забоя до 12 м. В представленной работе это расстояние было принято 4,6 м, кратно ширине выработки.

Расстояние от борта выработки до перегородки принято равным 0,6 м. Основным критерием выбора этого расстояния было сведение к минимуму помех передвижению самоходной техники. Поскольку применяемый парк техники в шахтах нашей страны обширен, то для заданного сечения и типа исследуемых выработок ограничимся размерами погрузочно-доставочной машины (ПДМ), как наиболее габаритной и часто применяемой при проходке. Анализ открытых источников показал, что для полноценной работы ПДМ, в среднем необходима ширина выработки от 4 м и более.

Из вышеннаписанного следует, что обособленное применение продольной перегородки для проветривания забоя не значительно перекрывает проходное сечение сквозной выработки, и влияние на аэродинамическое сопротивление исследуемого участка остается минимальным.

На основании вычислительного моделирования проанализировано поле скоростей воздуха на исследуемом участке, сравнивалось аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка без продольной перегородки, так и с ее установкой вдоль борта тупиковой выработки.

Для удобства сравнения местные сопротивления переведены из вида «безразмерный коэффициент местного сопротивления» к виду «коэффициент аэродинамического сопротивления» с размерностью $1 k_{\mu} = 9,81 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^8$ [17], при следующих параметрах воздуха: температуре – 20 °С, и атмосферном давлении – 101325 Па.

На основании литературных источников [17-21] можно аналитически рассчитать аэродинамическое сопротивление исследуемого участка. Согласно [10], аэродинамическое сопротивление исследуемого участка при нагнетательном способе проветривания составит 0,000647 k_{μ} , при всасывающем – 0,000539 k_{μ} .

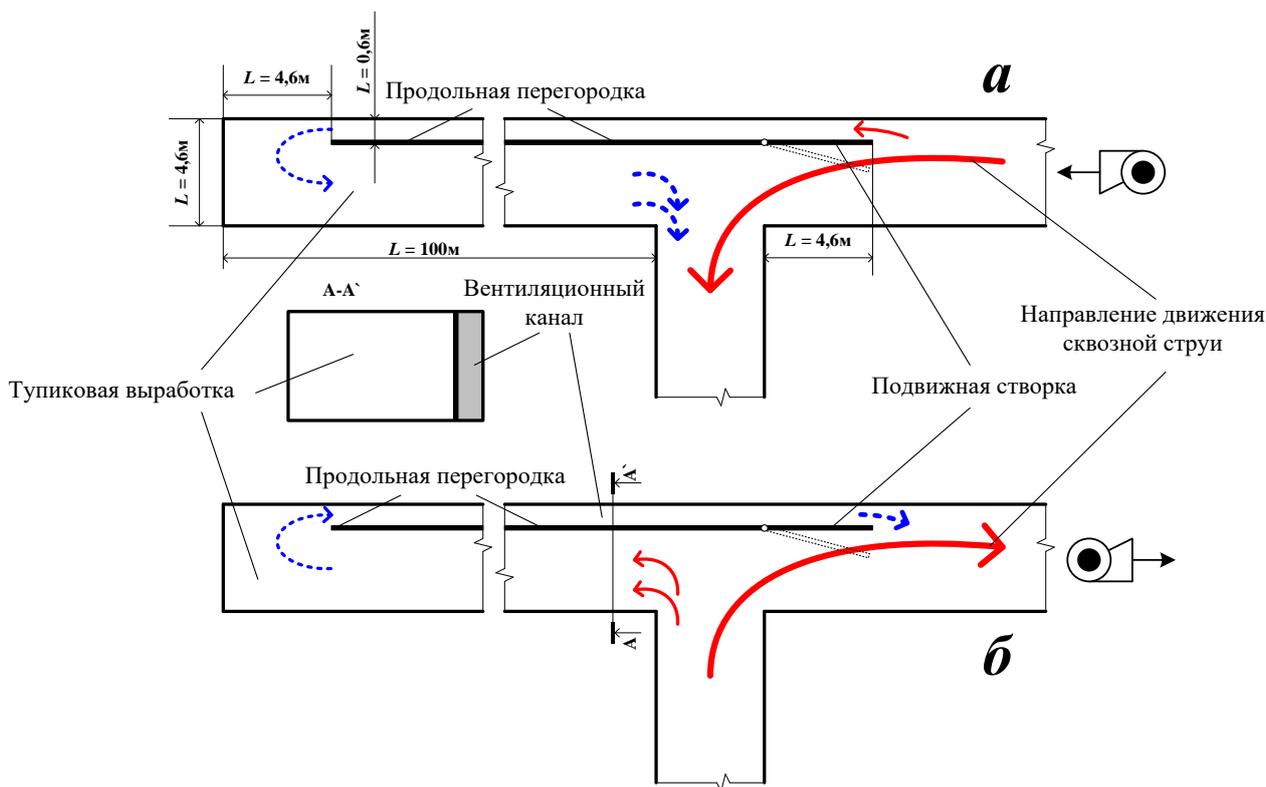


Рис. 1 Схема исследуемого участка вентиляционной сети:

a – при нагнетательном способе проветривания; *б* – при всасывающем способе проветривания. Красная стрелка – свежая струя воздуха; синяя стрелка – исходящая струя воздуха.

Поскольку дальнейшие исследования проводились в вычислительном комплексе Ansys CFX методом конечных объемов, было необходимо верифицировать полученные результаты [22-27]. Как уже отмечалось в работах [28, 29], исследование численной модели горных выработок методом конечных объемов показывает хорошую сходимость с результатами аналитических расчетов местных аэродинамических сопротивлений. Результаты вычислительного моделирования показали, что при нагнетательном способе проветривания аэродинамическое сопротивление исследуемого участка составит $0,000642 \text{ км}$, при всасывающем – $0,000537 \text{ км}$ (вариант 0, табл. 1). Как можно увидеть, расхождение результатов не превысило 0,4-0,8 %. Это позволяет доверительно относиться к последующим результатам исследования.

При моделировании воздухораспределения без применения продольной перегородки, для нагнетательного способа проветривания исследуемого участка, было выявлено, что за счет диффузии вихревые потоки воздуха проникают в тупиковую выработку на расстояние 10-12 м от ее устья. При всасывающем способе проветривания, за счет диффузии потоки воздуха из сквозной струи проникают в тупиковую выработку не более чем на 6 м от ее устья. В остальной части тупиковой выработки наблюдается зона застоя воздуха, где могут аккумулироваться вредные и ядовитые примеси. Поэтому, согласно ФНиП [14], при

отсутствии механической вентиляции подобные тупиковые выработки закрываются герметичными перемычками или сетчатым забором для предотвращения прохода в нее горнорабочих.

Результаты

Рассмотрим результаты расчета воздухораспределения (вариант 1, табл. 1) при установке продольной перегородки вдоль правого борта протяженной тупиковой выработки (рис. 2).

При нагнетательном способе проветривания (рис. 2а) в образовавшемся вентиляционном канале развивается средняя по сечению скорость воздуха 1 м/с. Поток воздуха перемещается по вентканалу до забоя, потом разворачивается и направляется по тупиковой выработке обратно к устью выработки. При этом в тупиковой выработке выполняется условие по скорости проветривания со средней по сечению скорости 0,15 м/с [14]. Установка продольной перегородки, в рассмотренном случае, увеличило аэродинамическое сопротивление исследуемого участка на 19 % и составило 0,000764 *кμ*.

На рис. 2б рассмотрено поле скоростей при всасывающем способе проветривания. Часть воздушного потока отделяется от сквозной струи, перемещается к груди забоя тупиковой выработки и через образовавшийся вентканал уходит на исходящую струю. При этом, через вентиляционный канал скорость воздуха составляет 3 м/с. Что позволяет проветривать тупиковую выработку со средней по сечению скоростью потока 0,5 м/с. Аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка увеличилось на 4 % по сравнению с вариантом без продольной перегородки и составило 0,000559 *кμ*.

Изменяя угол открытия подвижной створки (рис. 1), можно регулировать скорость воздуха, проходящего через образовавшийся вентиляционный канал, оказывая влияние на интенсивность проветривания тупиковой выработки.

Рассмотрим один из результатов расчета воздухораспределения при нагнетательном способе проветривания (вариант 2, табл. 1), когда подвижная створка отклонена на 1/4 ширины выработки, на 1,2 м (рис. 3а). Средняя скорость воздуха в вентканале увеличивается до 1,95 м/с. При этом тупиковая выработка проветривается со средней скоростью 0,3 м/с. Такое регулирование увеличивает аэродинамическое сопротивление исследуемого участка на 49,3 %, которое достигает в этом варианте значения 0,000957 *кμ*.

Подобное открытие подвижной створки на 1/4 ширины выработки в случае всасывающего способа проветривания (рис. 3б), обеспечивает среднюю скорость воздуха в вентканале 2,9 м/с. Проветривание тупиковой выработки при этом осуществляется со средней по сечению скоростью воздуха 0,46 м/с. Открытие подвижной створки на 1/4 ширины выработки увеличивает аэродинамическое сопротивление исследуемого участка на 18 %, которое в рассмотренном случае составит 0,000634 *кμ*.

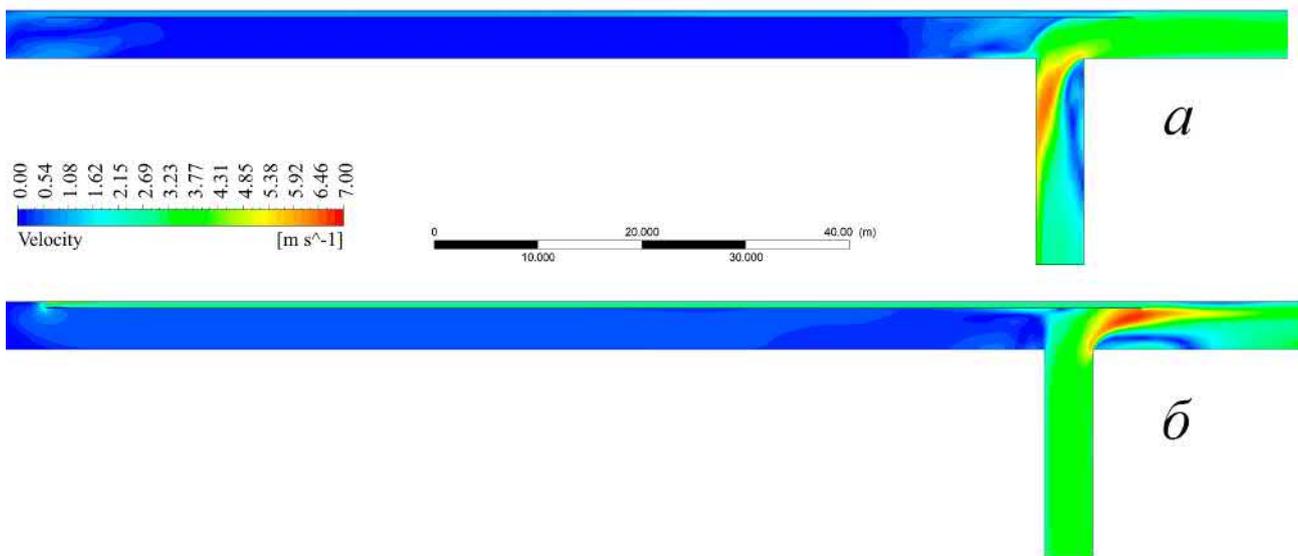


Рис. 2. Поле скоростей на исследуемом участке с установленной продольной перегородкой при нагнетательной (а) и всасывающей (б) схемах проветривания

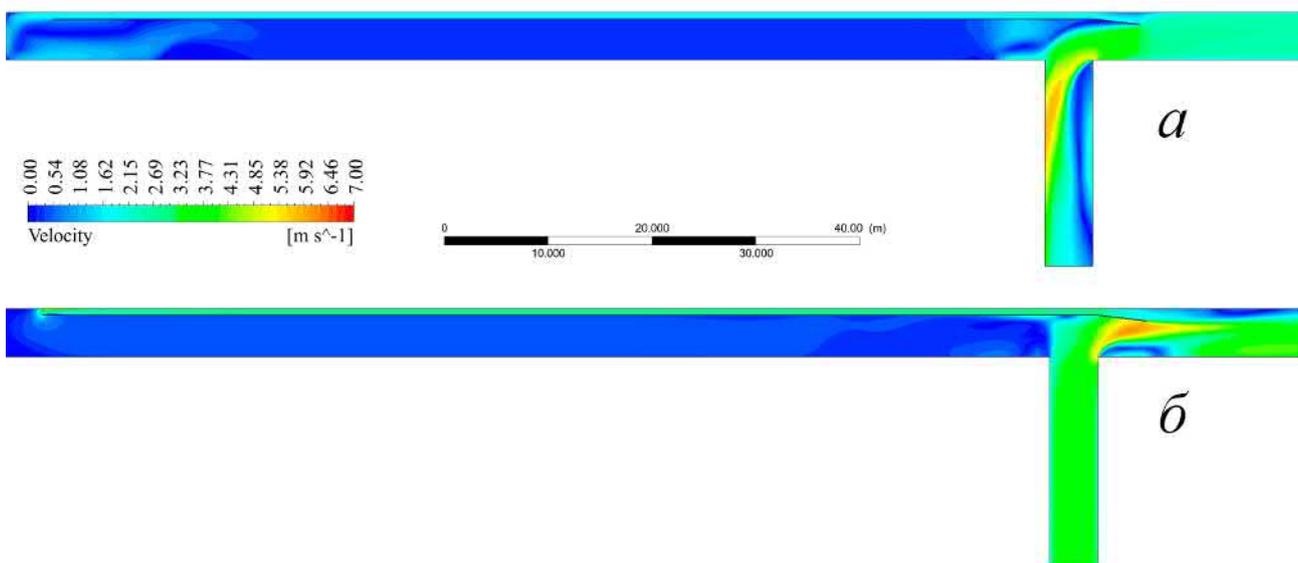


Рис. 3. Поле скоростей на исследуемом участке с установленной продольной перегородкой при нагнетательной (а) и всасывающей (б) схемах проветривания

Дальше рассмотрим вариант (вариант 3, табл. 1) с установкой продольной перегородки вдоль левого борта тупиковой выработки (рис. 4). Расстояние выступа продольной перегородки за пределы устья тупиковой выработки составляет 0,6 м, чтобы не создавать помех при маневрировании самоходной техники.

При нагнетательном способе проветривания (рис. 4а) в образовавшемся вентиляционном канале развивается средняя по сечению скорость воздуха 2,15 м/с. Тупиковая выработка в этом случае проветривается со средней по сечению скоростью потока 0,33 м/с. Такой вариант установки продольной

перегородки повысил аэродинамическое сопротивление исследуемого участка на 4,6 %, величина которого составила 0,000672 $k\mu$.

При реверсировании направления сквозной струи, когда применяется всасывающий способ проветривания (рис. 4б), средняя скорость воздуха в вентканале составит 0,9 м/с. Развиваемая скорость воздушного потока в тупиковой выработке, согласно полученным расчетам будет 0,13 м/с, что является ниже минимально допустимой. Кроме того, применение продольной перегородки, в рассмотренном случае, увеличивает аэродинамическое сопротивление исследуемого участка на 19,9 % и достигнет значения 0,000644 $k\mu$.

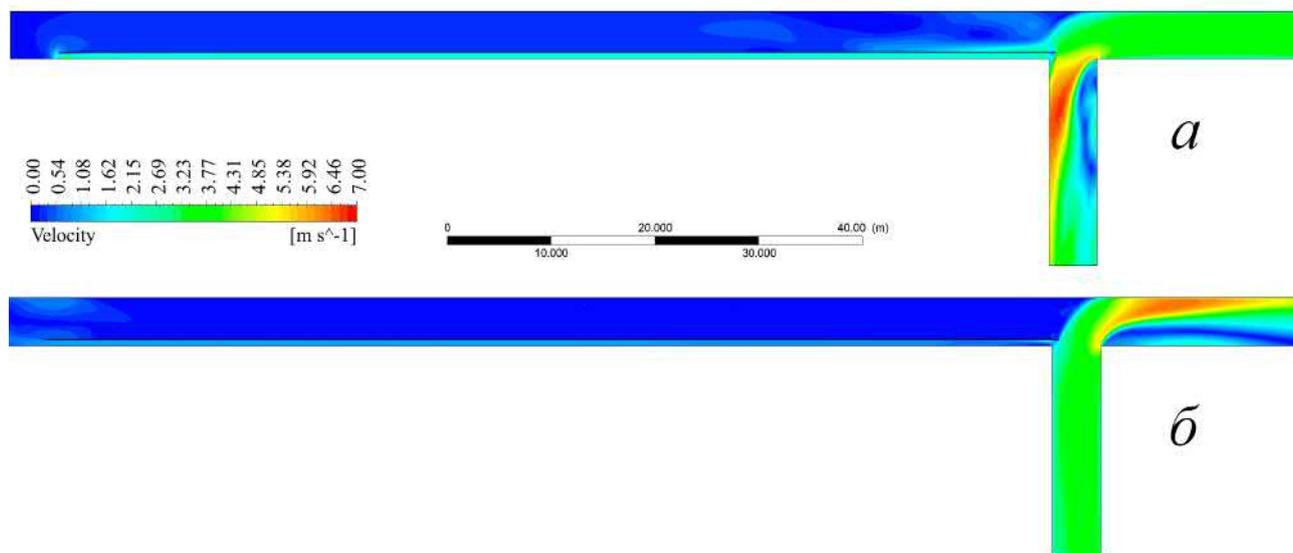


Рис. 4. Поле скоростей на исследуемом участке с установленной продольной перегородкой при нагнетательной (а) и всасывающей (б) схемах проветривания

Обсуждение

Как показали результаты проведенного исследования, обособленное применение продольных перегородок оказывает существенное влияние на аэродинамические процессы, возникающие в тупиковой выработке протяженностью до 100 м. В зависимости от направления движения сквозной струи, за счет возникающего эжекционного эффекта, тупиковая выработка может проветриваться с регламентированной скоростью потока воздуха. При этом существенно не повышая аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка вентиляционной сети.

Для удобства сравнения, отразим полученные результаты исследования в сводной таблице (таблица) и проанализируем их.

Сводная таблица результатов расчета аэродинамического сопротивления и средней скорости воздуха для рассмотренных вариантов установки продольной перегородки в тупиковой выработке

	Способ проветривания	Аэродин. сопр., <i>кμ</i>	Отношение аэродин. сопр., %	Скорость в вент. канале, м/с	Скорость в выработке, м/с
Аналитический расчет аэродин. сопр.	нагнетательный	0,000647	–	–	–
	всасывающий	0,000539	–	–	–
Вариант 0 (без прод. перегородки)	нагнетательный	0,000642	0,8	–	–
	всасывающий	0,000537	0,4	–	–
Вариант 1	нагнетательный	0,000764	19,0	1	0,15
	всасывающий	0,000559	4,0	3	0,50
Вариант 2	нагнетательный	0,000957	49,3	1,95	0,30
	всасывающий	0,000634	18,0	2,9	0,46
Вариант 3	нагнетательный	0,000672	4,6	2,15	0,33
	всасывающий	0,000644	19,9	0,9	0,13

Из результатов видно, что наиболее эффективными являются варианты: при всасывающем способе проветривания с установкой продольной перегородки у правого борта (вариант 1), а при нагнетательном – у левого борта (вариант 3). В этих вариантах наблюдаются максимальные расчетные скорости проветривания тупиковой выработки (0,33-0,5 м/с), при минимальном увеличении аэродинамического сопротивления (на 4-4,6 %) исследуемого участка.

Следует отметить, что проветривание тупиковой выработки при обособленной установке продольной перегородки в значительной степени зависит от постоянства величины скорости воздуха в сквозной струе. В случае применения указанного способа проветривания, тупиковая выработка обеспечивается минимально необходимым количеством воздуха для пребывания в ней горнорабочих, но недостаточным для ведения горных работ. Поэтому, для проведения проходческих работ, необходимо проложить в вентканале вентиляционный трубопровод, подключенный к ВМП, который будет обеспечивать забой требуемым количеством воздуха. Продольная перегородка в этом случае будет интенсифицировать проветривание забоя совместно с ВМП, проветривать забой в пассивном режиме при его простое, за счет возникающего эжекционного эффекта, и обеспечивать дополнительную защиту вентиляционного трубопровода от механических повреждений при ведении горных работ.

Заключение

Применение продольных перегородок, позволяет проветривать протяженные тупиковые выработки без применения механической вентиляции, за счет возникающего эжекционного эффекта. При этом способе проветривания, в протяженной тупиковой выработке обеспечивается минимально требуемая скорость

воздушного потока, необходимая для пребывания в ней горнорабочих, но недостаточным для ведения проходческих работ.

Благодарности

Данная статья написана по результатам исследований, приведённых в рамках научной темы FWNZ-2021-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимошенко А.М., Никифоров Д.В., Ворошилов Я.С., Поморцев А.А. Анализ существующих способов проветривания тупиковых подготовительных выработок // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2009. № 2. С. 54–64.

2. О некоторых физических явлениях при вымывании вредностей из тупиковых выработок / Я.Д. Паршин // Физическое моделирование тепловентиляционных и пылевых процессов. - Апатиты: АН СССР, 1977. - С.27.

3. Матросов, А.Ф. Исследования всасывающего способа проветривания тупиковых выработок / А.Ф. Матросов // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. - Свердловск, 1974. - Вып. 92. - С.3-7.

4. Матросов, А.Ф. Исследование влияния разных факторов на коэффициент турбулентной диффузии и кратности обмена воздуха при нагнетательном способе проветривания тупиковых выработок / А.Ф. Матросов, А.Н. Корзон, В.А. Исаков // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. - Свердловск, 1976.- Вып. 98. - С.30-35.

5. Петухов, В.А. Определение коэффициента использования воздуха в забоях подготовительных выработок при различных способах проветривания / В.А. Петухов // Управление газовыделением в угольных шахтах: Сб. науч. тр. ВостНИИ. - Кемерово, 1979. - Т.31. - С.117-122.

6. Черечукин В.Г. Оценка эффективности вентиляции тупиковых выработок по фактору взрывобезопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 10. С. 347–351.

7. Смирняков В.В., Мешков А.А. Особенности проветривания тупиковых выработок вентиляторами местного проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 3. С. 69–77.

8. Смирняков В.В. Особенности расчета аэродинамического сопротивления тупиковых выработок большой длины и сложной конфигурации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 7. С. 134–140.

9. Фельдман Э.П., Кирик Г.В., Стадник А.Д., Заполнение метаном тупиковых выработок угольных шахт при прекращении их проветривания // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 1. – С. 23 – 33.

10. Проветривание угольных шахт / Н.Ф. Кременчуцкий. - М. : ГОСГОРТЕХИЗДАТ, 1961. - 240 с.

11. Воздух в шахте : Трактат о проветривании угольных шахт / Ф. С. Клебанов; [Рос. акад. естеств. наук, Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, Рос. угольная компания]. - М. : Изд. дом "Имидж", 1995. - 574 с.

12. Рудничная вентиляция / А.А. Скочинский, В.Б. Комаров. – М.: Углетехиздат, 1959. – 632с.

13. Рудничная и промышленная аэрология / А.Ф. Милетич, И.М. Яровой, В.Н. Бойков. - М.: Недра, 1972. – 254 с.

14. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности в угольных шахтах" от 01 января 2021 года (Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 года

№ 507)

15. Проветривание тупиковых выработок большой длины. / Г.В. Дуганов, В. Ф. Дребница, И.П. Никитин, А.В. Дребница. - М.: Изд-во «Недра», 1968, - 75с.
16. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация / Н. Н. Мохирев, В. В. Радько. - М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2007. - 324 с.
17. Рудничная вентиляция: Справочник / Н.Ф. Гращенко, А.Э. Петросян, М.А. Фролов и др.; Под ред. К.З. Ушакова. – 2-е изд., перераб. И доп. - М. : Недра, 1988. - 440 с.
18. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей / А.А. Харев. — М.: Углетехиздат, 1954. —248 с.
19. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. –672 с.: ил.
20. Внутренние санитарно-технические устройства. Справочник проектировщика. Ч.3. Вентиляция и кондиционирование воздуха кн. 2. / Под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. - М. : Стройиздат, 1992. - 416 с.
21. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Посохин. - М. : АВОК-ПРЕСС, 2008. - 209 с.
22. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. -210 с
23. Электронное пособие ANSYS. Customer Training Material. Introduction to ANSYS Meshing.
24. Лекции по теоретическим методам исследования турбулентности: учебное пособие /Ю. И. Хлопков, В. А. Жаров, С. Л. Горелов. – М.: МФТИ, 2005. – 179 с.
25. Турбулентность: модели и подходы: курс лекций: 4.1 / П. Г. Фрик. – Пермь: ПГТУ, 1998. – 108 с.
26. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Published in the U.S.A/ 2014-2015 SAS IP , Inc.
27. Габарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. – СПб.: Издательство Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
28. Павлов С. А. Об изменении аэродинамического сопротивления вентиляционной сети шахты при реверсировании воздушного потока // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2019. – №2. Т.6. 207-211.
29. Павлов С.А. Оценка изменения величины местных аэродинамических сопротивлений элементов вентиляционной сети рудника при реверсивном режиме работы системы вентиляции // *Интерэкспо Гео-Сибирь.* – 2019. – Том 2, № 4. – С. 212-219.

© С. А. Павлов, 2021

О ВЛИЯНИИ СТРУЙНОГО ВЕНТИЛЯТОРА, УСТАНОВЛЕННОГО НА ОЧИСТНОМ КОМБАЙНЕ, НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СВЕРХДЛИННОЙ УГОЛЬНОЙ ЛАВЫ

Станислав Александрович Павлов

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, д. 54, кандидат технических наук, тел. (383) 205-30-30 (доб. 179), e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

В статье приведены результаты исследования аэродинамических процессов, протекающих в сверхдлинных угольных лавах. Проведенный расчет в вычислительном комплексе Ansys CFX, с использованием метода конечных объемов, показал, что в зависимости от места расположения механизированного комплекса в лаве изменяется аэродинамическое сопротивление исследуемого участка. Для повышения эффективности проветривания угольной лавы необходимо снизить ее аэродинамическое сопротивление. В основном оно определяется аэродинамическим сопротивлением механизированной крепи и очистного комбайна, имеющих громоздкие геометрические параметры, изменить которые технологически нельзя. Поэтому необходимо обеспечить принудительное перемещение воздушных масс в обход очистного комбайна, для снижения аэродинамического сопротивления исследуемого участка вентиляционной сети. В статье представлено обоснование способа снижения аэродинамического сопротивления сверхдлинной лавы. Суть которого состоит в увеличении расхода воздуха через лаву за счет установки осевого струйного вентилятора на очистном комбайне.

Ключевые слова: шахта, очистной забой, сверхдлинная лава, очистной комбайн, струйный вентилятор, аэродинамическое сопротивление, механизированная крепь

INFLUENCE OF JET FAN INSTALLED ON A CUTTER-LOADER ON AIR DRAG IN VERY LONG LONGWALL PANELS

Stanislav A. Pavlov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), office: +7 (383) 205 30 30 ext. 179), e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

The article presents studies into aerodynamic processes in very long longwall panels. The computations in ANSYS using the finite volume method show that air drag in longwalls varies versus position of the longwall mining system in the panel. Enhancement of ventilation efficiency in longwalls requires reduction in air drag. The longwall air drag is governed by the air drags of the powered roof support and cutter-loader. The latter have very large dimensions which are technologically unchangeable. For this reason, it is necessary to ensure forced air flow to by-pass the cutter-loader in the longwall panel. The estimate of advantages of the proposed method for the air drag reduction in very long longwall panels is presented. The method consists in increasing air flow rate in the longwall with the help of an axial jet fan mounted on the cutter-loader.

Keywords: mine, production face, very long longwall, cutter-loader, jet fan, air drag, powered roof support

Введение

Известно, [1-9], чем длиннее выработка, тем выше ее аэродинамическое сопротивление и тем меньшее количество воздуха перемещается через нее при прочих равных условиях. Это справедливо и к очистным выработкам, которые в настоящее время имеют тенденцию к увеличению своей протяженности, чтобы отвечать требованиям высокопроизводительных очистных механизированных комплексов [10-14]. Применяемые механизированные комплексы имеют громоздкие геометрические параметры и значительно перекрывают собой поперечное сечение лавы, тем самым существенно увеличивая ее аэродинамическое сопротивление. Изменить геометрические параметры механизированного комплекса технологически нельзя. Поэтому для снижения аэродинамического сопротивления участка лавы с комбайном необходимо обеспечить принудительное перемещение воздушных масс в обход очистного комплекса.

Эту задачу можно решить установкой осевого струйного вентилятора на очистной комбайн [15]. Такое техническое решение позволит снизить аэродинамическое сопротивление участка угольной лавы, не влияя на перепад статического давления в угольной лаве и не увеличивая тем самым утечки воздуха в выработанное пространство, т.к. струйный вентилятор создает только динамическое давление.

Поэтому исследование способа повышения эффективности проветривания сверхдлинных (до 400м) угольных лав без увеличения нагрузки на вентиляторы главного проветривания, является весьма актуальной задачей.

Методы

Каждый добычной участок уникален и, наравне с типовыми параметрами, имеет свои особенности [16-20]. Однако, для выявления общих закономерностей, необходимо ограничиться лишь параметрами, являющимися наиболее типичными (характерными) для угольных горнодобывающих предприятий. Оценим эффективность проветривания с применением струйных вентиляторов, установленных на очистном комбайне, на примере одной из шахт Кузбасса, где выемочный участок имеет большую протяженность [10, 12, 14].

В качестве исходных данных был принят следующий механизированный очистной комплекс: комбайн SL-900, механизированная крепь DBT 220/480 и 2400/5000, забойный скребковый конвейер SH PF 6/1142 [10, 12, 14].

Протяженность лавы принималась 400 м, что классифицирует ее, как сверхдлинную. Кроме того, в исследуемый участок входило сопряжение лавы с вентиляционным и откаточным штреками протяженностью по 200 метров каждый (рис. 1а). Согласно проектным данным шахты, при отработке сверхдлинных лав, скорость воздуха в них должна составить от 1,5 до 2,5 м/с.

Осевой струйный вентилятор принят диаметром 0,6 м, способный развивать скорость воздушного потока на выходе до 30 м/с. При этом расчетная средняя скорость воздуха по сечению лавы, согласно п. 124 ФНиП [21], не превышала допустимой – 4 м/с.

Для удобства сравнения местные сопротивления переведены из вида «безразмерный коэффициент местного сопротивления» к виду «коэффициент аэродинамического сопротивления» с размерностью $1 k\mu = 9,81 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$ [5] при следующих параметрах воздуха: температура 18°C и атмосферном давлении 101325 Па .

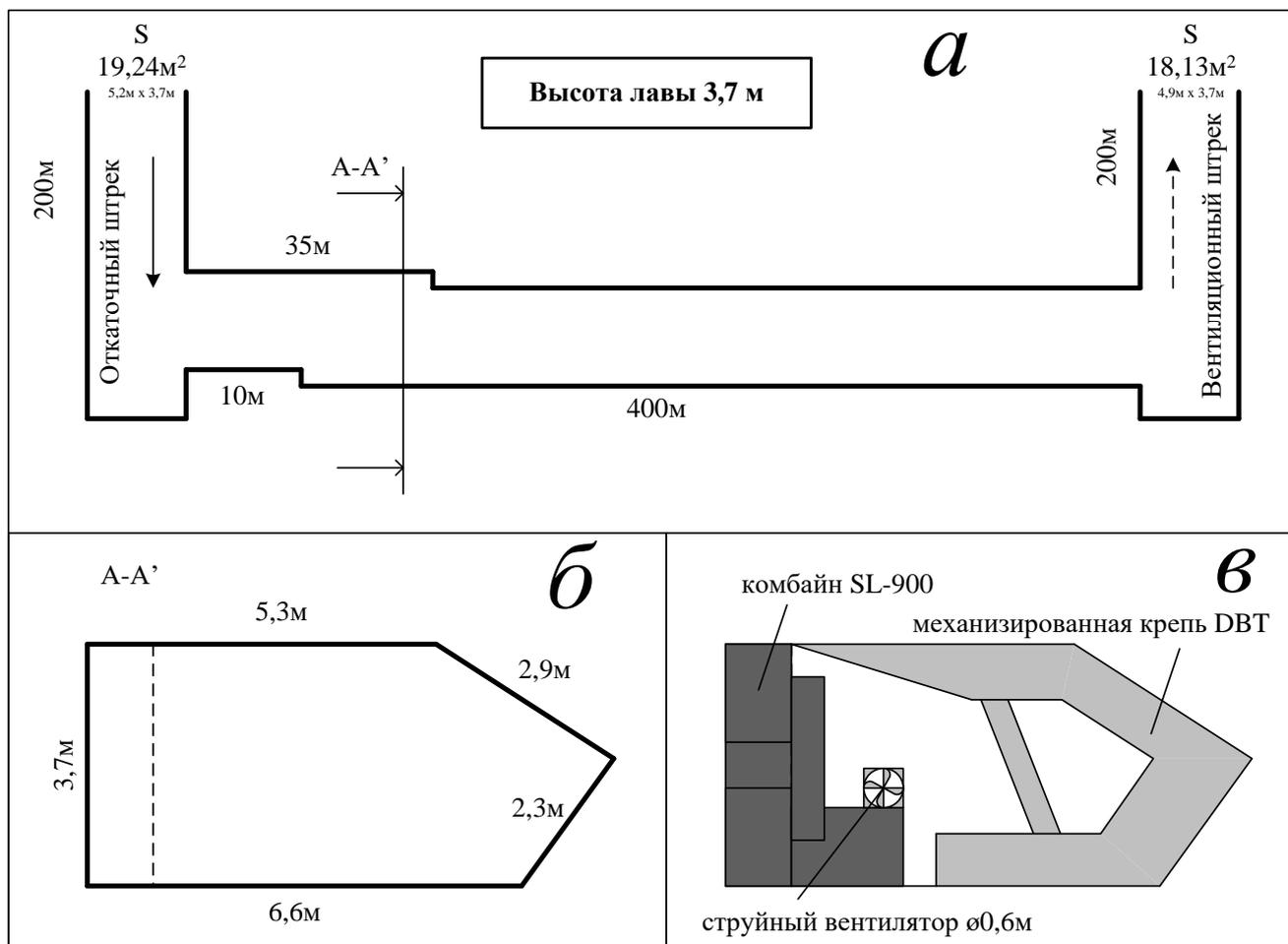


Рис. 1. Схема добычного участка (а), с указанием габаритов и размеров сечения лавы (б), и загромождение сечения лавы очистным механизированным комплексом (в)

В настоящее время существует ряд сертифицированных расчетных комплексов, которые основаны на численном решении уравнений перемещения жидкости или газа. Получить аэродинамические параметры элементов вентиляционной сети шахт возможно в программах вычислительной гидродинамики, в частности Ansys CFX [22-27]. Расчеты сводятся к численному решению трехмерных нестационарных нелинейных уравнений газодинамики Навье-Стокса.

Прежде всего следует отметить степень влияния каждого из элементов «загромождения» поперечного сечения лавы на аэродинамическое сопротивление исследуемого участка [28, 29]. Таким образом, аэродинамическое сопротивление

«пустого» рассматриваемого участка без крепи и комбайна составляет $R = 0,012038 \text{ к}\mu$. При установке механизированной крепи в лаве и штреках, аэродинамическое сопротивление возрастет до $0,034362 \text{ к}\mu$, что в 2,9 раза больше «пустых» выработок. Подобные результаты сопоставимы с аналитическим расчетом сопротивления лав, оборудованных механизированной крепью [5].

Аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка с учетом очистного комбайна будет изменяться, в зависимости от его расположения по длине лавы. В среднем оно составит $0,036197 \text{ к}\mu$, что на 5,3 % больше, чем у выработки, оснащенной механизированной крепью.

Чтобы оценить изменение аэродинамического сопротивления лавы с учетом перемещения по ней механизированного очистного комплекса, ограничимся рассмотрением 6 вариантов (позиций) расположения очистного комбайна (рис. 2).

Позиция 1 соответствует начальному положению очистного комбайна, осуществившего врезку в пласт. Позиция 2 соответствует расположению очистного комбайна на $1/2$ длины лавы. Позиция 3 - $3/4$ длины лавы. Позиция 4 - $7/8$ длины лавы. Позиция 5 - $15/16$ длины лавы. Позиция 6 соответствует крайнему положению очистного комбайна, завершившего проход по лаве, но не преграждающего сечение вентиляционного штрека.

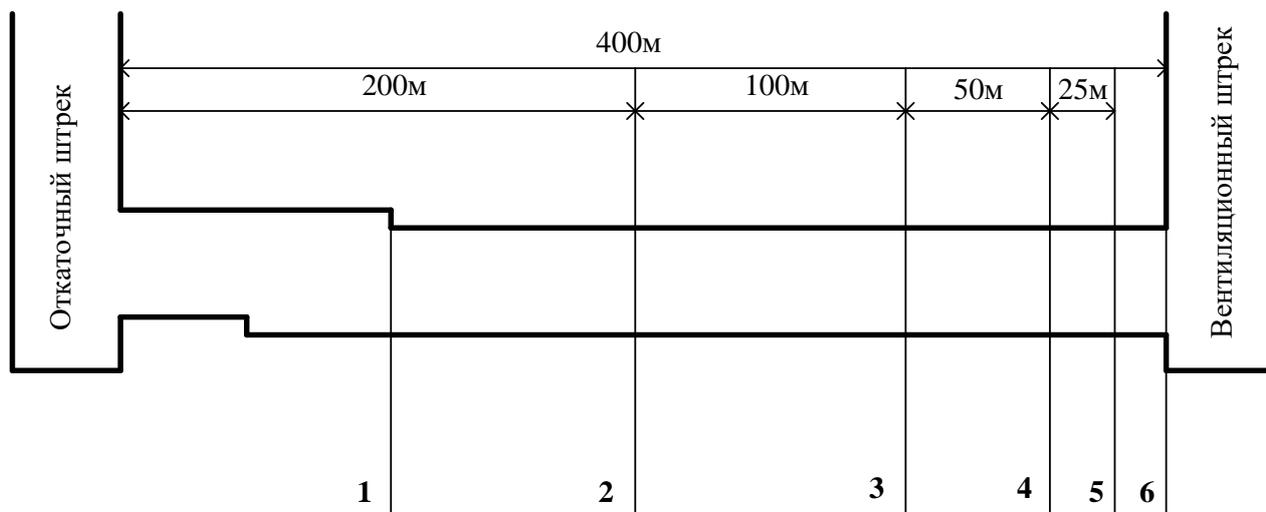


Рис. 2. Схема расположения позиций очистного механизированного комплекса по длине лавы

Проведенный расчет в вычислительном комплексе Ansys CFX с использованием метода конечных объемов показал, как изменяется аэродинамическое сопротивление исследуемого участка в зависимости от места расположения механизированного комплекса в лаве (табл. 1).

Таблица 1

Величина аэродинамического сопротивления рассматриваемого участка шахтной сети с учетом перемещающегося механизированного очистного комплекса по длине лавы, без струйного вентилятора

	Расположение комбайна, номер позиции					
	1	2	3	4	5	6
Аэродинамическое сопротивление, $k\mu$	0,037024	0,038017	0,035921	0,035697	0,035199	0,035323

Результаты

Отразив полученные результаты графически (рис. 3) можно увидеть, что наибольшая величина аэродинамического сопротивления соответствует позиции 2, когда комбайн находится в середине лавы. Наименьшая величина – когда комбайн находится в конце лавы (позиция 5). Взаимное влияние ряда последовательных местных сопротивлений при нахождении очистного комбайна в начале и в конце лавы способствует общему снижению аэродинамического сопротивления. Этот неочевидный факт требует дальнейшего подробного исследования для его объяснения.

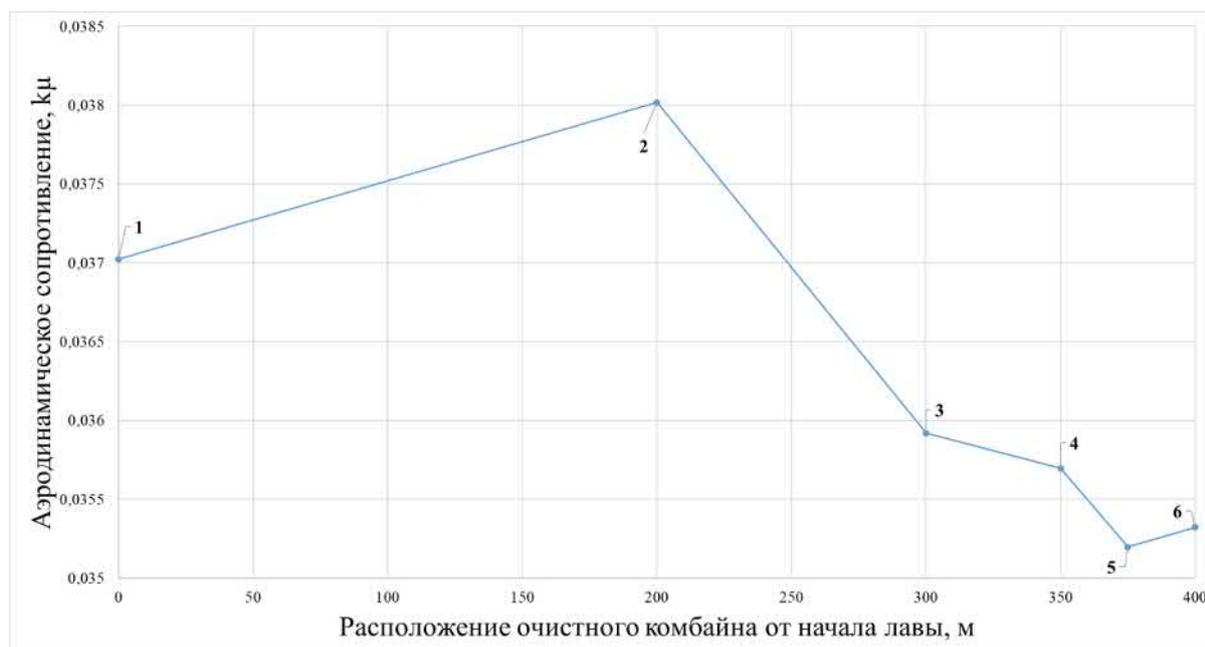


Рис. 3. График величины аэродинамического сопротивления рассматриваемого участка шахтной сети, в зависимости от расположения очистного механизированного комплекса по длине лавы, без учета струйного вентилятора

Получив исходные результаты расчета для проведения сравнения, оценим влияние струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, на

изменение аэродинамического сопротивления рассматриваемого участка. Примем допущение, что струйный вентилятор имеет постоянную скорость воздушного потока через свое выходное сечение, равную 30 м/с (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение аэродинамического сопротивление рассматриваемого участка шахтной вентиляционной сети, при включении струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне

Режим работы струйного вентилятора	Расположение комбайна, номер позиции					
	1	2	3	4	5	6
0 м/с (выключен)	0,037024	0,038017	0,035921	0,035697	0,035199	0,035323
30 м/с	0,028075	0,029705	0,026705	0,027993	0,031220	0,058872

За счет принудительного перемещения воздушных масс в обход очистного комбайна, происходит значительное снижение аэродинамического сопротивления исследуемого участка (рис. 4). Исключение составляет самый крайний вариант расположения комбайна (позиция 6), когда струя из вентилятора ударяется в стену вентиляционного штрека, создавая таким образом «воздушную пробку» на выходе из лавы.

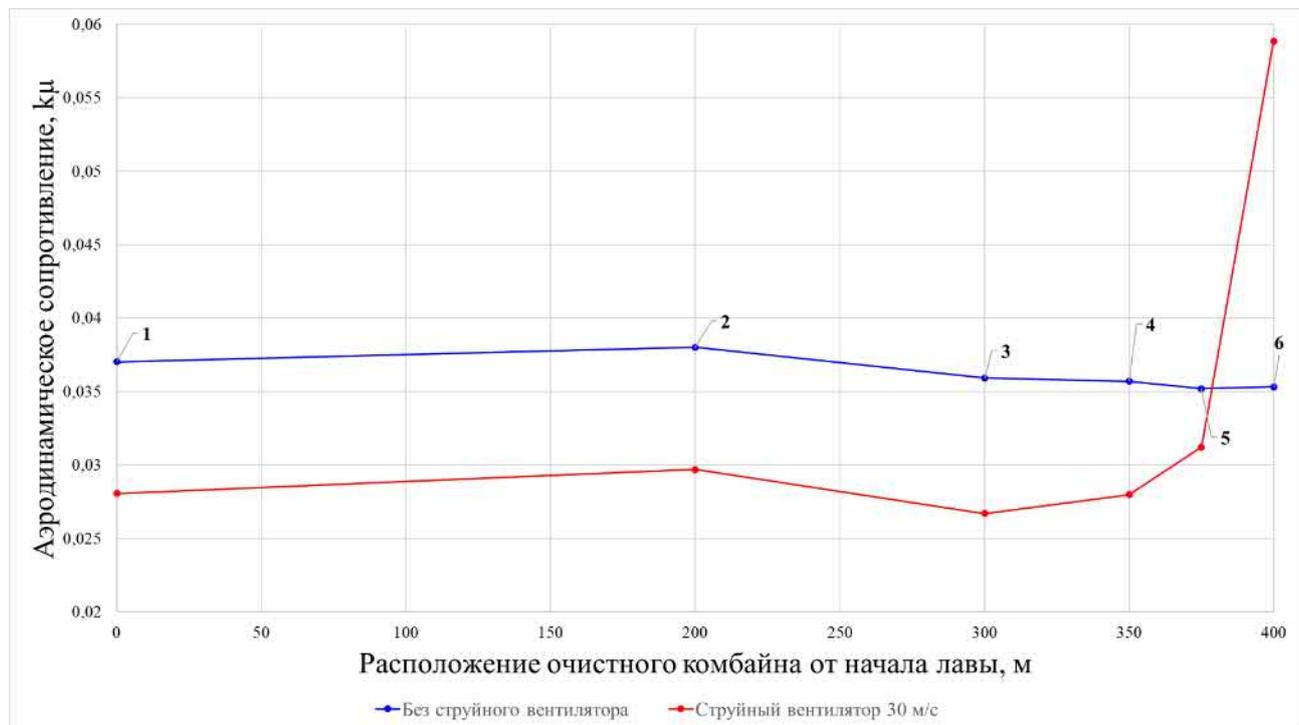


Рис. 4. Графики величины аэродинамического сопротивления рассматриваемого участка шахтной сети, в зависимости от расположения очистного механизированного комплекса по длине лавы и производительности струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне

Обсуждение

Рассмотрим величину отношения аэродинамического сопротивления исследуемого участка без применения струйного вентилятора R_0 с вариантом, учитывающими работу струйного вентилятора R_{30} (табл. 3).

Таблица 3

Отношения аэродинамического сопротивления рассматриваемого участка шахтной сети без применения струйного вентилятора, с расчетными значениями, учитывающими работу струйного вентилятора

Режим работы струйного вентилятора	Отношение сопротивлений	Расположение комбайна, номер позиции					
		1	2	3	4	5	6
30 м/с	R_0/R_{30}	0,76	0,78	0,74	0,78	0,89	1,67

Из табл. 3 видно, что при развиваемой струйным вентилятором скорости воздуха 30 м/с, величина отношения аэродинамических сопротивлений исследуемого участка в среднем составляет (без учета позиции 6) 0,79. Другими словами, если струйный вентилятор, установленный на очистном комбайне, развивает скорость потока воздуха 30 м/с, то это снижает аэродинамическое сопротивление лавы на 21 %.

Оценим, какое влияние окажет снижение аэродинамического сопротивления на расход воздуха, поступающего в забой. Как было отмечено выше, перепад статического давления на границах исследуемого участка остается постоянным, как при работе струйного вентилятора, так и при его отсутствии.

$$\begin{cases} \Delta P = R_0 \cdot Q_0^2 \\ \Delta P = R_{30} \cdot Q_{30}^2 \end{cases}$$

Если отношение $R_0/R_{30} = 0,79$, то подставив это выражение в систему уравнений, получим:

$$Q_{30} = \sqrt{\frac{Q_0^2}{0,79}} = 0,125 \cdot Q_0,$$

где ΔP – перепад статического давления на границах исследуемого участка; R_0 – аэродинамическое сопротивление исследуемого участка без использования струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне; Q_0 – средний расход воздуха на исследуемом участке без использования струйного вентилятора; R_{30} – аэродинамическое сопротивление исследуемого участка с применением струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, развивающим скорость воздушного потока через выходное сечение 30 м/с; Q_{30} – средний расход воздуха на исследуемом участке с применением струйного вентилятора.

Заключение

Снижение аэродинамического сопротивления исследуемого участка на 21 % увеличит расход воздуха по нему на 12,5 % относительно варианта, когда на очистном комбайне не установлен струйный вентилятор. При условии, что струйный вентилятор не будет создавать «воздушную пробку» при расположении в позиции 6, т.е. будет заблаговременно выключен (на расстоянии 25 м от края забоя, ближнего к вентиляционному штраку).

Благодарности

Данная статья написана по результатам исследований, приведённых в рамках научной темы FWNZ-2021-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей / А.А. Харев. — М.: Углетехиздат, 1954. — 248 с.
2. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.: ил.
3. Внутренние санитарно-технические устройства. Справочник проектировщика. Ч.3. Вентиляция и кондиционирование воздуха кн. 2. / Под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. — М.: Стройиздат, 1992. — 416 с.
4. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Посохин. — М.: АВОК-ПРЕСС, 2008. — 209 с.
5. Рудничная вентиляция: Справочник / Н.Ф. Гращенков, А.Э. Петросян, М.А. Фролов и др.; Под ред. К.З. Ушакова. — 2-е изд., перераб. И доп. — М.: Недра, 1988. — 440 с.
6. Проветривание угольных шахт / Н.Ф. Кременчуцкий. — М.: ГОСГОРТЕХИЗДАТ, 1961. — 240 с.
7. Воздух в шахте : Трактат о проветривании угольных шахт / Ф. С. Клебанов; [Рос. акад. естеств. наук, Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, Рос. угольная компания]. — М.: Изд. дом "Имидж", 1995. — 574 с.
8. Рудничная вентиляция / А.А. Скочинский, В.Б. Комаров. — М.: Углетехиздат, 1959. — 632с.
9. Рудничная и промышленная аэрология / А.Ф. Милетич, И.М. Яровой, В.Н. Бойков. — М.: Недра, 1972. — 254 с.
10. Ордин А.А. О рекордной длине и производительности очистного забоя шахты имени В.Д. Ялевского / А.А. Мешков, М.А. Волков, А.А. Ордин [и др.] // Уголь. — 2018. — № 7(1108). — С. 4-8.
11. Ордин А.А. Обоснование оптимальной длины и производительности очистного забоя при отработке мощного угольного пласта шахты "Талдинская-Западная-1" / А. А. Ордин, А. М. Тимошенко, Д. В. Ботвенко, А. М. Никольский // Уголь. — 2019. — № 3(1116). — С. 50-54.
12. Ордин А.А. О необходимости изменения методического подхода к расчету дебита метана в высокопроизводительных очистных забоях Кузбасса / А. А. Ордин, А. М. Тимошенко, Д. В. Ботвенко // Горные науки и технологии. — 2020. — Т. 5. — № 2. — С. 82-91.
13. Ордин А.А. О нелинейной зависимости концентрации метана от длины лавы и допускаемой производительности очистного забоя по газовому фактору / А. А. Ордин, А. М. Тимошенко, С. А. Коленчук // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — № 7. — С. 287-299.
14. Калинин С.И. Обоснование суточной добычи угля из лавы длиной 400 метров в условиях шахты им. В.Д. Ялевского / С.И. Калинин, Г.Н. Роут, Ю.М. Игнатов, А.М. Черданцев

// Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 5(129). – С. 27-35.

15. Патент № 2701900 С2 Российская Федерация, МПК E21F 1/00. Способ вентиляции угольной лавы : № 2018100873 : заявл. 10.01.2018 : опубл. 03.10.2019 / А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук.

16. Забурдяев, В. С. Метановыделение в очистных забоях при высоких нагрузках на лаву / В. С. Забурдяев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № S5. – С. 210-226.

17. Ефимов, В. И. Отработка мощных угольных пластов по технологии "шахта - лава" / В. И. Ефимов, Г. Г. Рябов, А. А. Маликов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2014. – № 2. – С. 94-99.

18. Каркашадзе, Г. Г. Определение концентрации метана в выработанном пространстве по результатам съемки параметров вентиляционного потока вдоль лавы / Г. Г. Каркашадзе, Ю. М. Иванов, Г. П. Ермак // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 12. – С. 256-262.

19. Каркашадзе, Г. Г. Методика расчета притоков метана из отбитого угля в лаве в процессе очистных работ / Г. Г. Каркашадзе, Е. В. Мазаник, Ю. А. Семькин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 6. – С. 18-22.

20. Петров, А. К. О влиянии талых вод на концентрацию метана в шахтах Кузбасса / А. К. Петров, А. А. Ордин, А. М. Никольский // Уголь. – 2017. – № 5(1094). – С. 76-78.

21. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности в угольных шахтах" от 01 января 2021 года (Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 года № 507)

22. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. -210 с

23. Электронное пособие ANSYS. Customer Training Material. Introduction to ANSYS Meshing.

24. Лекции по теоретическим методам исследования турбулентности: учебное пособие / Ю. И. Хлопков, В. А. Жаров, С. Л. Горелов. – М.: МФТИ, 2005. – 179 с.

25. Турбулентность: модели и подходы: курс лекций: 4.1 / П. Г. Фрик. – Пермь: ПГТУ, 1998. – 108 с.

26. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Published in the U.S.A/ 2014-2015 SAS IP , Inc.

27. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений / А.В. Габарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур: учеб. пособие. – СПб.: Издательство Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.

28. Павлов С. А. Об изменении аэродинамического сопротивления вентиляционной сети шахты при реверсировании воздушного потока // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – №2. Т.6. 207-211.

29. Павлов С.А. Оценка изменения величины местных аэродинамических сопротивлений элементов вентиляционной сети рудника при реверсивном режиме работы системы вентиляции // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Том 2, № 4. – С. 212-219.

© С. А. Павлов, 2021

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ТРЕЩИН МНОЖЕСТВЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА ВЯЗКИМ ФЛЮИДОМ

Антон Владимирович Панов

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

Игорь Владимирович Колыхалов

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории механики взрыва и разрушения горных пород, тел. (383) 335-96-54, e-mail: ikolykhalov@mail.ru

Проведено экспериментальное и численное моделирование криволинейного развития трещин гидроразрыва, нагружаемых вязкой жидкостью. Приведены траектории одновременного роста 2-5 трещин с границы кругового отверстия в плоской постановке теории упругости. Проанализировано влияние вязкости нагнетаемой жидкости на траекторию роста трещин. Выявлены причины появления магистральных и остановки других трещин. Путем варьирования параметров длины начальных трещин и угла ориентации их во внешнем неоднородном поле сжатия произведены попытки поиска конфигурации условий при которых возможен одновременный рост нескольких магистральных трещин. Экспериментальное моделирование гидроразрыва было проведено на блоках из оргстекла. Количество начальных трещин от 3 до 5. Показано влияние вязкой жидкости на количество магистральных трещин. С использованием пластичного материала удалось в пределах блоков получить одновременное развитие 3 и 4 трещин. Проведено сравнение проведенных экспериментов с численными расчетами.

Ключевые слова: система трещин гидроразрыва, продольная трещина гидроразрыва, вязкость жидкости, траектория трещин, численное моделирование гидроразрыва, экспериментальное моделирование гидроразрыва

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL MODELING OF PROPAGATION OF LONGITUDINAL FRACTURES IN MULTI-STAGE HYDRAULIC FRACTURING WITH VISCOUS FLUID

Anton V. Panov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher at the Mining Information Science Laboratory, office: +7 (383) 205 30 30 ext. 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

Igor V. Kolykhalov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher at the Laboratory of Explosion Mechanics and Rock Fracture, office: (383) 335 96 54, e-mail: ikolykhalov@mail.ru

The experimental and numerical modeling of curvilinear propagation of hydraulic fractures driven by viscous fluid is implemented. The trajectories of simultaneous growth of 2–5 fractures from the boundary of a circular opening are presented in plane elasticity. The influence of the fluid

viscosity on the fracture trajectory is analyzed. The causes of initiation of main fracture and shut-down of other fractures are revealed. The attempts are made to find such conditions that simultaneous growth of a few main fractures is possible by varying lengths and orientation angles of initiation fractures in the external nonuniform field of compression. The experimental modeling of hydraulic fractures was carried out using blocks made of concrete and organic glass. There were 3 to 5 initiation fractures. The influence of the breakdown fluid viscosity on the number of the main fractures is illustrated. Hydraulic fracturing with a plastic material allowed simultaneous growth of 3 and 4 fractures within a block. The experimental modeling data and the calculation results are compared.

Keywords: system of hydraulic fractures, longitudinal hydraulic fracture, breakdown fluid viscosity, fracture trajectory, numerical modeling of hydraulic fracturing, experimental modeling of hydraulic fracturing

Введение

Гидроразрыв пласта — один из высокоэффективных методов интенсификации добычи углеводородов из газовых и нефтяных скважин. Применение гидроразрыва позволяет увеличивать дебит скважин [1, 2], проводить дегазацию угольных и сланцевых пластов [3-6], совершенствовать технологии правления состоянием массива горных пород [7, 8], производить оценки компонент природного поля напряжений [9]. При интенсификации добычи из низкопроницаемых коллекторов широкое применение получила технология множественного гидроразрыва пласта [10-12]. Для достижения наилучшего результата ГРП требуется создание трещины нужной формы и размера. На геометрию развивающейся трещины существенное влияние оказывают: разность главных напряжений, вызванных горным давлением; наличие трещин, режим нагнетания и свойства жидкости.

Развитие продольных трещин рассматривается в плоской постановке теории упругости. Плоская задача гидроразрыва с использованием вязкой жидкости, как задача механики трещин, впервые поставлена в [13]. Асимптотический метод ее решения был развит для длительной закачки и больших утечек жидкости в [14,15]. Математические трудности связаны с необходимостью одновременного нахождения деформации проницаемой твердой среды и параметров течения жидкости, нагнетаемой в трещину, причем геометрия самой трещины формируется в процессе разрыва и заранее неизвестна. Наличие малого параметра (смещение берегов) позволяет перенести условие сопряжения на срединную плоскость трещины, но и после этого упрощения система уравнений остается сложной. Даже для изолированной прямолинейной трещины, растущей при нагнетании вязкой жидкости с учетом утечек и сжимающего напряжения (минимального), действующего в направлении, ортогональном развитию трещины, решение задачи сводится к нахождению решения системы из четырех нелинейных интегро-дифференциальных уравнений [16,17].

Отличие нашего подхода моделирования роста трещин гидроразрыва от других [18-23] заключается в его достаточно простой реализации и быстром расчете. В [24] мы получили простой алгоритм нахождения приближенных решений задач гидроразрыва, на основе которого можно делать оценочные расчеты.

Использовали предположение: нормальные смещения берегов трещин пропорциональны эффективным нормальным напряжениям, приложенным к ее берегам, и расход жидкости по длине трещины сохраняется [25]. А скорость трещины в любой момент времени находилась из интегрального закона сохранения массы жидкости.

Цель работы состоит в том, что, используя алгоритм построения трещин гидроразрыва, полученный в [24], произвести численное моделирование криволинейного развития трещин гидроразрыва; сравнить проведенные эксперименты с численными расчетами.

Постановка задачи

Граница скважины, ось которой совпадает с осью Oz , изображена на рис. 1 в плоскости $z = 0$ как окружность с радиусом r . В начальный момент времени на границе кругового отверстия имеется N зародышевых трещин длиной $l_0(j)$, и их положение на контуре определяется углами $\alpha_i = \alpha_0 + 2\pi \cdot (i-1)/N$, $i = \overline{1, N}$. На бесконечности действуют сжимающие напряжения σ_{\max} и σ_{\min} . Направление максимального сжатия σ_{\max} параллельно оси Oy . Горная порода моделируется изотропным упругим телом, находящимся в условиях плоской деформации.

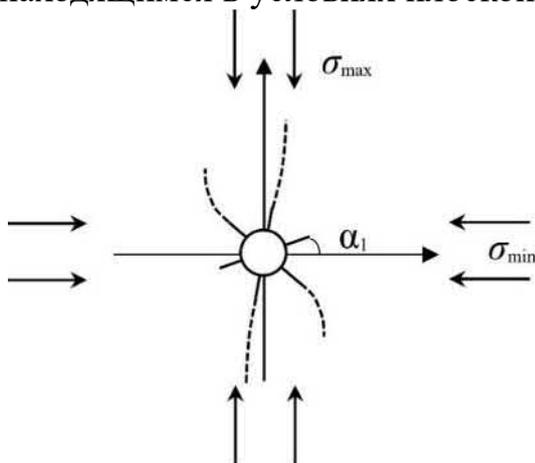


Рис. 1. Схема рассматриваемой задачи с продольными трещинами гидроразрыва.

В [24] подробно изложены выкладки для нахождения решения роста криволинейной трещины, развивающейся под действием нагнетания в скважину вязкой жидкости. Отметим, что используются уравнения сохранения объема закачиваемой жидкости, уравнение скорости роста трещины, избыточное давление в трещине вдоль ее длины. А направление приращения длины трещины определяется из условия что бы в этом направлении $\sigma_{\theta\theta}$ достигала максимума, а $\sigma_{r\theta} = 0$. При использовании вязкой жидкости приводит к тому, что на границе отверстия (1) и берегах трещины (2)-(3) выполняются следующие граничные условия:

$$\sigma_n = -p(t), \tau_s = 0, \quad (1)$$

$$\sigma_n = -p_1(x, t), \quad p(t) = p_1(0, t), \quad (2)$$

$$\tau_s = 0, \quad (3)$$

где σ_n и τ_s — нормальные и касательные напряжения.

На рис. 2-5 приведены траектории расчетов роста 2-5 продольных трещин при различной вязкости нагнетаемой жидкости μ_0 в условиях плоской деформации. Утечки во вмещающую породу отсутствуют, расход в скважину постоянный q_0 . Расчеты проводились при следующих параметрах (если не указано другое значение): $r = 70$ мм, $l_0 = 2r$, $\alpha_0 = 15^\circ$; параметры среды: модуль Юнга $E = 2,8 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, вязкость разрушения $K_{IC} = 2$ МПа \cdot м 0,5 ; сжимающие напряжения равны: $\sigma_{\max} = 39,5$ МПа, $\sigma_{\min} = 38,5$ МПа; коэффициент утечек $C = 0$ м/с 0,5 , расход $q_0 = 0,05$ м 3 /с, высота трещины $h = 20$ м, вязкость закачиваемой жидкости $\mu_0 = 0.005 \div 100$ Па \cdot с. Так как эффективное давление внутри трещины зависит от произведения $\mu_0 \cdot q_0$, для простоты восприятия в расчетах варьировать будем только вязкость μ_0 .

На рис. 2 приведены траектории роста двух трещин при различной вязкости закачиваемой жидкости. Видно, что с увеличением вязкости траектории трещин спрямляются. И наоборот, чем жидкость менее вязкая, тем быстрее трещина поворачивается, ориентируясь по направлению действия максимального сжимающего напряжения (вдоль оси y).

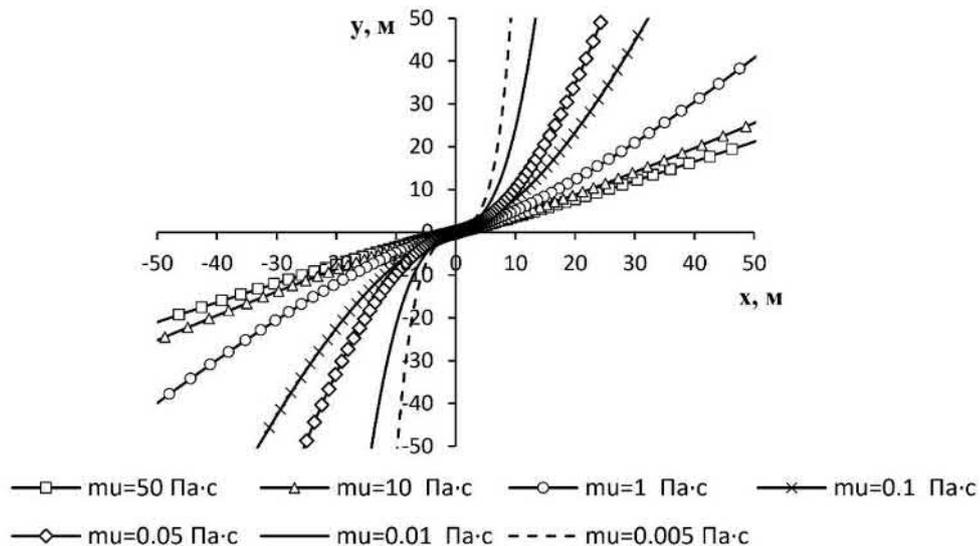


Рис. 2. Траектории роста двух трещин при вариации вязкости жидкости μ_0 (Па \cdot с)

На рис. 3 приведены расчеты траекторий роста трёх трещин гидроразрыва. Можно отметить, что при вязкости $\mu_0 \leq 0,1$ Па·с развиваются только две трещины из трех (рис. 3а). Изначально одна из трещин имеет невыгодную ориентацию (практически перпендикулярно максимальному сжатию), она растет медленнее других и останавливается. Остановка происходит из-за двух факторов: передавливание трещины на устье скважины; увеличивающееся дополнительное поле сжатия от двух растущих трещин. Две растущие трещины меняют свою траекторию после остановки третьей трещины. Чем больше вязкость жидкости, тем дальше прорастает останавливающаяся трещина. Так при $\mu_0 = 0,01$ Па·с третья трещина удлинилась на 8 м, после чего рост остановился; при $\mu_0 = 0,05$ Па·с – 17 м; при $\mu_0 = 0,1$ Па·с – 24 м. При $\mu_0 \geq 1$ Па·с растут одновременно все три трещины в разные стороны друг от друга (рис. 3б).

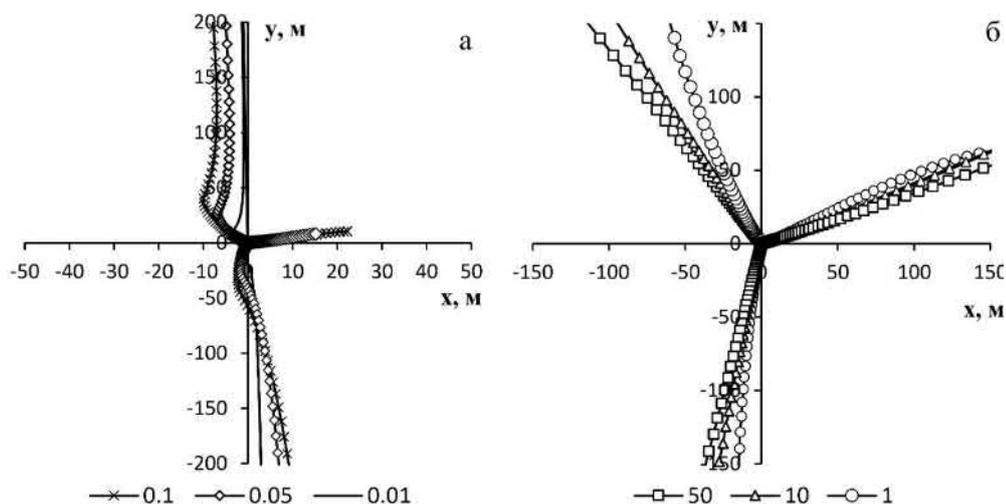


Рис. 3. Траектории трех трещин при различной вязкости жидкости μ_0 (Па·с)

Рассмотрим рост четырех трещин (рис. 4). При сохранении тех же параметров, что и при предыдущих расчетах (на рис. 2-3) растут только две трещины, даже при $\mu_0 \geq 50$ Па·с (рис. 4а). Увеличим длину зародышевой трещины l_0 от 0.14 м до 2.8 м. Как видим, увеличение длины привело к некоторому росту двух других трещин. Так при $l_0 = 1,4$ м вторая и четвертая замолкающие трещины выросли до 1,5 м, а при $l_0 = 2,8$ м до 15,6 м (рис. 4б). Чем больше начальная длина трещины, тем «легче» трещине расти при прочих равных условиях.

Попробуем изменить угол наклона трещин относительно главного сжимающего напряжения так, чтобы начали расти одновременно все четыре трещины. Очевидно, что это угол 45° . Как видно из рис. 5 такая ориентация не дала нужного результата. Как только появляется хотя бы малейшее отклонение от симметрии, сразу же появляются две лидирующие трещины, другие две замедляют

свое развитие и останавливаются под воздействием поля сжатия двух лидирующих трещин.

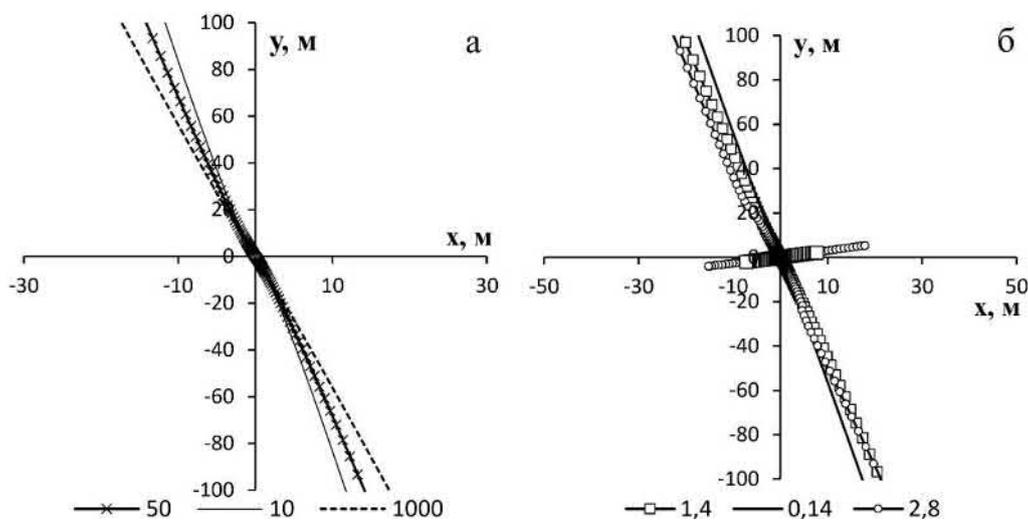


Рис. 4. Траектории роста четырех трещин:
а) при различных μ_0 (Па·с), б) при различных l_0 (м)

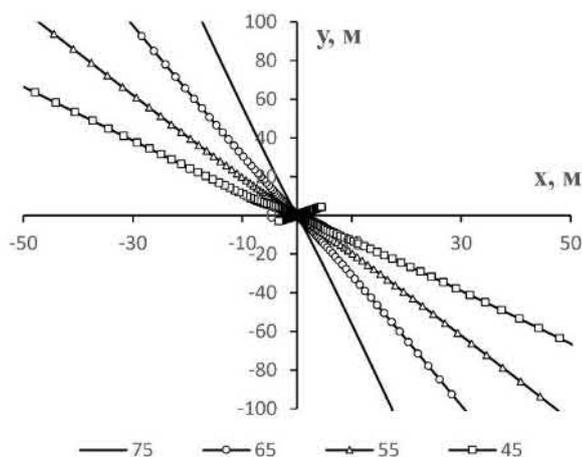


Рис. 5. Траектории развития четырех трещин при вариации угла наклона α_0
($\mu_0 = 100$ Па·с, $l_0 = 0,14$ м)

На рис. 5а приведены траектории роста пяти трещин ($\alpha_0 = 15^\circ$). Как видно из рисунка первая и третья трещины не росли. В «выгодном» положении для роста оказались вторая и пятая трещины. Четвертая трещина развивалась уже в зависимости от вязкости закачиваемой жидкости. Так при $\mu_0 = 0,1$ Па·с четвертая трещина выросла до 5,3 м; при $\mu_0 = 1$ Па·с - $L_4 = 11,5$ м; при $\mu_0 = 10$ Па·с - $L_4 = 22,5$ м; при $\mu_0 = 100$ Па·с - $L_4 = 49,5$ м.

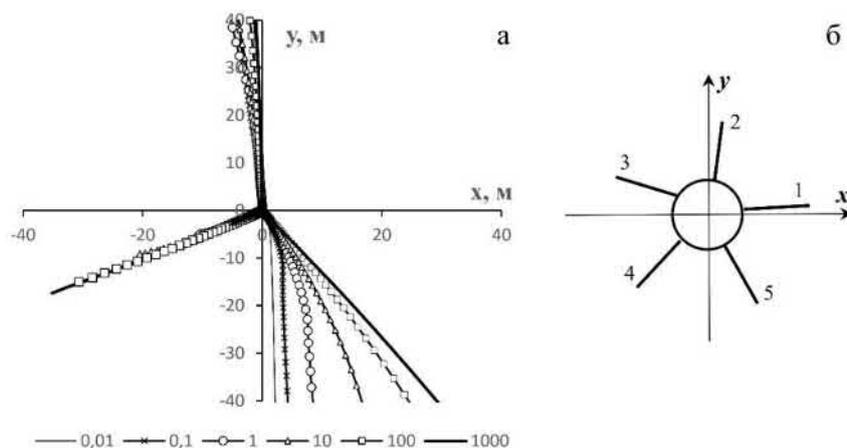


Рис. 6. Траектории пяти трещин:
а) при различных μ_0 (Па·с), б) схема расположения начальных трещин

Отметим, что вязкость жидкости является одним из определяющих траекторию параметров. Чем выше вязкость, тем медленнее трещины разворачиваются по направлению действия максимального сжимающего напряжения. Высокая вязкость способствует развитию трещин в неоднородных полях напряжений. Если требуется развитие системы из нескольких продольных трещин, то необходимо подавать более вязкую жидкость.

Экспериментальное моделирование

Эксперименты по изучению процесса развития трещины гидроразрыва проводились на специально созданном стенде одноосного нагружения. Стенд состоит из трех металлических плит с восемью равномерно распределенными смотровыми щелями, две из которых параллельно жестко закреплены между собой металлическими шпильками, а третья может свободно двигаться между ними (рис. 7).

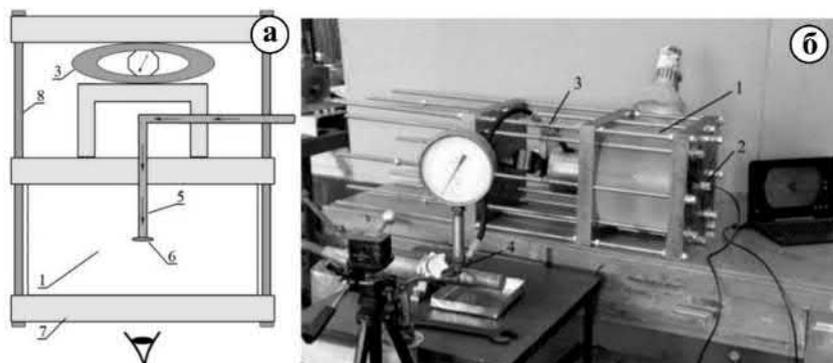


Рис. 7. Схема лабораторного стенда (а), внешний вид стенда (б)
1 - образец из оргстекла, 2 – смотровые щели, видеокамера для съемки проекции формы трещины на плоскость зародышевой трещины, 3 – динамометр, 4 - нагнетающее устройство, 5 – скважина, 6 – зародышевая трещина, 7 – металлические плиты, 8 - шпилька

Одноосное нагружение производилось с помощью винтового механизма через динамометр ДОСМ-3-50. В качестве рабочей среды использовались блоки из полиметилметакрилата (оргстекло марки ТОСН, ГОСТ 17622-72) цилиндрической формы размером 260x260x110 мм. В центре блока создавалось отверстие, имитирующее скважину. Отверстие присоединялось с помощью резьбового соединения с гидравлической системой для подачи жидкости гидроразрыва. В качестве рабочего флюида использовались водные растворы глицерина CAS No 56-81-5 и колеровочной пасты, изготовленной по ТУ 2332-014-76174671-2005, а также пластилин ОСТ 6-15-1525-86. Жидкость с известной вязкостью подавалась с заданным расходом. Вязкость измерялась с помощью вискозиметров ВПЖ-4. В ходе эксперимента фиксировались величина давления закачиваемой жидкости и форма трещины.

Отверстие, имитирующее скважину, имело диаметр 12 мм. Зародышевые трещины представляли собой продольные пропилы стенки скважины длиной 15 мм, глубиной 5 мм и шириной 1 мм. Количество зародышевых трещин варьировалось от 2 до 5.

На рис. 8 приведены результаты гидроразрыва для различного количества зародышевых трещин: а, б, в – 3 зародышевые трещины; г – 4; д – 5 трещин. При использовании низковязких жидкостей образуется одна продольная трещина с одним крылом независимо от количества зародышевых трещин (рис. 8а), при увеличении вязкости или расхода жидкости образуется две трещины (два крыла). Три зародышевые трещины нам не удалось развить с помощью вязкой жидкости, ввиду предельных характеристик используемых оборудования и жидкости ($q_0 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{с}$, $\mu_0 \sim 1400 \text{ мПа} \cdot \text{с}$). С использованием же пластичного материала (пластилина) все три трещины растут устойчиво. Также с использованием пластилина возможно одновременное развитие четырех продольных трещин (рис. 8г). В случае с пятью трещинами и более, устойчивое развитие наблюдается у трех, остальные затухают на длине примерно 1-2 диаметра скважины.

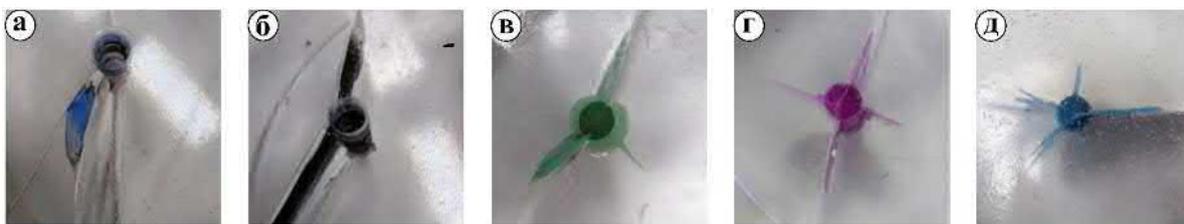


Рис. 8. Продольные трещины в образцах из оргстекла после проведения:

а - $\mu_0 = 20 \text{ мПа} \cdot \text{с}$, $q_0 = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{с}$; б - $\mu_0 = 900 \text{ мПа} \cdot \text{с}$,
 $q_0 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{с}$, в, г, д – пластический материал $q_0 = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{с}$

Для условий экспериментов развития продольных трещин также были проведены численные расчеты. Параметры задачи, используемые в расчетах:

$N = 3 \div 5$, $r = 6$ мм, $E = 3,3 \cdot 10^3$ МПа, $\nu = 0.3$, $K_{1C} = 1,4$ МПа \cdot м^{0,5}, $\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = 0$, $C = 0$, $q_0 = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м³/с, $h = 15$ мм, вязкость закачиваемой жидкости $\mu_0 = 15 \div 1200$ мПа \cdot с. Для реалистичности условий, внесем в расчеты неустойчивость в виде разных длин зародышевых трещин: $l_0(i) = (4 + i)$ мм, $i = 1 \div N$. Рассмотрим сначала три зародышевые трещины. Перебрав большое количество вариаций, мы обнаружили, что при $\mu_0 < 50$ мПа \cdot с может развиваться одна трещина из трех. При этом наблюдался прерывистый рост двух других трещин, по мере развития длинной. Они круто разворачиваются в противоположную сторону от длинной трещины и останавливаются, пройдя незначительное расстояние (рис. 9). При повышении вязкости $\mu_0 > 50$ мПа \cdot с наблюдался рост двух трещин. Третья трещина не развивалась, даже при повышении вязкости до 10^5 мПа \cdot с.

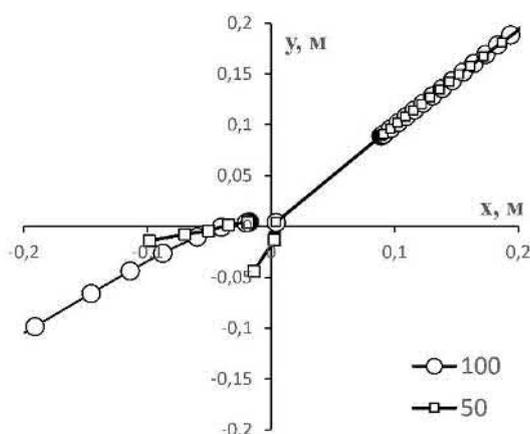


Рис. 9. Рост трех трещин при $\mu_0 = 50, 100$ мПа \cdot с

При $N=5$ наблюдались те же самые закономерности, что и при $N=3$. Из пяти трещин наблюдался устойчивый рост только двух. Попытки найти конфигурацию из зародышевых трещин при которой развивались бы все 5 трещин не увенчались успехом. С повышением вязкости начинают страгиваться и другие трещины, их рост носит неустойчивый характер, итоге растут только две трещины из пяти.

Заключение

Проведена серия расчетов одновременного развития продольных трещин множественного гидроразрыва вязкой жидкостью с использованием разработанного численного алгоритма в плоской постановке теории упругости. Выявлены зависимости искривления траекторий трещин и количества активных трещин от конфигурации зародышевых трещин, скорости нагнетания и вязкости рабочей жидкости.

Проведена серия экспериментов по одновременному созданию нескольких продольных изначально радиальных трещин множественного флюидоразрыва

вязкой жидкостью и пластическим материалом. Выявлено, что с использованием высоковязкой жидкости возможно создание системы из трех трещин. С уменьшением вязкости или расхода нагнетания количество трещин уменьшается. Пластическим материалом возможно создать систему из 4 или 5 трещин. Но в случае с пятью трещинами в процессе роста две трещины затухают и остаются три «магистральные» трещины. Данное наблюдение также подтверждается в численных расчетах.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и образования Российской Федерации проект № АААА-А17-117121140065-7.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Galimov I. F., Gubaydullin F. A., Vakhin A. V. Intensification of oil production by hydraulic fracturing method from terrigenous reservoirs in depleting oil field //Petroleum Science and Technology. – 2018. – Т. 36. – №. 8. – С. 591-596.
2. Gurianov A. et al. Estimation of the Largest Russian Oil Field Development Efficiency Using the Combination of Hydrodynamic Modeling and Horizontal Well Production Logging Methods Using Markers //SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Society of Petroleum Engineers, 2019.
3. Liu Y., Xia B., Liu X. A novel method of orienting hydraulic fractures in coal mines and its mechanism of intensified conduction //Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2015. – Т. 27. – С. 190-199.
4. Guanhua N. et al. Improving the permeability of coal seam with pulsating hydraulic fracturing technique: a case study in Changping coal mine, China //Process Safety and Environmental Protection. – 2018. – Т. 117. – С. 565-572.
5. Guo T. et al. Numerical simulation of hydraulic fracture propagation in shale gas reservoir //Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2015. – Т. 26. – С. 847-856.
6. He Q., Suorineni F. T., Oh J. Review of hydraulic fracturing for preconditioning in cave mining //Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2016. – Т. 49. – №. 12. – С. 4893-4910.
7. Kang H. et al. Understanding mechanisms of destressing mining-induced stresses using hydraulic fracturing //International Journal of Coal Geology. – 2018. – Т. 196. – С. 19-28.
8. Puller J. W. et al. In-situ stress measurements and stress change monitoring to monitor overburden caving behaviour and hydraulic fracture pre-conditioning //International Journal of Mining Science and Technology. – 2016. – Т. 26. – №. 1. – С. 103-110.
9. Luo W. et al. Productivity of multiple fractures in a closed rectangular reservoir //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Т. 157. – С. 232-247.
10. Wenrui H. U., Yi W. E. I., Jingwei B. A. O. Development of the theory and technology for low permeability reservoirs in China //Petroleum Exploration and Development. – 2018. – Т. 45. – №. 4. – С. 685-697.

11. Желтов Ю. П., Христианович С. А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта //Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. – 1955. – №. 5. – С. 3-41.
12. Geertsma J. et al. A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures //Journal of petroleum technology. – 1969. – Т. 21. – №. 12. – С. 1571-1581.
13. Nordgren R. P. et al. Propagation of a vertical hydraulic fracture //Society of Petroleum Engineers Journal. – 1972. – Т. 12. – №. 04. – С. 306-314.
14. Алексеенко О. П., Вайсман А. М. Некоторые особенности плоской задачи гидроразрыва упругой среды // ФТПРПИ. — 1999. — № 3. – С. 269-275.
15. Алексеенко О. П., Вайсман А. М. Точное решение одной классической задачи гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2001. — № 5. – С. 493-503.
16. Zeng Q., Liu W., Yao J. Numerical modeling of multiple fractures propagation in anisotropic formation //Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – Т. 53. – С. 337-346.
17. Chen X. et al. Numerical investigation for simultaneous growth of hydraulic fractures in multiple horizontal wells //Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – Т. 51. – С. 44-52.
18. Taleghani A. D., Gonzalez M., Shojaei A. Overview of numerical models for interactions between hydraulic fractures and natural fractures: challenges and limitations //Computers and Geotechnics. – 2016. – Т. 71. – С. 361-368.
19. Zhou L. et al. A new three-dimensional numerical model based on the equivalent continuum method to simulate hydraulic fracture propagation in an underground coal mine //Rock mechanics and rock engineering. – 2019. – Т. 52. – №. 8. – С. 2871-2887.
20. Detournay E. Mechanics of hydraulic fractures //Annual Review of Fluid Mechanics. – 2016. – Т. 48. – С. 311-339.
21. Мартынюк П. А., Панов А. В. О развитии нескольких трещин гидроразрыва в двуосном поле сжатия с учетом утечек и вязкости флюида //Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – №. 1. – С. 22-33.
22. Линьков А. М. Численное моделирование течения жидкости и продвижения трещины гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2008. — № 1. – С. 26-46.

© А. В. Панов, И. В. Колыхалов, 2021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОД И КОМПОНЕНТ ПРИРОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ ПОДЗЕМНОЙ ГЕОДЕЗИИ

Антон Владимирович Панов

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

Леонид Анатольевич Назаров

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

Разработана и методом конечных элементов реализована трехмерная геомеханическая модель типичной конфигурации подземного пространства при реализации камерно-столбовой системы отработки пластовых месторождений. Сформулирована и исследована на разрешимость обратная задача определения величины и ориентации горизонтальных компонент внешнего поля напряжений и деформационных характеристик конструктивных элементов технологии выемки по данным измерения конвергенции стенок очистных камер по мере развития горных работ. Проанализированы линии уровня различных целевых функций и показана разрешимость сформулированной смешанной обратной задачи, установлена зависимость размеров области эквивалентности от относительной погрешности во входных данных.

Ключевые слова: трехмерная геомеханическая модель, камерно-столбовая технология, обратная задача, целевая функция, конвергенция стенок выработки, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов

Key words: 3D geomechanical model, room-and-pillar mining system, inverse problem, objective function, wall opening convergence, stress-strain state, finite element method

DETERMINATION OF DEFORMATION PROPERTIES AND NATURAL STRESSES IN ROCK MASS BY UNDERGROUND GEODESY DATA

Anton V. Panov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher at the Mining Information Science Laboratory, office: +7 (383) 205 30 30 ext. 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

Leonid A. Nazarov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Mining Information Science Laboratory, office: +7 (383) 205 30 30 ext. 337, e-mail: naz@misd.ru

The authors have developed and implemented a 3D geomechanical model using the finite element method for a typical configuration of an underground space during room-and-pillar mining. The authors formulate and solve an inverse problem on determination of values and orientation of external horizontal stresses and deformation characteristics of structural elements of the geotechnology by the measurement data of sidewall convergence in rooms in the course of mining. The level curves of

different objective functions are analyzed, the mixed inverse problem resolvability is demonstrated, and the equivalence domain size is correlated with the relative error of input data.

Keywords: 3D geomechanical model, room-and-pillar mining system, inverse problem, objective function, sidewall convergence, stress–strain behavior, finite element method

Введение

Проектирование шахт и рудников, обоснование технологий разработки месторождений твердых полезных ископаемых [1,2] трудно представить без комплекса геомеханических исследований, важная составная часть которых — оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях естественного залегания [3-5]. Вертикальную составляющую поля напряжений, принято считать за вес вышележащих пород $\sigma_v(y) = \rho gy$ (ρ - средняя плотность пород, g - ускорение свободного падения, y - глубина). Для оценки горизонтальных компонент поля напряжений существуют различные подходы например, физическое моделирование [6]; сейсмоакустический мониторинг [7]; натурный эксперимент, при котором в поле напряжений вносится возмущение и по отклику горного массива определяются искомые напряжения [2,8-10]. Эти методы, как правило, являются трудоемкими и дорогостоящими [2,11].

При разработке месторождений камерно-столбовым способом возникают вопросы определения свойств оставленных целиков [12] для прогноза их устойчивости [13]. Особенно это важно для рудников, где осуществляется повторная выемка руды [14, 15]. Решение таких вопросов, например, путем отбора и испытания образцов [16, 17], осложняются наличием в оставленных целиках трещин и неоднородностей.

В данной статье предложен метод определения двух горизонтальных компонент природного поля напряжения, а так же упругих характеристик (модулей Юнга, коэффициентов Пуассона) оставленных целиков при камерно-столбовой системе отработки месторождений. Как известно, изменение конфигурации подземного пространства при отработке месторождения вызывает вариацию полей напряжений и деформаций. Идея метода заключается в использовании уже готовых выработок для замера смещений их контуров при выемки запасов из рядом стоящих камер.

Постановка прямой задачи

Рассмотрим фрагмент типичной конфигурации подземного пространства, возникающего при реализации камерно-столбовой системы отработки пластового месторождения неглубокого субгоризонтального залегания с оставлением ленточных целиков, характерной для калийных рудников [18]. На рис. 1а показано вертикальное сечение исследуемого объекта, на рис. 1б – горизонтальное сечение ($y = -20 м$).

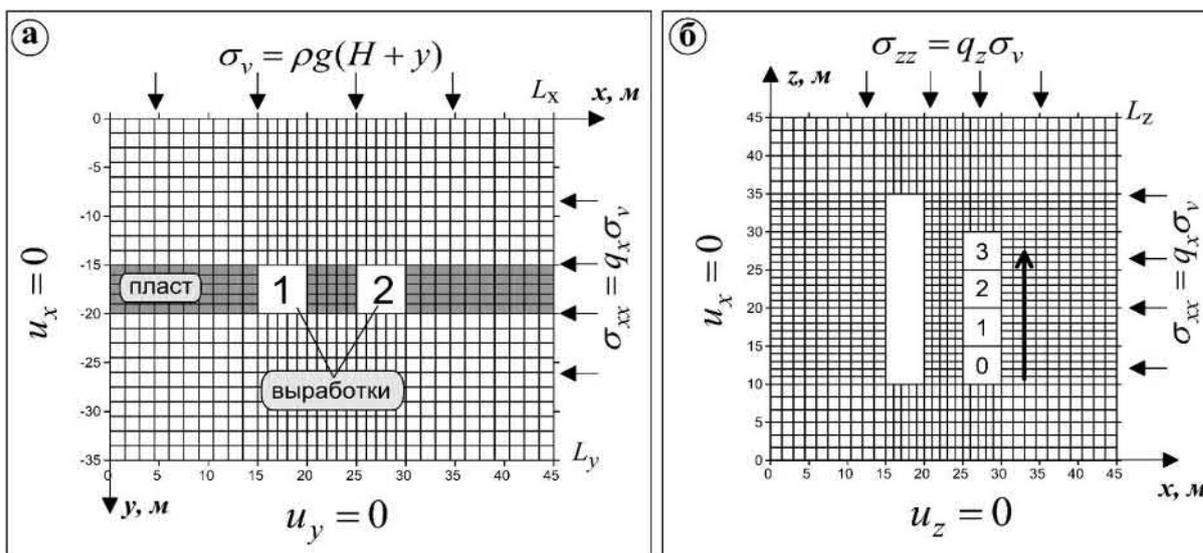


Рис. 1. Дискретизации расчетной области на конечные элементы и граничные условия

Исследуемый участок располагается на глубине $H = 300 \text{ м}$. Размер исследуемой области $L_x = 45 \text{ м}$, $L_z = 45 \text{ м}$, $L_y = 35 \text{ м}$. В пласте мощностью 5 м пройдена выработка 1. Выработка 2 отрабатывается пошагово, с шагом 5 м. Направление отработки показано стрелкой на рис. 1б. После каждого шага регистрируются вертикальные и горизонтальные смещения контура выработки 1. Контрольные точки для измерения вертикальных U_y и горизонтальных U_x смещений контура расположены вдоль первой выработки по оси z с промежутком 1 м (рис. 2). Между выработками располагается предохранительный целик. Геометрические размеры выработок и целика в вертикальном сечении – $5 \times 5 \text{ м}$. Физические свойства (плотность ρ , модуль юнга E и коэффициент Пуассона ν) слагающих массив пород приведены в табл. 1 [19, 20]. Расчетная область располагается под действием вертикального σ_v и двух горизонтальных σ_x, σ_z сжимающих напряжений. Вертикальное напряжение соответствует весу вышележащих пород, а горизонтальное характеризуется коэффициентами бокового отпора q_x, q_z .

Таблица 1

Физические свойства пород

Порода	ρ , кг/м ³	E , ГПа	ν
Вмещающая среда	2500	2	0.3
Пласт	2400	1.7	0.3

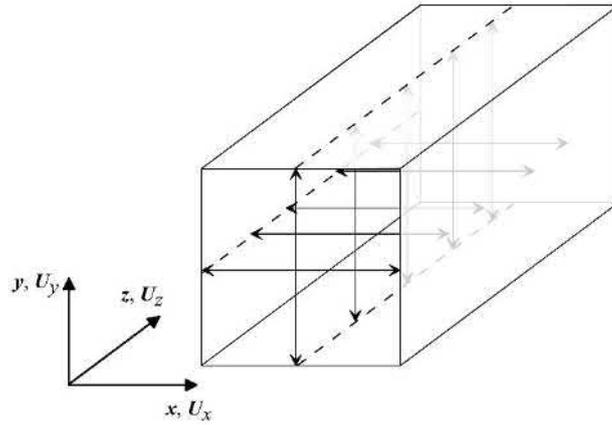


Рис. 2. Места измерения горизонтальных и вертикальных смещений вдоль первой выработки

Для описания деформирования породного массива воспользуемся системой уравнений линейной теории упругости, включающей уравнения равновесия(1), закон Гука (2) и соотношений Коши для малых деформаций (3)

$$\sigma_{ij,j} + \rho g \delta_{iz} = 0, \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (3)$$

где σ_{ij} и ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций ($i, j = x, y, z$), u_i – смещения, ρ – плотность пород, g – ускорение свободного падения, δ_{ij} – символ Кронекера, λ и μ параметры Ламе.

На границе расчетной области сформулируем следующие условия:

$$\sigma_{xx}(L_x, y, z) = q_x \sigma_v, \quad (4)$$

$$\sigma_v(x, 0, z) = \rho g(H + y) \quad (5)$$

$$\sigma_{zz}(x, y, L_z) = q_z \sigma_v, \quad (6)$$

$$u_x(0, y, z) = 0, \quad (7)$$

$$u_y(x, -L_y, z) = 0, \quad (8)$$

$$u_z(x, y, 0) = 0. \quad (9)$$

Предположим, что выработки ориентированы по направлению главных сжимающих напряжений, касательные напряжения на границе расчетной области равны нулю:

$$\sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0. \quad (10)$$

Контуры выработок свободны от напряжений. Коэффициенты бокового отпора в расчетах были равны: $q_x = 0.5$, $q_z = 0.8$.

Расчеты осуществлялись с использованием оригинального кода, реализующего 3D метод конечных элементов для структурно-неоднородных сред с нарушениями сплошности. В расчетной области генерировалась сетка четырехугольных элементов с линейными размерами 1 м, содержащая $35 \cdot 10^3$ узлов.

На рис.3 приведены горизонтальные и вертикальные смещения контура первой выработки при пошаговой отработке второй выработки. Можно отметить, что по мере развития горных работ наблюдается последовательное увеличение деформации рядом стоящей выработки

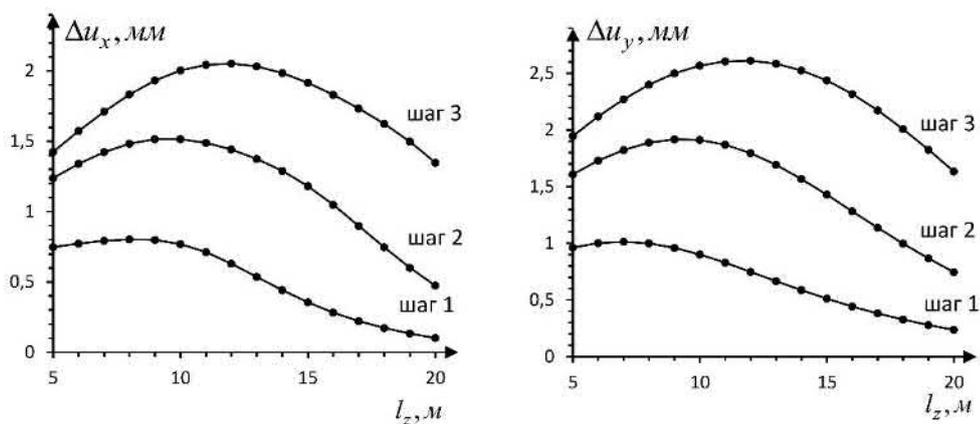


Рис. 3. Места измерения горизонтальных и вертикальных смещений вдоль первой выработки

На рис.4 приведена эволюция горизонтальной компоненты поля напряжений по мере отработки второй выработки. Отметим постепенное сгущение изолиний и повышение напряжений в зоне целика между выработками.

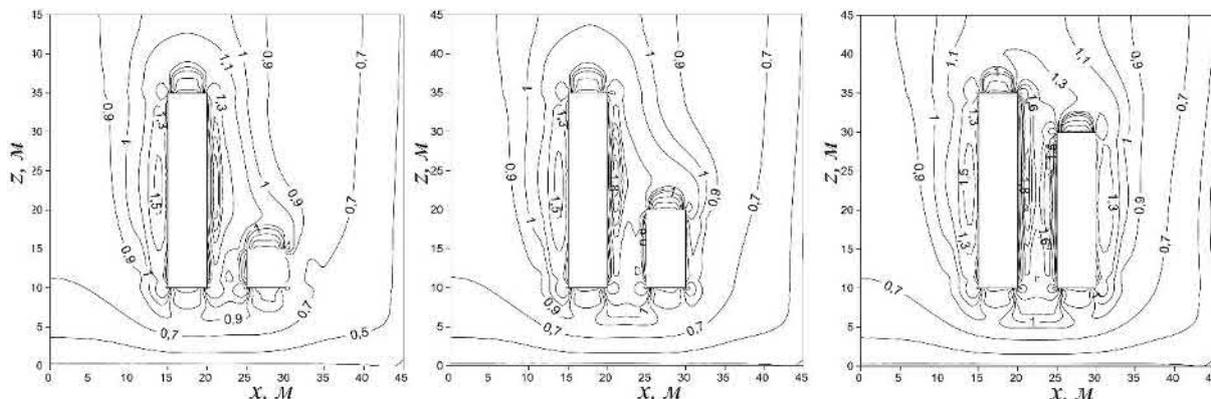


Рис. 4. Изолинии горизонтальной компоненты поля напряжений σ_{zz}

Обратная задача

Сформулируем обратную задачу [21,22] и исследуем ее на разрешимость: определить два коэффициента бокового отпора q_x, q_z и упругие характеристики (модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν) целика расположенного между двумя выработками по приращениям смещений, замеренным на контуре камеры 1 (рис. 1). Введем два функционала Φ_x, Φ_y , минимум которых даст решение задачи. Использование независимых двух целевых функционалов обеспечивает с одной стороны дополнительный контроль решения задача, а с другой делает метод более гибким и менее зависимым от шахтных условий и возможностей оборудования.

$$\Phi_x = \sum_i \sum_n \left[\Delta U_x(z_n, E, \nu, \sigma_{xx}, \sigma_{zz}) - \Delta U_x^{real}(z_n) \right]^2 \quad (11)$$

$$\Phi_y = \sum_i \sum_n \left[\Delta U_y(z_n, E, \nu, \sigma_{xx}, \sigma_{zz}) - \Delta U_y^{real}(z_n) \right]^2 \quad (12)$$

где i соответствует номеру шага при образовании второй выработки ($i=1,2,3$), n – количество точек вдоль измерительной выработки, z_n - координата вдоль оси z , задающая местоположение пунктов измерений смещений контура выработки. $\Delta U_x(z_n, E, \nu, \sigma_{xx}, \sigma_{zz})$ и $\Delta U_y(z_n, E, \nu, \sigma_{xx}, \sigma_{zz})$ - расчетные значения дивергенции боковых стенок и кровли и почвы в измерительной выработке. $\Delta U_x^{real}(z_n)$, $\Delta U_y^{real}(z_n)$ - результаты натуральных измерений. При численном моделировании в качестве последних использовались синтетические данные:

$$\begin{aligned} \Delta U_x^{real}(z_n) &= (1 + \xi) \Delta U_x(z_n, E^*, \nu^*, \sigma_{xx}^*, \sigma_{zz}^*), \\ \Delta U_y^{real}(z_n) &= (1 + \xi) \Delta U_y(z_n, E^*, \nu^*, \sigma_{xx}^*, \sigma_{zz}^*) \end{aligned} \quad (13)$$

где $E^*, \nu^*, \sigma_{xx}^*, \sigma_{zz}^*$ – искомые значения параметров (точное решение), ξ – равномерно распределенная на отрезке $[-A_{err}; A_{err}]$ случайная величина, имитирующая мультипликативный шум. Амплитуда случайной ошибки A_{err} варьировалась в пределах от 10% до 30%.

На рис. 5 представлены изолинии целевой функции Φ_x и Φ_y для с уровнем ошибок во входных данных 20-30% в сечении $q_x = q_x^*, q_z = q_z^*$ ($\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^*, \sigma_{zz} = \sigma_{zz}^*$). Видно, что целевая функция унимодальна и имеет один минимум. Серым кружком отмечено точное решение. Белая область – область минимума целевой функции. Как видно не всегда область минимума функции совпадает с точным решением, но ее размер и положение около точного решения

говорит о целесообразности использования этой целевой функции для нахождения искомых параметров E, ν . Так при уровне ошибки во входных данных 30% (рис.5б) можно найти E и ν с точностью 10%. Целевая функция Φ_y (рис. 5в) имеет ярко выраженную овражную структуру, она не позволяет отыскать коэффициент Пуассона, но Модуль Юнга целика находится так же с точностью 10%.

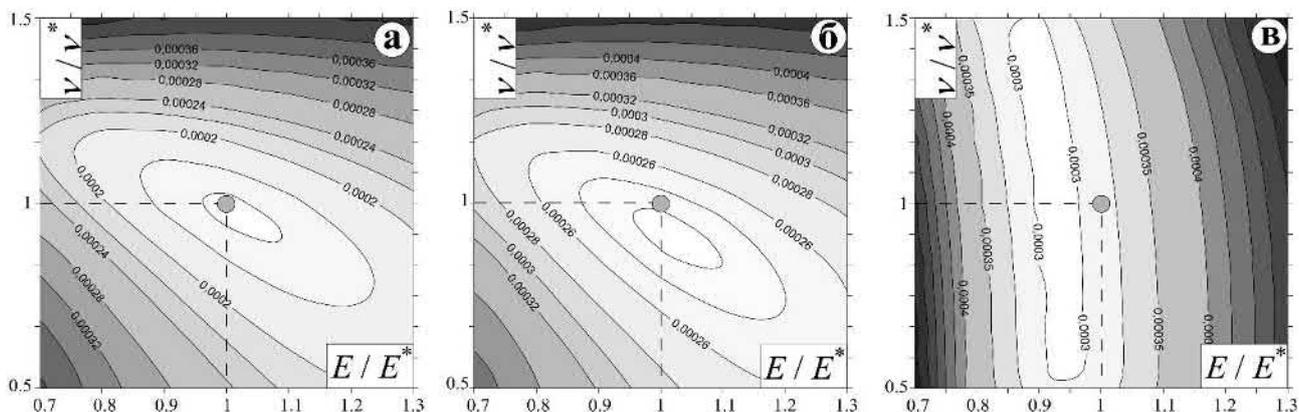


Рис. 5. Изолинии целевых функций:

- а) Φ_x с амплитудой ошибки 20%, б) Φ_x с амплитудой ошибки 30%, в) Φ_y с амплитудой ошибки 30%

На рис. 6 представлены изолинии целевой функции Φ_x и Φ_y для с уровнем ошибок во входных данных 10-30% в сечении $E = E^*, \nu = \nu^*$. Серый кружок – точное решение, белая область – область минимумам целевой функции. Видно, что целевая функция Φ_x (рис. 6а,б) имеет один минимум, но он растянут, так что нет возможности отыскать параметр q_z , однако, q_x находится достаточно точно (отклонение 10% от точного решения), даже при большой ошибке в 30%. Целевая функция Φ_y (рис. 6в) не подходит для определения параметров q_x, q_z даже при относительно небольшом уровне ошибки во входных данных.

Видно, что целевая функция унимодальна и имеет один минимум. Серым кружком отмечено точное решение. Белая область – область минимума целевой функции. Как видно не всегда область минимума функции совпадает с точным решением, но ее размер и положение около точного решения говорит о целесообразности использования этой целевой функции для нахождения искомых параметров E, ν . Так при уровне ошибки во входных данных 30% (рис.5б) можно найти E и ν с точностью 10%. Целевая функция Φ_y (рис. 5в) имеет ярко выраженную овражную структуру, она не позволяет отыскать коэффициент Пуассона, но Модуль Юнга целика находится так же с точностью 10%.

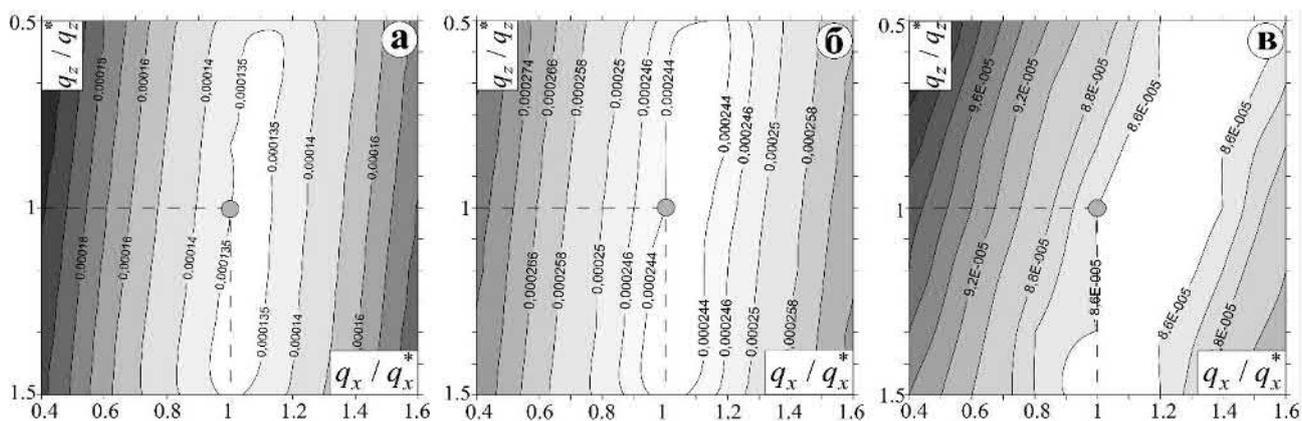


Рис. 6. Изолинии целевых функций:

- а) Φ_x с амплитудой ошибки 20%, б) Φ_x с амплитудой ошибки 30%, в) Φ_y с амплитудой ошибки 10%

Заключение

Сформулирована обратная задача для поиска двух горизонтальных компонент поля сжатия и упругих характеристик целика, проанализированы структуры целевых функций. Выявлена наиболее предпочтительная функция Φ_x , которая позволяет находить модуль Юнга и коэффициент Пуассона целика, одну из компонент внешнего поля сжатия σ_{xx} с точностью 10% (при уровне ошибки во входных данных не более 30%). Для реализации данного подхода необходимо регистрировать относительные горизонтальные смещения контура имеющейся выработки при проведении очистных работ в рядом стоящей выработке. Таким образом мониторинг может осуществляться в процессе ведения горных работ методами подземной геодезии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А17-117121140065-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петухов И. М., Батугина И. М. Геодинамика недр. — М.: Недра, 1999. — 256 с.
2. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. — 1989. — 488 с.
3. Yang S. Q. et al. A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'An coal mine, China //Engineering Geology. — 2017. — Т. 217. — С. 89-101.
4. Golik V. I., Efremkov A. B. Control of rock mechanics in underground ore mining //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2017. — Т. 221. — №. 1. — С. 012013.

5. Lin C., Guo D., Liang Y. Influence of Structural Elements and Stress on Mining-Induced Fault Slip //Geotechnical and Geological Engineering. – 2018. – Т. 36. – №. 1. – С. 439-453.
6. Bin Z., Ge L. Experimental Simulation of the Mine Pressure in Chuancao Gedan Coal Mine //Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2016. – Т. 21. – С. 44-47.
7. Cao A. et al. Case study of seismic hazard assessment in underground coal mining using passive tomography //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – Т. 78. – С. 1-9.
8. Zang A., Stephansson O. Stress field of the Earth's crust. – Springer Science & Business Media, 2009, p. 322.
9. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. Fundamentals of rock mechanics. – John Wiley & Sons, 2009, p. 488.
10. Панов А. В. и др. Определение горизонтальных составляющих природного поля напряжений по данным измерительного гидроразрыва //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 6. – С. 126-135.
11. Курленя М. В., Попов С. Н. Теоретические основы определения напряжений в горных породах. – Наука. Сиб. отд-ние, 1983. – 96с.
12. Чарковский К. И., Марочкин Д. В., Свидетелев М. А. Влияние модулей упругости пород и руд на степень нагруженности междукамерных целиков //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2003. – №. 7. – С. 193-196.
13. Лаптев Б. В. Историография аварий при разработке соляных месторождений //Безопасность труда в промышленности. – 2011. – №. 12. – С. 41-46.
14. Аханов Т. М., Прокушев Г. А. Современное состояние разработки и проблемы развития технологии на этапе доработки Жезказганского месторождения //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – №. 11. – С. 5-12.
15. Герман В. И., Мансуров В. А. Прогноз обрушений на Жезказганском медном месторождении //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – №. 1. – С. 95-104.
16. Паньков И. Л., Морозов И. А. Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении //Записки Горного института. – 2019. – Т. 239. – С. 510-519.
17. Yang S. Q. Strength and deformation behavior of red sandstone under multi-stage triaxial compression //Canadian Geotechnical Journal. – 2012. – Т. 49. – №. 6. – С. 694-709.
18. Боликов В. Е., Константинова С. А. Прогноз и обеспечение устойчивости капитальных горных выработок. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – С. 372.
19. Барях А. А., Константинова С. А., Асанов В. А. Деформирование соляных пород. – Екатеринбург: УрО РАН, – 1996. – С. 204.
20. Морозов И. А. Определение прочностных характеристик соляных пород по результатам объемного многоступенчатого нагружения //Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2017. – С. 142-145.

21. Vatulyan A. O. Inverse problems in deformable solid mechanics //Russian (Fizmatlit, Moscow, 2007) p. – 2007. – С. 224.

22. Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. – Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. – С. 342.

© *А. В. Панов, Л. А. Назаров, 2021*

ПУТИ СНИЖЕНИЯ МАССЫ КОРПУСА РАБОЧЕГО КОЛЕСА ШАХТНОГО ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА С ПОВОРОТНЫМИ ЛОПАТКАМИ

Надежда Владимировна Панова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091 Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, к.т.н., н.с., 89133990960, e-mail: nadejda_panova@bk.ru

В данной статье рассматривается применение методов топологической оптимизации при проектировании корпуса рабочего колеса, рассчитанного на повышенные скорости вращения с использованием программного комплекса ANSYS.

В качестве целевой функции при оптимизации рабочего колеса используется минимальная податливость, а в качестве параметра оптимизации принято изменение внутреннего конструктивного объема, при ограничениях на внешнюю геометрию колеса.

При оптимизации корпуса рабочего колеса установлено, что можно уменьшить массу силового пояса, один диск сделать несущим, а второй более тонким или перейти на схему рабочего колеса с одним диском. Кроме того, установлено, что при проектировании можно применить элементы ферменной конструкции.

Ключевые слова: осевой вентилятор, топологическая оптимизация, корпус рабочего колеса, снижение массы.

REDUCTION IN WEIGHT OF HOUSING OF AXIAL MINE FAN IMPELLER WITH ROTATING BLADES

Nadezhda V. Panova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, +7 913 399 0960, e-mail: nadejda_panova@bk.ru

The study uses topological optimization techniques in design of the housing of an impeller meant for the increased rotational speeds in ANSYS. The objective function of the impeller optimization is the minimum yield, and the optimization parameter is assumed as the change in the interior volume of the structure under certain constraints imposed on the external geometry of the impeller. The optimization of the impeller housing shows that it is possible to reduce the weight of the power belt, and to make one web to be load-bearing and the other web to be thinner, or to switch to the impeller with one web. Moreover, the design can use some elements of a lattice structure.

Keywords: axial fan, topology optimization, impeller housing, weight reduction

Введение

В шахтах с ростом глубины ведения работ и выделений вредных примесей, а так же эволюцией вентиляционных параметров за период эксплуатации возрастает необходимость увеличения поля покрытия требуемых режимов проветривания [1-2]. Одним из вариантов решения этого вопроса является увеличение окружных скоростей вращения по концам лопаток осевого вентилятора до 230 м/с, что так же способствует повышению реверсивных качеств вентиляторов по сравнению с менее

скоростными машинами, рассчитанными на те же значения полного давления [3-4], но в этом случае значительно возрастают и нормальные силы инерции, снизить которые возможно за счет снижения массы лопаток и корпуса рабочего колеса. Возможное снижение массы лопаток высоконагруженных вентиляторов и турбин путем топологической оптимизации ранее уже было рассмотрено рядом авторов [5-8].

Методы и материалы

В данной статье рассматривается возможность применения топологической оптимизации при проектировании корпуса рабочего колеса с повышенными скоростями вращения методом математического моделирования с использованием программного комплекса ANSYS [9-15].

Цель топологической оптимизации – получение оптимального распределения материала при заданных нагрузках и граничных условиях. Рассматривается возможность оптимизации с обеспечением допустимого уровня напряжений в элементах корпуса рабочего колеса с учетом предельных прочностных характеристик используемых материалов и принятых коэффициентов запаса прочности.

В программном пакете ANSYS для топологической оптимизации используется метод: SIMP (Solid Isotropic Material with Penalty, твердый изотропный материал с пенализацией). основополагающая идея SIMP-метода заключается в создании поля виртуальной плотности заданной геометрии, которое представляет собой поле безразмерных относительных плотностей ρ , где каждому элементу сетки присваивается значение ρ от 0 до 1. Перед оптимизацией поле плотности однородно ($\rho = 1$). Назначение метода состоит в уменьшении количества элементов конструкции с нулевой и некоторой промежуточной относительной плотностью при заданных граничных условиях и заданном условии оптимизации – снижение массы до определенного процента от первоначальной конструкции [16-17].

В данной статье возможность оптимизации корпуса рабочего колеса рассмотрена на примере осевого вентилятора главного проветривания ВО-36К с диаметром рабочего по концам лопаток 3600 мм и окружной скоростью вращения 62.8 рад/с, масса колеса до оптимизации 3692 кг. Перед оптимизацией задается масса бедующей конструкции в процентах от массы первоначальной конструкции – 70%, тем самым определяется диапазон изменения виртуальной плотности. Задаются области в которых производить оптимизацию не надо, в нашем случае это ступица и места крепления лопаток.

Корпус рабочего колеса находится под воздействием центробежных сил от собственной массы, действующей на весь корпус рабочего колеса от масс закрепленных лопаточных узлов, действующих на силовой пояс РК [18-19]. Аэродинамическими нагрузками в расчетах можно пренебречь, так как они малы по сравнению с центробежными (рис. 1).

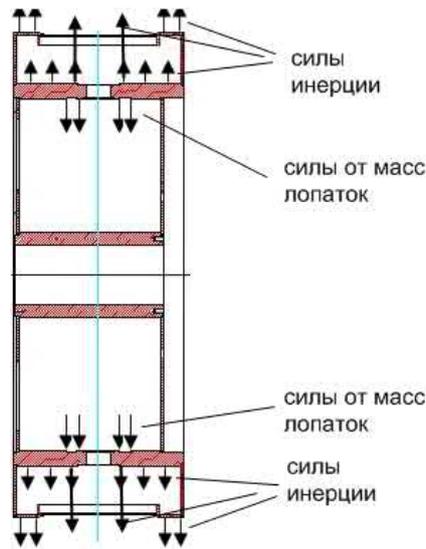


Рис. 1. Силы действующие на корпус РК

Элементы корпуса проектируются из стали 10ХСНД ГОСТ 19282-73 (предел текучести $\sigma_T = 400$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 540$ МПа).

Для оценки прочности принято, что, коэффициент запаса $n = 1.8$, соответственно, допускаемые напряжения:

$$\sigma_{\text{доп}} = \sigma_T / n = 220 \text{ МПа.}$$

Проводим статический расчет прочности для определения минимальной податливости, а далее проводим оптимизацию корпуса рабочего колеса. На рис. 2 представлено распределение материала в корпусе рабочего колеса после оптимизации, где серым цветом показаны участки, которые необходимо оставить в первоначальном виде, а оранжевым участки, в которых после оптимизации можно снизить металлоёмкость по сравнению с изначально заложенной конструктивно.

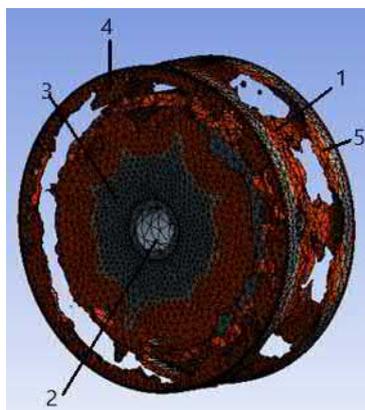


Рис. 2. Распределение материала в корпусе рабочего колеса после оптимизации
1 - силовой пояс, 2 - ступица, 3 - опорный диск, 4 - несущий диск, 5 - обечайка.

Результаты

После топологической оптимизации в ANSYS поверхность тела не получается гладкой, а состоит из граней элементов сетки, оставшихся после оптимизации, поэтому необходимо провести интерпретацию конечно-элементной модели к твердотельной. Эта работа является отдельным достаточно сложным процессом. Для сглаживания поверхностей на 3D моделях есть несколько методов: метод обрисовки моделей вручную в пакетах 3D-моделирования, использование PolyNURBS сплайнов или сглаживание сетки в специальных пакетах, например Autodesk meshmixer [20]. Стоит учесть, что при сглаживании и преобразовании полученной конечно-элементной модели в твердотельную возможно изменение характеристик прочности. Окончательная форма оптимизированного корпуса рабочего колеса должна прорабатываться с учетом уровня затрат и технологических возможностей изготовления, и прочих факторов.

В результате проведенной оптимизации, установлено, что можно уменьшить массу силового пояса, один опорный диск сделать несущим, а второй более тонким или перейти на схему рабочего колеса с одним опорным диском. Кроме того, установлено, что при проектировании можно применить элементы ферменной конструкции.

Работа выполнена в рамках научной темы FWNZ-2021-0004

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров Н.Н., Панова Н.В., Грехнёва Е.Ю. Адаптация аэродинамических характеристик главных вентиляторов к изменениям вентиляционных режимов шахт// ФТПРПИ.– 2013. – №5. – С.119 – 126.
2. Петров Н.Н., Грехнева Е.Ю. Разработка аэродинамики и конструкции реверсивных вентиляторов местного проветривания. // Родник будущего. – 2011. – №4(8). – С. 76.–78
3. Красюк А.М., Лугин И.В., Косых П.В., Русский Е.Ю. обоснование способа продления ресурса шахтных двухступенчатых осевых вентиляторов главного проветривания. // ФТПРПИ.– 2019. – №3. – С.150 – 167
4. Косых П.В. Разработка аэродинамических схем высоконагруженных реверсивных осевых вентиляторов. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т.2. С. 72-81.
5. Попова Д.Д., Самойленко Н.А., Семенов С.В., Балакирев А.А., Головкин А.Ю. Применение метода топологической оптимизации для уменьшения массы конструктивно подобного кронштейна трубопровода авиационного ГТД// Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника- 2018. - №55. - С. 42-53.
6. Власенков А.Н., Павлов А.П., Пасечкин Д.Ю Оптимизация конструкций изделий с применением систем автоматической оптимизации // Наука и бизнес: пути развития. - 2020. - №10 (112). С. 16-21.
7. Красюк А.М Русский Е.Ю. К вопросу оптимального проектирования лопаток осевых вентиляторов с повышенными скоростями вращения // ФТПРПИ.– 2020. – №6. – С.161 – 169.
8. Васильев Б.Е., Магеррамова Л.А. Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании неохлаждаемых рабочих лопаток турбин // Вестник СГАУ. – 2015. - №3-1.- С. 139-147

9. Saleem W., Lu H., Yuqing F. 2008. Topology Optimization – Problem Formulation and Pragmatic Outcomes by integration of TOSCA and CAE tools. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, WCECS 2008. SanFrancisco, USA: 6 p.
10. Eschenauer H., Olhoff N. Topology Optimization of Continuum Structures: A Review // ASME Applied Mechanics Reviews. 2001. Vol. 54. No. 4. Pp. 331-390.
11. Zhao J., Du F., Yao W. Structural Analysis and Topology Optimization of a Bent-Bar-Frame Piston Based on the Variable Density Approach // Proceedings of the ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference. 2014. Pp. 1-7.
12. Du F., Tao Z. Study on Lightweight of the Engine Piston Based on Topology Optimization // Advanced Materials Research. 2011. Vols. 201-203. Pp. 1308-1311.
13. Barbieria S.G., Giacopinia M., Mangerugaa V., Mantovani S. A Design Strategy Based on Topology Optimization Techniques for an Additive Manufactured High Performance Engine Piston // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. Pp. 641-649.
14. Hu, J., Li, M. Email Author, Yang, X., Gao, S. Cellular structure design based on free material optimization under connectivity control // CAD Computer Aided Design Volume 127, October 2020, Номер статьи 102854.
15. Zhao, L.a, Xu, B.a Email Author, Han, Y.a, Rong, J.b. Continuum structural topological optimization with dynamic stress response constraints // Advances in Engineering Software Volume 148, October 2020, Номер статьи 102834.
16. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. — С. 51—61.
17. Кротких А.А. Максимов П.В. Исследование и модификация метода топологической оптимизации SIMP // Междунар. Науч.-исслед. журнал. – 2016. - №01(55). – С.91-94.
18. Петров Н.Н., Панова Н.В. Анализ влияния конструктивных элементов корпуса рабочего колеса на прочности высоконагруженных вентиляторов серии ВО // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 7 – С. 17 – 20.
19. Петров Н.Н., Панова Н.В. Исследование прочности рабочих колес со сдвоенными листовыми лопатками ряда высоконагруженных вентиляторов главного проветривания шахт // Научный вестник НГТУ. – 2013. – №1 (50). – С. 190 – 194.
20. Максимов П. В., Фетисов К. В. Анализ методов доработки конечно-элементной модели после топологической оптимизации // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 9 (51) Часть 2 . — С. 58—60.

© Н. В. Панова, 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И РАБОЧЕГО ЦИКЛА ВИБРОУДАРНЫХ СИСТЕМ, УЧАСТВУЮЩИХ В РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Вадим Валерьевич Плохих

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. (913)389-01-74, e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

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, и.о. зав.отделом горной и строительной геотехники, тел. (383)205-30-30, доб. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Дмитрий Олегович Чецин

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (923)198-81-81, e-mail: dimixch@mail.ru

В статье рассматривается возможность применения гидравлических и пневматических ударных машин для работы в составе роботизированных буровых комплексов. Анализ специфики этой задачи позволил создать новые принципиальные схемы ударных машин, позволяющие изменять их динамические показатели в зависимости от свойств обрабатываемой среды, реализовать адаптивные технологические процессы. Исследование динамики рабочего цикла на имитационных моделях, построенных в междисциплинарном программном комплексе ITI SimulationX, позволило определить динамические параметры виброударных систем. Результаты исследования подтверждают возможность создания таких типов машин.

Ключевые слова: проходка скважин, породный массив, гидроударник, пневмоударник, упругий клапан, рабочий цикл, адаптивные технологии

DYNAMICS AND OPERATING CYCLES OF VIBRATORY-PERCUSSIVE SYSTEMS INVOLVED IN IMPLEMENTATION OF ADAPTIVE TECHNOLOGIES

Vadim V. Plokhikh

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Research at the Mining and Construction Equipment Department, +7 913 389 0174, e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Principal Researcher, Acting Head of the Mining and Construction Equipment Department, office: +7 (383) 205 30 30, ext. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Dmitry O. Cheshchin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Researcher at the Mining and Construction Equipment Department, +7 923 198 8181, e-mail: dimixch@mail.ru

The study discusses serviceability of pneumatic and hydraulic percussion machines within robotic drilling systems. The newly designed action charts of percussion machines allow varying flow data of the machines versus properties of the medium being treated, which enables technological adaptability of the machines. Simulation modeling of the operating cycle dynamics in ITI SimulationX made it possible to determine dynamic parameters of vibratory–percussive systems. The research findings prove designability of such machines.

Keywords: drilling, rock mass, hydraulic hammer, air drill hammer, elastic valve, operating cycle, adaptive technologies

Введение

Бестраншейные технологии прокладки коммуникаций играют важную роль в горно-добывающей промышленности, строительстве инфраструктуры предприятий, городов и в других отраслях народного хозяйства. Для реализации таких технологий широко применяются виброударные машины (пневматические и гидравлические). Наиболее распространены пневматические ударные машины. Эти машины обладают конструктивной простотой, надежностью работы в неблагоприятных условиях. Однако существенным недостатком этих машин является низкий коэффициент полезного действия (КПД). В мировой практике все шире применяются гидравлические ударные машины. Такие машины, по сравнению с пневматическими, более сложны в технологическом отношении и требуют более высокой точности изготовления их деталей и узлов. Однако преимущества гидропривода по сравнению с пневмоприводом значительны. К наиболее важным можно отнести большие резервы повышения ударной мощности и увеличение КПД машины.

Актуальной проблемой, связанной с переходом горных работ на большие глубины является обеспечение безопасности персонала в крайне неблагоприятных условиях. Кардинальным решением этой проблемы может быть внедрение систем дистанционного управления, использование «безлюдных» технологических процессов с посредством создания роботизированных буровых комплексов. Для этого необходимы ударные машины, обладающие возможностью адаптации режима импульсного силового воздействия к условиям технологического процесса и свойствам обрабатываемой среды [1-5]. Для оценки этих возможностей необходимо разработать принципиальные схемы ударных машин и провести исследование динамики рабочего цикла с использованием имитационных моделей.

Методы и материалы

Наиболее перспективными техническими решениями в контексте упомянутых требований являются ударные механизмы, в которых для герметизации рабочих камер и переключения потока энергоносителя используется кольцевой эластичный клапан. Пневмомолоты «Тайфун», давно и успешно применяющиеся в строительстве, являются примером выполненных по такой схеме пневмоударных механизмов [6-16].

Анализ известных конструктивных решений показывает, что предпочтительным является расположение клапана на неподвижных деталях механизма.

В этом случае удастся уменьшить износ клапана и увеличить ресурс работы механизма в целом, особенно в условиях запыленности. Кроме того, упрощается задача реализации адаптивных технологических процессов посредством изменения структуры ударной мощности (соотношение энергии и частоты ударов).

С учетом изложенных факторов в ИГД СО РАН разработан вариант принципиальной конструктивной схемы пневматического ударного устройства с упругим клапаном, установленным на наковальне. Схема представлена на рис. 1.

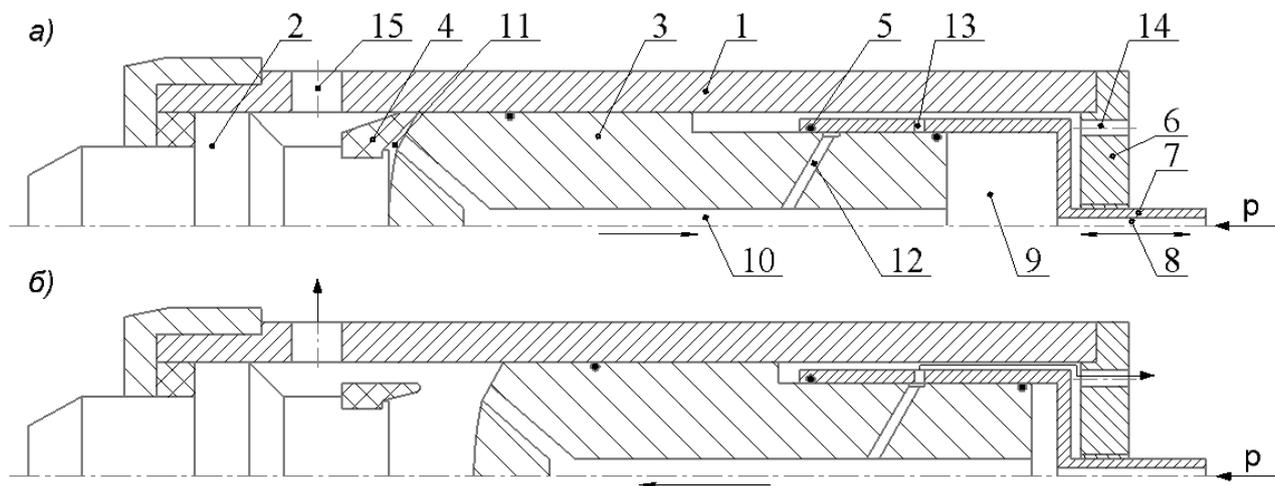


Рис. 1. Конструктивная схема пневмоударного механизма

1 – корпус; 2 – наковальня; 3 – ударник; 4 – упругий клапан; 5 – резиновое уплотнение; 6 – задняя гайка; 7 – подвижная втулка; 8 – канал подвода сжатого воздуха; 9 – камера рабочего хода; 10 – осевой канал; 11 – камера холостого хода; 12 – выхлопной канал; 13 – выхлопное отверстие во втулке; 14 – выхлопное отверстие в задней гайке; 15 – выхлопное отверстие в корпусе; p – магистральное давление

Пневмоударный механизм состоит из корпуса 1, наковальни 2, ударника 3, подвижной втулки 7 и упругого клапана 4. Подвод сжатого воздуха осуществляется через канал 8 непосредственно в камеру рабочего хода 9.

Устройство работает следующим образом. Ударник 3, находясь в положении удара (рис. 1а), механически деформирует упругий клапан 4, тем самым закрывая кольцевой зазор между клапаном и внутренней цилиндрической поверхностью корпуса 1. Энергоноситель поступает через канал 8 подвижной втулки 7 в камеру рабочего хода 9. Далее через канал 10 в ударнике сжатый воздух поступает в камеру холостого хода 11. Так как площадь со стороны камеры холостого хода больше, чем со стороны камеры рабочего хода ударник движется в заднее положение. Клапан при этом находится в упруго-деформированном (растянутом) состоянии и удерживается в этом состоянии давлением воздуха в камере холостого хода.

В конце холостого хода (рис. 1б) происходит соединение камеры 11 с атмосферой через каналы в ударнике 10 и 12 и через выхлопные отверстия 13 и 14. Происходит падение давления в камере холостого хода, что приводит к умень-

шению деформирующего усилия и переходу клапана в свободное (открытое) состояние. Открывается кольцевой зазор над клапаном и происходит выхлоп энергоносителя из камеры холостого хода через выхлопное отверстие в корпусе 15 в атмосферу. В конце рабочего хода ударник бьет по наковальне 2. При этом осуществляется механическое закрытие упругого клапана. Далее цикл повторяется. Перемещение подвижной втулки 7 позволяет изменять величину рабочего хода ударника, тем самым изменяя структуру ударной мощности непосредственно в процессе работы машины.

Для исследования динамики рабочего процесса виброударных систем в ИГД СО РАН широко применяется программный комплекс SimulationX (ITISimX) для моделирования физико-технических объектов и систем [17].

В программе ITISimX была построена имитационная модель разработанной пневмоударной системы, в которую заложены основные параметры к объектам модели из конструктивной схемы. Расчетная схема, составленная в программе, представлена на рис. 2.

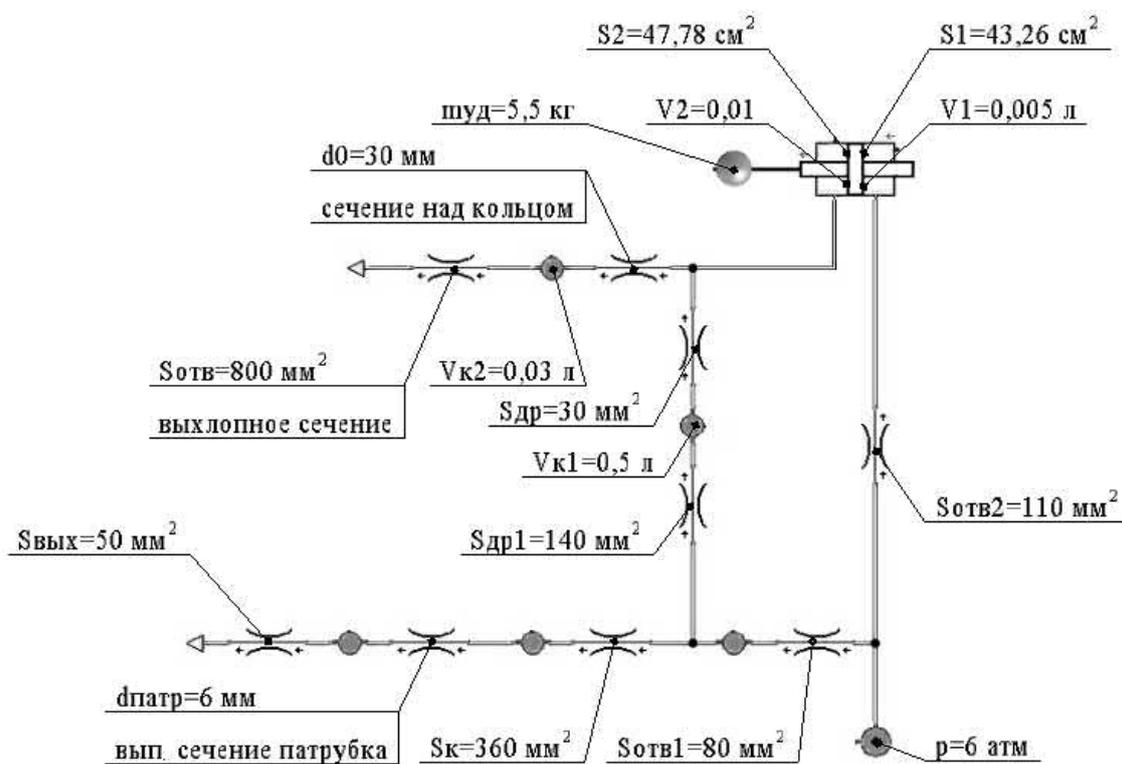


Рис. 2. Расчетная схема пневмоударной системы с упругим клапаном в программе ITI SimulationX

Стоит отметить, что существенным и практически неустраняемым недостатком пневмоударных машин является низкий КПД. Кардинально увеличить этот показатель можно посредством применения гидроударных машин [18].

Актуальной проблемой при создании таких машин является совершенствование системы циркулирования рабочей жидкости, позволяющей обеспечить

беспрепятственный слив энергоносителя из камеры холостого хода при высокой предупредной скорости ударника в конце рабочего хода. Данное обстоятельство имеет большое значение, поскольку рабочая жидкость несжимаема, и недостаточная площадь сливной магистрали приводит к торможению ударника, что приводит к ухудшению динамики рабочего цикла [19-21]. Разработанная схема пневмоударной машины может являться основой и при создании гидравлического ударного механизма для реализации адаптивных технологических процессов в зависимости от свойств породного массива. Введение дополнительной камеры в конструктивную схему ударного механизма позволит снизить давление в камере холостого хода в конце рабочего цикла.

Исходя из этого, разработана принципиальная конструктивная схема гидроударного механизма, с изменяемой структурой ударной мощности и отдельным распределительным механизмом. Данная схема приведена на рис. 3.

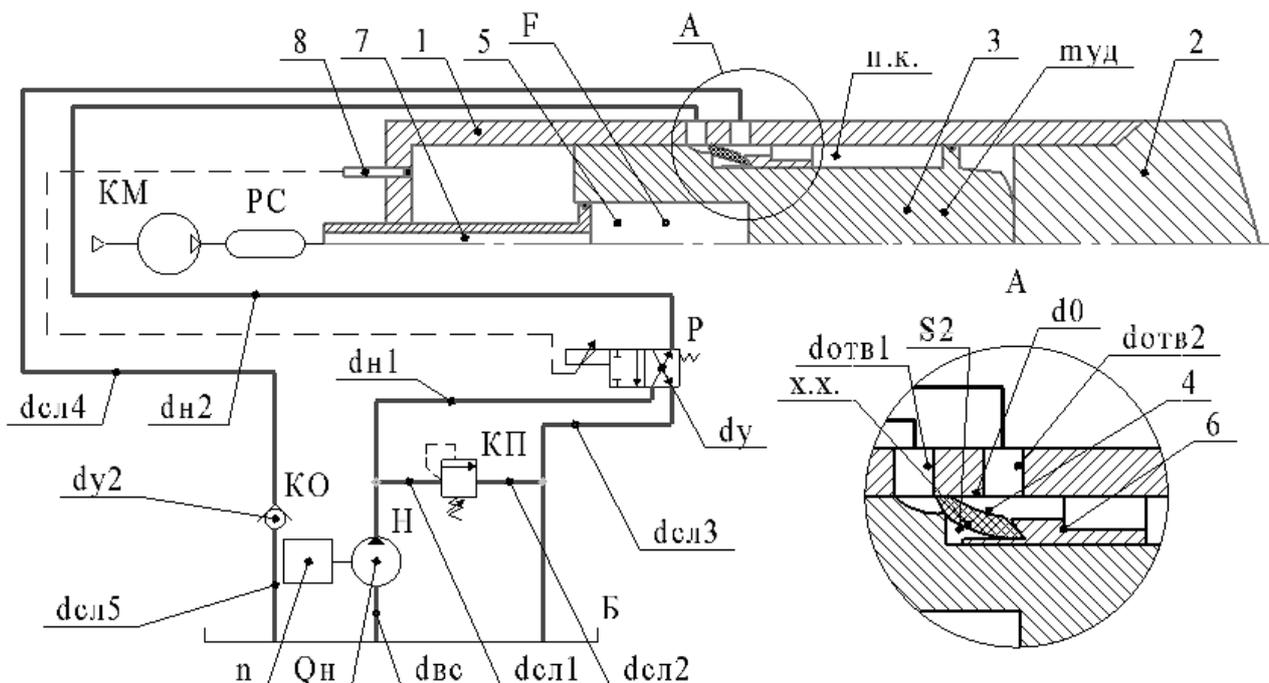


Рис. 3. Конструктивная схема гидроударного механизма с промежуточной камерой и упругим клапаном

1 – корпус; 2 – наковальня; 3 – ударник; 4 – упругий клапан; 5 – камера рабочего хода ударника; 6 – шлицевая гильза; 7 – канал подвода сжатого воздуха; 8 – датчик; х.х. – камера холостого хода ударника; п.к. – промежуточная камера ударника; n – частота вращения вала двигателя; Q_H – производительность насоса; $d_{вс}$ – диаметр всасывающей линии; $d_{сл1}$, $d_{сл2}$, $d_{сл3}$, $d_{сл4}$, $d_{сл5}$ – диаметры сливных линий; $d_{н1}$, $d_{н2}$ – диаметры напорных линий; d_y – диаметр условного прохода распределителя; d_{y2} – диаметр условного прохода обратного клапана; d_0 – диаметр проходного сечения над упругим клапаном; $d_{отв1}$, $d_{отв2}$ – диаметры отверстий в корпусе; S_2 – рабочая площадь камеры обратного хода; $m_{уд}$ – масса ударника

Гидроударный механизм состоит из корпуса 1, наковальни 2, ударника 3 и неподвижной шлицевой гильзой 6 на которой установлен упругий клапан 4. Подвод сжатого воздуха в камеру рабочего хода 5 осуществляется через канал 7 от ресивера РС и компрессора КМ. Ударник показан в положении удара. Подача энергоносителя в камеру холостого хода производится гидрораспределителем Р. Сигнал на переключение золотника распределителя осуществляется системой управления (на схеме не показана) и датчиком 8.

Принцип работы устройства заключается в следующем. Компрессор КМ производит заполнение ресивера РС необходимым давлением и отключается. В дальнейшем компрессор используется для компенсации давления вследствие неизбежных утечек. Ударник 3, находясь в положении удара механически деформирует упругий клапан 4, тем самым закрывая кольцевой зазор d_0 . Происходит разобщение промежуточной и холостой камеры ударника. Энергоноситель через распределитель Р поступает в камеру холостого хода. Ударник 3 движется в заднее положение, сжимая некое рабочее тело в виде пневматической пружины. Клапан при этом находится в упруго-деформированном (растянутом) состоянии. В конце холостого хода сигнал от датчика 8 поступает на соленоид распределителя, тем самым подключая камеру холостого хода на слив. Падение давления в камере холостого хода приводит к уменьшению деформирующего усилия и клапан переходит в свободное (открытое) состояние. Это приводит к открытию кольцевого зазора d_0 , по которому при движении ударника в направлении удара происходит перепуск энергоносителя (рабочей жидкости) из камеры холостого хода в промежуточную камеру. При этом объемы камер изменяются синхронно, в противофазе, создавая благоприятные условия для перепуска рабочей жидкости. В следующем цикле при взводе ударника происходит слив ранее перепущенной жидкости из промежуточной камеры через обратный клапан КО в бак Б. Обратный клапан установлен в системе для предотвращения возможного всасывания рабочей жидкости из бака Б в промежуточную камеру при рабочем ходе ударника. Подача сигнала на золотник распределителя от датчика 8 осуществляется с заданной задержкой времени, тем самым изменяя величину рабочего хода ударника.

Использование отдельного распределительного устройства имеет ряд положительных следствий. Наиболее важное из них – это возможность использования полимерных уплотнительных элементов в подвижном сопряжении ударника и цилиндра. Следовательно, снижаются требования к точности размеров этих деталей, упрощается конструкция, повышается надежность работы машины. Вдобавок расширяется возможность регулирования режима работы, изменения структуры ударной мощности (энергии и частоты ударов), позволяющая оперативно приводить параметры энергетического воздействия в соответствие со свойствами обрабатываемого породного массива [22-25].

Для исследования динамики рабочего цикла гидроударной системы с промежуточной камерой построена имитационная модель в программе ITISimX. Расчетная схема модели представлена на рис. 4. Все объекты, введенные в расчетную схему, соответствуют конструктивным элементам реальной машины.

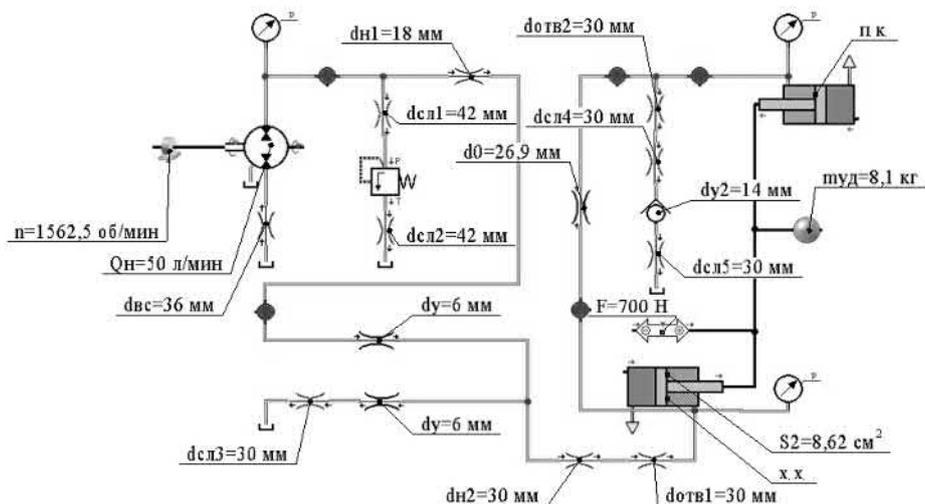


Рис. 4. Расчетная схема гидроударной системы в программе ITISimX

Имитационное исследование модели проводилось при следующих параметрах: производительности насоса $Q_n = 50$ л/мин; давлении в напорной магистрали $p_n = 12$ МПа; силы, приложенной со стороны камеры прямого хода $F = 700$ Н; рабочей площади камеры обратного хода $S_2 = 8,62$ см²; габаритного хода ударника $X_2 = 200$ мм; массе ударника $m_{уд} = 8,1$ кг.

Результаты

По результатам моделирования работы пневмоударной системы построены графики изменения удельного расхода воздуха при изменении координаты перемещения втулки для различных соотношений площадей камер рабочего и холостого хода ударника. Графики приведены на рис. 5.

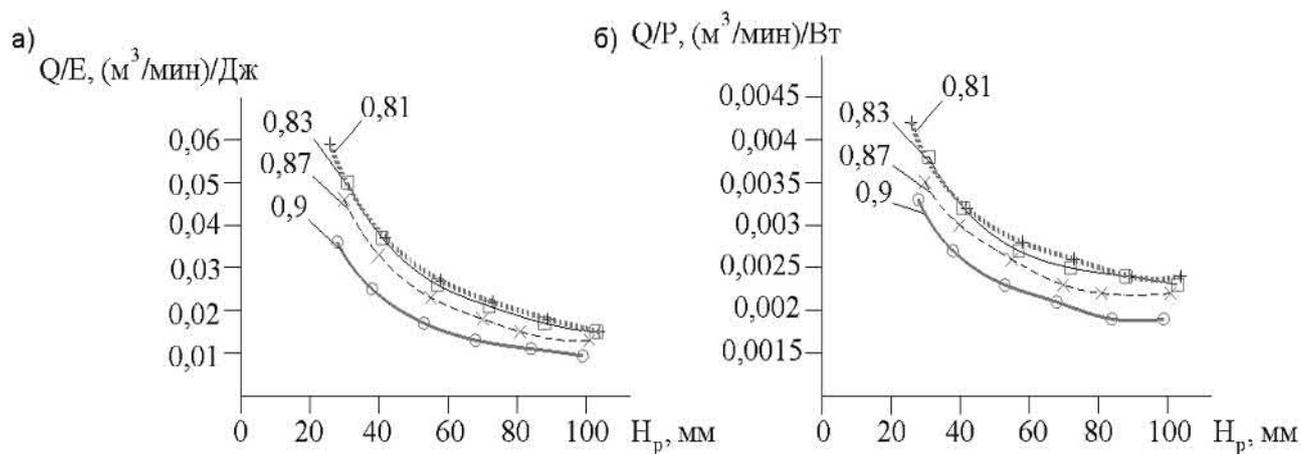


Рис. 5. Графики изменения удельного расхода воздуха при изменении координаты перемещения втулки для $S_{р.х.}/S_{х.х.}$

На рис. 6 приведены графики изменения динамических параметров в зависимости от перемещения втулки при соотношении площадей 0,9.

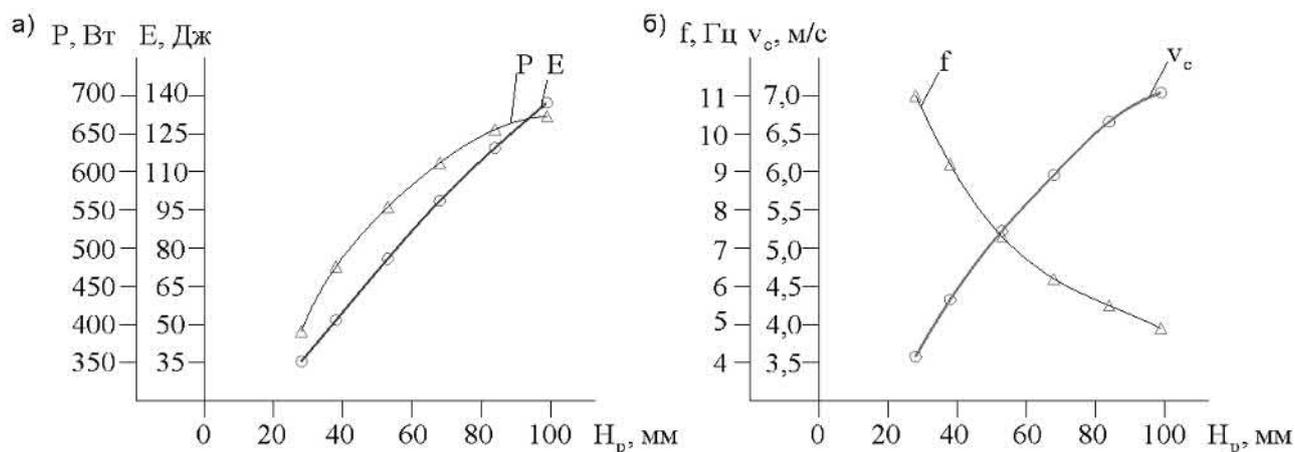


Рис. 6. Графики изменения динамических параметров в зависимости от перемещения втулки при $S_{p.x.}/S_{x.x.}=0,9$

По результатам моделирования гидроударной системы построены графики изменения давления в камере холостого хода в течение рабочего цикла $P_{xx} = f(X)$ (рис. 7а) и изменения скорости ударника (рис. 7б). Начало координат соответствует положению ударника в момент удара об наковальню.

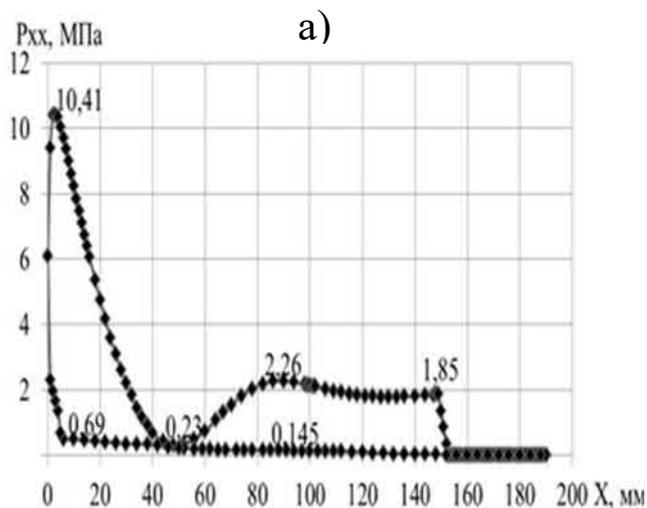


Рис. 7. Графики результатов моделирования гидроударного механизма

Обсуждение

Из графиков приведенных на рис. 5 видно, что при увеличении соотношения площадей камеры рабочего хода $S_{p.x.}$ к камере холостого хода $S_{x.x.}$ происходит снижение удельного расхода воздуха по отношению к энергии удара (рис. 5а) и

мощности (рис. 5б). Это свидетельствует о предпочтительности предложенной конструктивной схемы пневмоударного механизма перед схемой серийных пневмопробойников, где большие значения этого соотношения недостижимы.

Графики, представленные на рис. 6, показывают, что изменение величины рабочего хода ударника в конструктивно достижимом диапазоне приводит к четырехкратному изменению энергии (рис. 6а) и двукратному изменению частоты ударов (рис. 6б).

График, изображенный на рис. 7а, показывает, что в конце рабочего цикла происходит незначительный рост давления до величины 0,69 МПа, при максимальной скорости соударения 4,18 м/с (рис. 7б). Данное обстоятельство позволяет предполагать, что схема гидроударного механизма, представленная на рис. 3, позволяет решить проблему беспрепятственного слива энергоносителя из камеры холостого хода при высокой предупредительной скорости ударной части в конце рабочего хода.

Данные результаты имитационного исследования могут служить основой для проектирования виброударных машин как пневматических, так и гидравлических, предназначенных для работы в составе роботизированных комплексов.

Заключение

Проведенное имитационное моделирование виброударных систем подтверждает возможность создания машин, позволяющих реализовать адаптивные технологические процессы, где требуется изменять параметры импульсного силового воздействия в зависимости от свойств разрабатываемого породного массива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилов Б.Б. Теория и практика создания оборудования для бурения в грунте горизонтальных скважин с пневмотранспортом разрушенного материала по вращающемуся трубопроводу: Дис. докт. техн. наук (05.05.04). – Новосибирск, 2009. – 258 с.
2. Архипенко, А. П., Федулов А.И. Гидравлические ударные машины. – Новосибирск: Ин-т горного дела СО АН СССР, 1991. – 106 с.
3. 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.
4. Galdin N. S. Regression equations for basis parameters of hydraulic impact pulse systems, *Stroitel'nye i Dorozhnye Mashiny*. – 2002. – № 3.– С. 15–17.
5. Галдин Н. С. Многоцелевые гидроударные рабочие органы дорожно-строительных машин. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2005. – 223 с.
6. Lazutkin S. L., Lazutkina N. A. (2015) Perspective construction of hydraulic impact device // *Procedia Engineering*. – Vol. 129. – 2015. – С. 403–407.
7. 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.
8. 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.
9. Kamil Urbanowicz. Modern modeling of water hammer, *Polish Maritime Research* 3 (95). – Vol. 24. – 2017. – С. 68–77.

10. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Пневмопробойники. - Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 1990.
11. Гурков К.С., Муталов Ф.М., Смоляницкий Б.Н. Дальнейшее развитие применения пневмопробойников в строительстве // Механизация строительства. – 1993. – № 1
12. Быков В.И., Потемкин В.П. Оборудование для пробивки скважин в грунте // Механизация строительства. – 1990. – № 2
13. Григоращенко В.А. Прокладка металлических труб пневмопробойниками. – Новосибирск: Изд. ИГД СО АН СССР. Препринт №38, 1990.
14. Климашко В.В., Гилета В.П., Смоляницкий Б.Н. Пути повышения энергии удара машин для забивания труб при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций // Механика горных пород. Горное и строительное машиноведение. Технология горных работ: сб. науч. Тр. / ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1993.
15. Vorontsov, D.S., Petreev, A.M. Improvement of Air-Distributing System of the Pneumatic Impact Machines for Trenchless Technologies. Journal of Mining Science **38**, 481–487 (2002).
16. Петреев А.М. Кольцевой упругий клапан в пневмоударных машинах [Текст] / А.М. Петреев, А.Ю. Примычкин, Д.С. Воронцов // ФТПРПИ. – 2010 – № 4. С. 56-65.
17. Официальный сайт SimulationX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simulationx.com/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 18.03.2021).
18. Данилов Б.Б., Смоляницкий Б.Н., Плохих В.В. Обоснование применения кольцевого упругого клапана с кинематическим замыканием в гидроударных механизмах объемного типа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2018 XIV Междунар. научн. конгр., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 6 т. Т. 6. – Новосибирск: СГУГ и Т, 2018. – С. 21–28.
19. Плохих В. В., Данилов Б. Б., Чещин Д. О. Обоснование принципиальной схемы и исследование рабочего цикла гидроударного механизма объемного типа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020. XVI Междунар. научн. конгр., Национальная науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов. — Новосибирск: СГУГиТ, 2020. — Т. 2. — С. 153 – 161.
20. Плохих В. В., Чещин Д. О. Обоснование принципиальной схемы и определение конструктивных и энергетических параметров гидроударной машины // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. — Омск: СибАДИ, 2020. — С. 15 – 19.
21. Плохих В.В. Результаты экспериментального исследования процесса механического замыкания упругого клапана в гидроударной машине // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: сборник материалов III Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Омск, СибАДИ, 2019. – С. 27–31.
22. Плохих В.В., Чещин Д.О. Результаты физического моделирования рабочего процесса кольцевого упругого клапана в реверсивном гидроприводе // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М: ИПКОН РАН, 2019. – С. 184–187.
23. Плохих В.В., Чещин Д.О. Обоснование схемы ударного механизма с гидравлическим взводом // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М: ИПКОН РАН, 2019. – С. 177 – 180.
24. Плохих В.В., Данилов Б.Б., Чещин Д.О. Обоснование принципиальной схемы и анализ динамики рабочего цикла гидравлического ударного механизма объемного типа // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2020. – Т. 7. – № 2. – С. 157 – 162.

25. Данилов Б.Б., Чецин Д.О. Плохих В.В. Экспериментальное исследование процесса работы гидравлической ударной машины объемного типа // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2020. – Т. 7. – № 1. – С. 293 – 297.

© В. В. Плохих, Б. Б. Данилов, Д. О. Чецин, 2021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЦЕВОГО УПРУГОГО КЛАПАНА, УПРАВЛЯЮЩЕГО ВЫПУСКОМ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ ИЗ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ПНЕВМОУДАРНОЙ МАШИНЫ

Александр Юрьевич Примычкин

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

В работе рассмотрен один из перспективных запорно-регулирующих элементов системы воздухораспределения пневмоударных машин — кольцевой упругий клапан (КУК). Этот элемент позволяет снизить энергопотребление пневматических устройств. Рассмотрены неблагоприятные сочетания факторов, препятствующих движению клапана, необходимого для герметизации рабочей камеры. Приведена методика расчета упругого клапана, управляющего выпуском энергоносителя из камеры обратного хода пневмоударной машины, которая позволяет на этапе проектирования определить основные геометрические размеры клапанного устройства, обеспечивающего стабильный автоколебательный цикл пневмоударной машины с заданными энергетическими характеристиками.

Разработанная методика применялась при модернизации системы воздухораспределения кольцевой ударной машины (КУМ), предназначенной для погружения в грунт стержневых элементов. Испытания полученного образца в производственных условиях подтвердили прирост энергетических показателей по сравнению с ранее выпускаемыми машинами аналогичного типа.

Ключевые слова: пневматическая ударная машина, воздухораспределение, рабочий цикл, рабочая камера, кольцевой упругий клапан

DESIGNING ANNULAR ELASTIC VALVE THAT CONTROLS AIR EXHAUST FROM WORKING CHAMBER OF PNEUMATIC IMPACT MACHINE

Alexander Yu. Primyckin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54, Krasny prospect, Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, phone: 8(383)205-30-30 add.112, e-mail: 808@nn.ru

The paper considers one of the promising shut-off and control elements of the air distribution system of pneumatic impact machines — an annular elastic valve (CUV). This element allows you to reduce the energy consumption of pneumatic devices. Unfavorable combinations of factors that hinder the movement of the valve necessary for sealing the working chamber are considered. The paper presents a method for calculating the elastic valve that controls the release of energy from the return chamber of the pneumatic impact machine, which allows determining the main geometric dimensions of the valve device at the design stage, which provides a stable self-oscillating cycle of the pneumatic impact machine with the specified energy characteristics.

The developed technique was used in the modernization of the air distribution system of the ring impact machine (KUM), designed for immersion of rod elements in the ground. Tests of the resulting sample in production conditions confirmed the increase in energy performance compared to previously produced machines of a similar type..

Keywords: pneumatic impact machine, air distribution, duty cycle, working chamber, annular elastic valve

Введение

Во многих отраслях горнодобывающей промышленности и строительства широко используются пневматические машины ударного действия [1 – 4]. С их помощью выполняются многие виды работ — от закручивания гаек до бурения горных пород. С позиции механики эти машины представляют собой автоколебательную систему, в которой, как правило, ударная масса (ударник) обеспечивает в конце рабочего и обратного хода изменение направления результирующей активных сил на обратное. Технически это происходит за счет открытия им каналов для впуска или выпуска сжатого воздуха из соответствующих рабочих камер. Наряду с ударником в системе воздухораспределения используются золотниковые и клапанные устройства. Они непосредственно осуществляют открытие и закрытие каналов, питающих сжатым воздухом рабочие камеры машины, и отличаются тем, как перемещается запорный элемент относительно сопрягаемой рабочей поверхности.

Пневматические машины, в системах воздухораспределения которых используются указанные типы запорных элементов, имеют вековую историю и успешно применяются в настоящее время. Вместе с тем появляются и принципиально новые решения. Одно из перспективных направлений развития пневмоударных машин — использование в системе воздухораспределения упругого запорно-регулирующего элемента (клапана).

Внимание к кольцевому упругому клапану как элементу системы управления автоколебательным режимом работы пневмоударного привода обусловлено его конструктивными достоинствами — простотой, компактностью, высокой пропускной способностью при малом перемещении [5].

Для обеспечения расчетных энергетических параметров и экономичности пневмоударной машины необходима четкая работа воздухораспределительной системы. Моменты открытия и закрытия проходных каналов ударником определяются взаимным расположением окон и кромок на деталях ударного узла. Эти параметры закладываются при изготовлении машины и в процессе работы остаются неизменными. Основная трудность при конструировании клапанной системы воздухораспределения — назначение параметров упругих клапанов, от которых зависит их стабильное функционирование [6-8].

Цель исследования — разработка методики расчета основных геометрических размеров клапанного устройства, позволяющего обеспечить стабильный автоколебательный цикл пневмоударной машины с заданными энергетическими характеристиками.

Методы и материалы

Исходными данными для расчета являются давления в предклапанной p_1 и заклапанной камере p_2 , при которых клапан должен сработать, и модуль упругости E материала, из которого он будет изготавливаться. Давление срабатывания

назначается из условия обеспечения рабочего цикла пневмоударной машины с заданными энергетическими параметрами (энергия удара, частота, ударная мощность). Самым быстрым и наименее трудозатратным методом определения требуемых давлений p_1 и p_2 считается имитационное моделирование в программных продуктах, таких как, например, ITI SimulationX, Simulink и т.д [9, 10].

Результаты

Исходя из принципа работы упругого клапана, управляющего выпуском, наибольшую опасность представляет раннее открытия, т.е. кольцо упругого клапана может сжаться до момента открытия выхлопных окон. Это может происходить вследствие чрезмерно интенсивного падения давления в камере перед клапаном $p_{1\delta}$ (рис.1а) [11].

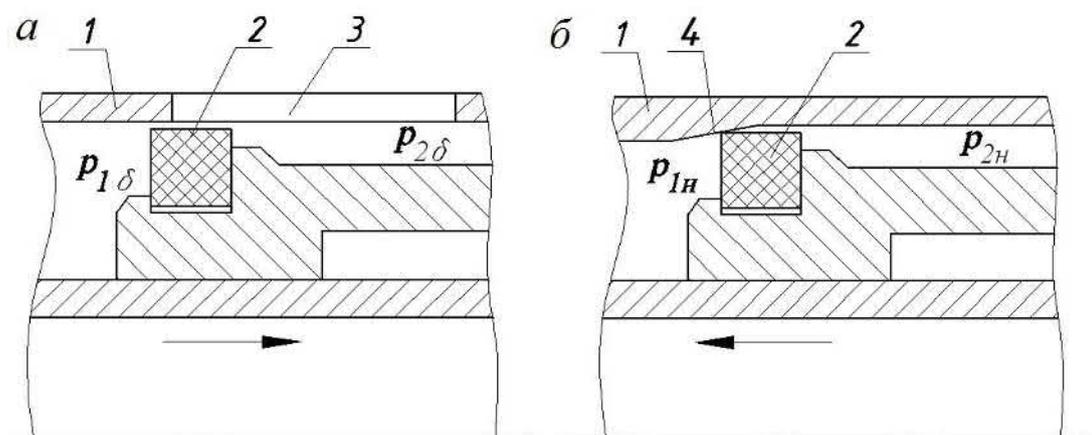


Рис. 1. Схема к определению параметров упругого клапана:

а — открытие; б — закрытие; 1 — цилиндр; 2 — кольцевой упругий клапан; 3 — выхлопное окно, 4 — конический участок.

Условие удержания клапана в закрытом состоянии до открытия выхлопных окон:

$$p_{1\delta}(1 - Z_{\delta})br + (p_{1\delta} - p_{2\delta})r\varphi_b hf > \frac{Es}{r} + p_{\delta}^*(1 + Z_{\delta})br, \quad (1)$$

где $p_{1\delta}$ — давление в камере перед клапаном; $p_{2\delta}$ — давление в камере за клапаном; ε_{δ} — максимальное растяжение клапана, f — коэффициент трения клапана о борт, b, h, r, s, Z_{δ} — высота, ширина, средний радиус, площадь поперечного сечения и геометрическая жесткость клапана в растянутом состоянии, φ_b — коэффициент высоты, E, f — модуль упругости и коэффициент трения материала об опорный борт.

С учетом того, что давление за клапаном (в выхлопной камере) близко к атмосферному $p_{2\delta} = 0$, формула (1) может быть записана в виде:

$$p_{1\delta}(1 - Z_{\delta}) + p_{\delta}\varphi_b f > 2E\varepsilon_{\delta}Z_{\delta} + 0,5kp_{1\delta}(1 + Z_{\delta}), \quad (2)$$

где k – коэффициент среднего давления [12].

Коэффициента k для выпускного клапана:

$$k = A + B \cdot e^{-C \cdot \delta}, \quad (3)$$

где A, B, C – коэффициенты [12].

$$A = 0,27 + 1,84\Delta p - 1,5\Delta p^2, \quad B = 1,14 - 1,6\Delta p + 1,3\Delta p^2, \quad C = 2,57 - 4,8\Delta p + 3,8\Delta p^2. \quad (4)$$

Условие удержания клапана:

$$Z_{\delta} < \frac{1 - 0,5k + \varphi_b f}{\frac{2E\varepsilon_{\delta}}{p_{1\delta}} + 0,5k + 1}. \quad (5)$$

В таком случае геометрическая жесткость упругого клапана в свободном состоянии будет определяться из соотношения:

$$Z_o < \frac{1 - 0,5k + \varphi_b f}{\frac{2E\varepsilon_{\delta}}{p_{1\delta}} + 0,5k + 1} \cdot \frac{1 + \varepsilon_{\delta}}{1 - \nu\varepsilon_{\delta}}. \quad (6)$$

где ν — коэффициент Пуассона для материала клапана.

Другую опасность при работе выпускного клапана представляет возможность раннего закрытия, т.е. при движении ударника вперед клапан может прижаться к внутренней поверхности цилиндра 4 и перекрыть вытеснение воздуха из камеры обратного хода, создавая “воздушную подушку” (рис.1б).

Условие удержания клапана в открытом состоянии:

$$p_{1н}(1 - Z_{н})br < \frac{Es}{r} + p_{н}^*(1 + Z_{н})br + (p_{1н} - p_{2н})r\varphi_b hf, \quad (7)$$

где $p_{1н}$ – давление в камере перед клапаном, требуемое для закрытия; $p_{2н}$ – давление за клапаном; $\varepsilon_{н}$ – предварительное растяжение клапана.

С учетом того, что давление за клапаном (в выхлопной камере) близко к атмосферному $p_{2\delta} = 0$, формула (7) может быть записана в виде:

$$p_{1н}(1 - Z_{н}) > 2E\varepsilon_{н}Z_{н} + 0,5kp_{1н}(1 + Z_{н}) + p_{1н}\varphi_b f. \quad (8)$$

Геометрическая жесткость кольца будет определяться как:

$$Z_n > \frac{1 - 0,5k - \varphi_b f}{\frac{2E\varepsilon_n}{P_{1n}} + 0,5k + 1}. \quad (9)$$

В таком случае геометрическая жесткость упругого клапана в свободном состоянии будет определяться из соотношения:

$$Z_o > \frac{1 - 0,5k - \varphi_b f}{\frac{2E\varepsilon_n}{P_{1n}} + 0,5k + 1} \cdot \frac{1 + \varepsilon_n}{1 - \nu\varepsilon_n}. \quad (10)$$

Окончательно, параметр Z_o принимается таким, чтобы он удовлетворял условиям (6) и (10). В случае, если это невозможно, или геометрическая жесткость имеет слишком малое значение, можно изменить форму клапана или добавить фаску [12].

В таком случае условия (6) и (10) будут иметь вид:

$$Z_o < \frac{1 - 0,5k\gamma_\phi + \varphi_b f}{\frac{2E\varepsilon_\delta}{P_{1\delta}} + 0,5k\gamma_\phi + 1} \cdot \frac{1 + \varepsilon_\delta}{1 - \nu\varepsilon_\delta}, \quad (11)$$

$$Z_o > \frac{1 - 0,5k\gamma_\phi - \varphi_b f}{\frac{2E\varepsilon_n}{P_{1n}} + 0,5k\gamma_\phi + 1} \cdot \frac{1 + \varepsilon_n}{1 - \nu\varepsilon_n}, \quad (12)$$

где k_ϕ – коэффициент, учитывающий влияние фаски [12].

$$\gamma_\phi = 1 - \tilde{l}_\phi (1,05 - 0,2\delta), \quad (13)$$

где \tilde{l}_ϕ – относительная длина фаски.

После окончательного выбора Z_o рассчитываются следующие конструктивные параметры клапана [11]:

- высота и ширина клапана на оправке:

$$h_n = d_n Z_o \frac{1 - \nu\varepsilon_n}{1 + \varepsilon_n}; \quad b_n = \varphi_b h_n, \quad (14)$$

- наружный диаметр оправки:

$$d_{оп} = d_n - h_n, \quad (15)$$

- внутренний диаметр цилиндра:

$$D = d_n + h_n + 2\delta, \quad (16)$$

- размеры клапана в свободном состоянии. Они необходимы для производства клапана, если он изготавливается точением, или проектирования пресс-формы, если клапан изготавливается методом термической вулканизации.

Средний диаметр клапана в свободном состоянии:

$$d_o = \frac{d_n}{1 + \varepsilon_n}. \quad (17)$$

Высота и ширина клапана в свободном состоянии:

$$h_o = d_o Z_o, \quad b_o = \varphi_b h_o. \quad (18)$$

Внутренний и наружный диаметр клапана в свободном состоянии:

$$d_{en} = d_o - h_o, \quad d_{нар} = d_o + h_o. \quad (19)$$

Для апробации разработанной методики было рассчитано клапанное устройство для кольцевой ударной машины КУМ42-1К.

Разработка модифицированного погружателя стержневых элементов диаметром до 42 мм связана с потребностью повысить эффективность проведения работ по укреплению откосов котлованов и инъектированию грунтовых оснований [13-16].

Исходные данные для расчета:

- срабатывание на открытие: $p_{1\delta} = 0,28$ МПа, $p_{2\delta} = 0$.
- срабатывание на закрытие: $p_{1н} = 0,1$ МПа, $p_{2н} = 0$.

При первоначальной компоновке клапанного устройства конструктивно были приняты: средний диаметр клапана на оправке $d_n = 109$ мм, величина клапанной щели $\delta = 2$ мм, предварительный натяг $\varepsilon_n = 0,05$, коэффициент ширины клапана $\varphi_b = 1$, в качестве материала принята резина В14 с модулем упругости $E = 8$ МПа.

Клапанное устройство, параметры которого определены по разработанной методике показаны на рис. 2а. Основными размерами являются: диаметр оправки 96 мм и диаметр цилиндра 126 мм. Этих размеров необходимо придерживаться при проектировании ударника и корпуса пневматической машины. Параметры упругого кольца в свободном состоянии представлены на рис. 2б. Эти размеры необходимы для изготовления клапана точением из листовой резины или проектирования пресс-формы, в случае если для изготовления принят метод термической вулканизации [17, 18].

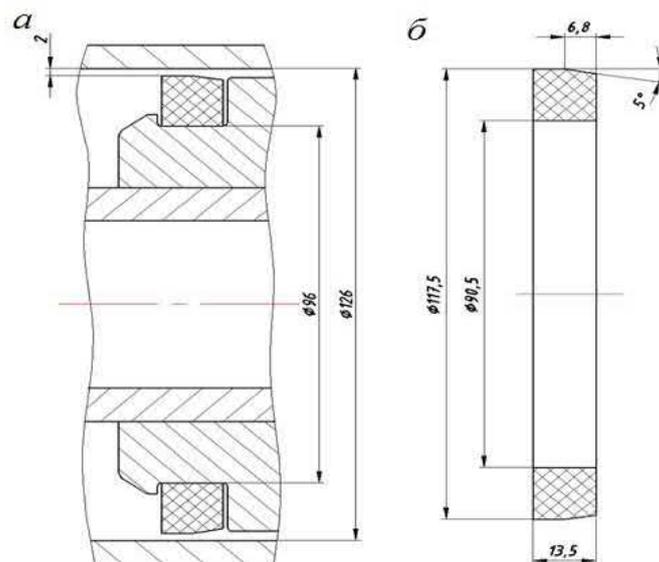


Рис. 2. Клапанное устройство кольцевой ударной машины (а) и параметры клапана в свободном состоянии (б)

Обсуждение

Результаты расчетов положены в основу при создании кольцевой ударной машины КУМ42-1К (рис. 3). Машина обеспечивает погружение стержней диаметром от 16 до 42 мм. Ее энергетические характеристики и их сравнение с параметрами ранее созданной и наиболее близкой по ударной мощности машины ПУМ-65 [19, 20] представлены в таблице 1.

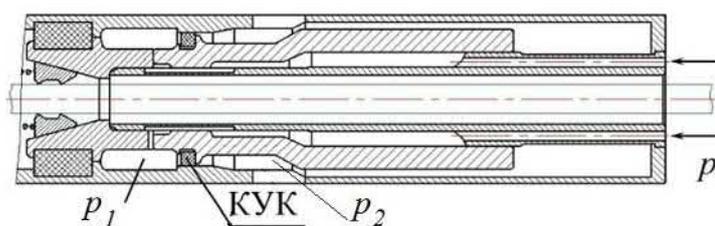


Рис. 3. Схема машины КУМ42-1К

Таблица 1

Сравнение параметров ПУМ-65 и КУМ42-1К

Параметр	ПУМ-65	КУМ42-1К	Δ , %
Ударная мощность W , кВт	1,8	1,74	-3
Частота ударов ν , Гц	9,3	10,3	+10
Удельный расход q , м ³ /(кВт·с)	0,04	0,028	-30
Масса, кг	65	50	-23

Машина КУМ42-1К прошла промышленные испытания на строительных объектах г. Новосибирска. Было забито более 2 тыс. гибких стержневых элементов диаметром 26 мм на глубину от 6 до 12 м.

Заключение

Установленные зависимости и разработанная методика расчета позволяют определять конструктивные параметры клапанного устройства с эластичным кольцевым воздухораспределительным элементом, управляющим выпуском энергоносителя из рабочей камеры пневмоударной машины в атмосферу.

Испытания кольцевой ударной машины КУМ42-1К в производственных условиях доказали, что введение кольцевого упругого клапана в систему воздухораспределения позволяет снизить энергопотребление машины до 30% при неизменных энергетических характеристиках ударного узла (энергия удара, мощность).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абраменков Э. А. Классификация основных признаков пневматических механизмов машин ударного действия // Строительство и архитектура. 1979, №8. - с.157 – 163.
2. Абраменков Э. А, Петреев А.М. Принципиальные схемы и основные признаки бесклапанных пневмоударных механизмов // Ручные пневматические машины ударного действия с пониженной вибрацией. - Новосибирск. Изд. ИГД СО АН СССР. 1974. - с. 11 – 23.
3. Репин А.А., Кокоулин Д.И., Алексеев С.Е., Карпов В.Н., Шахторин И.О. Малогабаритный пневмоударник для направленного бурения глубоких скважин в подземных условиях угольных шахт // IV Международная научно-практическая конференция «Перспективы инновационного развития угольных регионов России».- Прокопьевск 2014.
4. Есин Н.Н. Методика исследования и доводки пневматических молотков. Новосибирск. Редакционно-издательский отдел Сибирского отделения АН СССР. 1965.
5. Петреев, А.М., Воронцов Д.С., Примычкин А.Ю. Кольцевой упругий клапан в пневмоударных машинах // ФТПРПИ – 2010. №4. – с. 56 – 65.
6. Харламов Ю.П., Примычкин А.Ю. Методика расчета циркуляционной системы кольцевого погружного пневмоударника // Сборник материалов международной научной конференции «Интерэкспо Гео-Сибирь 2015». Т6. - Новосибирск. 2018. – с. 237–246.
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. Примычкин, А. Ю., Тимонин В.В., Кондратенко А.С. Определение параметров системы воздухораспределения с упругим клапаном для погружного пневмоударника // Труды научной конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук». ТIII. – Новосибирск. 2016. – с. 114 – 119.
9. Примычкин А.Ю. Моделирование работы кольцевого упругого клапана в пневмоударных машинах // ГИАБ, 2018. №10. – с.156-162
10. Примычкин А.Ю. Модель кольцевого упругого клапана как составная часть модели пневмоударной машины // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Новосибирск, 2017. Т.4.№1 с. 37-44.
11. Примычкин А.Ю., Петреев А.М. Определение конструктивных параметров кольцевого упругого клапана, управляющего впуском энергоносителя в рабочую камеру пневмоударной машины // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Новосибирск, 2018. Т.5.№2 с. 289-294.

12. Примычкин А. Ю. Особенность работы кольцевого упругого клапана с клиновидной щелью в системе воздухораспределения пневмоударных машин // Сборник материалов международной научной конференции «Интерэкспо Гео-Сибирь 2016». Т3. - Новосибирск. 2016. – с. 248 - 253.
13. Данилов Б.Б., Кондратенко А.С., Смоляницкий Б.Н., Смоленцев А.С. Совершенствование технологии проходки скважин в грунте методом продавливания // ФТПРПИ – 2017. №3. – с. 57 - 64.
14. Кондратенко А.С., Шахторин И.О. Повышение производительности бурения дегазационных скважин с дневной поверхности // ГИАБ, 2018. №48. – с.364-372.
15. Тамбовцев П.Н., Петреев А.М. Ударное нагружение твердой породы через пластичное вещество в шпуре // ФТПРПИ – 2006. №6. – с. 79-86.
16. Шахторин И.О. Выбор и обоснование параметров погружного пневмоударника малого диаметра // ГИАБ, 2018. №11. – с.145-153.
17. Потураев В. Н. Резиновые детали машин / М.: Машиностроение. 1977. – 216 с.
18. Лепетов В. А. Расчет и конструирование резиновых изделий / Л.: Химия. 1987. – 408 с.
19. Смоляницкий Б.Н., Сырямин Ю.Н., Воронцов Д.С., Сырямин П.Ю. Повышение энергоэффективности работы пневмоударной машины при погружении в грунт стержневых технологических элементов // Политранспортные системы. Новосибирск: СГУПС, 2015. – С.661-666.
20. Гурков К. С. Пневмопробойники. - Новосибирск: ИГД СО РАН, 1990. – 217 с.

© А. Ю. Примычкин, 2021

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЕГО К ОБОГАЩЕНИЮ

Виктор Иванович Ростовцев

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383) 205-30-30, доб. 167, e-mail: benevikt@misd.ru

Ранее выполненные в ИГД СО РАН и ИЯФ СО РАН минералого-технологические исследования на примере труднообогатимой свинцово-цинковой руды крупностью -3 мм позволили получить данные о повышении селективности дезинтеграции минерального сырья и улучшении раскрытия полезных минералов за счет предварительной электронно-лучевой обработки. Цель исследований: комплексное изучение и анализ особенностей изменения прочностных свойств ядерных образцов основных горных пород – известняка, роговика и гранита – в результате их радиационной модификации обработкой пучком высокоэнергетических электронов. Выявлено, что увеличение поглощенной дозы приводит к изменению деформационно-прочностных свойств: предела прочности на сжатие, модулей деформации и упругости. Если без обработки предел прочности на одноосное сжатие для известняка составляет 49.11 МПа, то при поглощенной дозе 15 кГр – 35.24 МПа. Для гранита увеличение поглощенной дозы до 10 кГр снижает предел прочности на сжатие с 68.33 до 35.08 МПа. Приводится оценка энергозатрат на разрушение и дробление с использованием отечественного оборудования ИГД СО РАН для испытаний ядер на разрушение при одноосном нагружении. Если энергии разрушения и дробления для исходного образца гранита составляют 78.6 и 7004.2 Дж/кг, то для радиационно модифицированного – 30.6 и 4708.8 Дж/кг. Установлено, что размер частицы после дробления обработанного ядра уменьшился с 10.98 до 8.76 мм. Научная новизна заключается в установлении эффекта дальнего действия при разупрочнении минерального сырья крупностью 30-50 мм, в том числе ядер гранита цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм ($D_{эф} = 43.2$ мм), в результате образующихся при торможении импульсного электронного пучка в минералах ударных волн, что может быть использовано с целью снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке и минимизации потерь полезных компонентов при последующем обогащении.

Ключевые слова: минеральное сырье, радиационная модификация, ударные волны, прочностные свойства, оценка энергозатрат на разрушение и дробление, гранулометрический состав, технологическая схема рудоподготовки

MODIFICATION OF MINERAL RAW MATERIAL BY RADIATION PRE-TREATMENT BEFORE PROCESSING: FEATURES AND PROSPECTS

Victor I. Rostovtsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Laboratory of Mineral Processing and Technology Ecology, office; +7 (383) 205 30 30, ext. 167, e-mail: benevikt@misd.ru

The earlier case-studies of rebellious lead-zinc ore with grain size of -3 mm at the Chinakal Institute of Mining and Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy

of Sciences provided data on improvement of disintegration selectivity and improved dissociation of useful minerals owing to preliminary treatment by a stream of electrons. The goal of this research is the integrated analysis of the change in the strength of core samples of some rocks, such as limestone, hornfels and granite, after their modification by radiation by a stream of high-energy electrons. It is found that the increase in the absorbed radiation dose results in the change in the strength and deformation properties: ultimate compression strength, modulus of deformation and elasticity modulus. In case of limestone, the ultimate uniaxial compression without radiation treatment is 49.11 MPa and drops to 35.24 MPa at the absorbed dose of 15 kGy. In case of granite, the absorption dose of 10 kGy decreases the ultimate compression strength from 68.33 to 35.08 MPa. The energy input in fracture and crushing is estimated on the equipment designed for uniaxial loading of cores at the Chinakal Institute of Mining. The energy input in fracture and crushing make 78.6 and 7004.2 J/kg for initial granite and 30.6 and 4708.8 J/kg for granite modified by radiation. The size of particle after crushing of treated cores reduces from 10.98 to 8.76 mm. The novelty of this study is the found effect of the range coverage in weakening of minerals with grain sizes to 30–50 mm, including cylindrical granite cores with diameters of 30 mm and lengths of 60 mm (equivalent spherical diameter is 43.2 mm) due to the shock waves generated in minerals during deceleration of electrons in the stream. This effect can be utilized to reduce the energy consumption of the pre-treatment technology and to minimize mineral losses in subsequent processing.

Keywords: mineral raw material, radiation-based modification, shock waves, strength properties, estimate of energy input in fracture and crushing, grain size composition, ore pre-treatment flowchart

Введение

На современном этапе минерально-сырьевая база России и зарубежных стран представлена бедными труднообогатимыми рудами и техногенными образованиями [1–3], доля которых постоянно возрастает. Данные типы руд характеризуются сложным вещественным составом, низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкрапленностью, вплоть до эмульсионной, и близкими физико-химическими и технологическими свойствами. Эффективная переработка таких руд возможна только на основе создания инновационных процессов комплексной и глубокой переработки с учетом последних достижений фундаментальных наук.

Следует отметить, что в настоящее время в России осуществляется переход к наилучшим доступным технологиям (НДТ), который официально стартовал в июле 2014 года с принятием Федерального закона от 21.07.2014 года № 219-ФЗ, по которому предприятия должны внедрять экономически рентабельные технологии, позволяющие минимизировать количество образующихся отходов и выбросов [4–5].

Одним из эффективных методов, позволяющих получать качественные концентраты из такого минерального сырья, является флотация. При этом важным фактором, определяющим эффективность флотационного процесса, является размер свободных зерен минеральных частиц. Увеличение крупности извлекаемых пенной флотацией частиц может повысить извлечение полезного компонента и сократить расходы на дорогостоящий процесс измельчения руды. Например, расширение диапазона крупности частиц во флотационной пульпе до

0.1 – 0.3 мм может дать экономию 30 – 50 % энергии, затрачиваемой в наиболее энергоёмком переделе обогащения – процессе измельчения [6-7].

Как указывается в [1] для процессов селективной дезинтеграции последние 25 лет в ряде стран для создания дефектов на границе срастания минералов разрабатываются энергетические методы (СВЧ, мощные наносекундные импульсы и т.д.). В этом направлении наша страна имеет приоритет, однако, до сих пор эти методы не получили промышленной реализации вследствие отсутствия достаточной инженерной проработки конструкций, адаптированных к промышленным условиям.

Среди указанных перспективным методом является воздействие потоком ускоренных электронов на минеральное сырьё [8-9]. Радиационные технологии определены мировым сообществом как потенциально прорывные в различных областях промышленного производства. В настоящее время радиационная обработка широко используется для модификации полимеров, стерилизации медицинских изделий, обеззараживания бытовых отходов, очистки стоков промышленных предприятий и дымовых газов. Достоинством воздействия потоком ускоренных электронов является наличие отечественного стандартного оборудования и комплектующих для реализации процессов обработки минерального сырья с сохранением или незначительным изменением технологических схем и оборудования обогатительных фабрик [10-11]. Цель исследований – комплексное изучение изменения прочностных свойств керновых образцов основных горных пород при их обработке пучком высокоэнергетических электронов и анализ полученных результатов для совершенствования процессов подготовки минерального сырья к обогащению. Научная новизна заключается в установлении эффекта дальнего действия при разупрочнении минерального сырья, в том числе кернов цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм, в результате образующихся при торможении импульсного электронного пучка в минералах ударных волн, что может быть использовано с целью снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке и минимизации потерь полезных компонентов при последующем обогащении.

Методы и материалы

Анализ проб минерального сырья различных месторождений показывает, что они, как правило полиминеральные и бóльшая их часть представлена породообразующими минералами и горными породами, например, такими как известняк, роговик, гранит.

Известняк – одна из самых широко распространённых осадочных горных пород. Залежи известняков составляют 19-22% от всей массы осадочных пород. Известняк является третьим по распространённости в земной коре минералом после кварца и полевого шпата. Большое количество кальцита откладывается из горячих вод в гидротермальных жилах с сульфидами, а также в эффузивных породах вместе с цеолитами, халцедоном, кварцем, баритом.

Роговики встречаются в месторождения медь-молибденовой формации, содержащей медь, молибден, золото, серебро, свинец, цинк, кобальт, висмут и ртуть (Эндыбайское, Якутия); сурьмы (Терекское, Киргизия; Сингуашань, Китай); вольфрама (Тигриное, Приморье) и других металлов и минералов.

Граниты – наиболее важные породы земной коры. Исследования гранитов представляют интерес, так как с этой горной породой связаны месторождения таких полезных элементов, как Au, Sn, W, Mo, Li, Be, Rb, Bi и др. Граниты содержат в своем составе 60-65% калиевого полевого шпата, 25-35% кварца и 5-10% слюды. Калиевый полевой шпат входит в состав многих полиметаллических руд, кварц – главная составная часть золото-, железосодержащих и других руд.

Определение физико-механических свойств горных пород осуществлялось на образцах кернов правильной цилиндрической формы в соответствии с действующими стандартами и методиками на оборудовании, прошедшем метрологическую поверку. Диаметр (d) образцов составлял порядка 30 мм; высота образцов (h) – 60 мм; отношение высоты (h) к диаметру (коэффициент формы h/d) в среднем для испытанных образцов составляло 2, что соответствует требованиям ГОСТ 21153.2-84.

Экспериментальные исследования осуществлялись с использованием комплекса оборудования ИГД СО РАН для испытаний на разрушение при одноосном нагружении с определением акустических характеристик керновых образцов. В состав комплекса входили следующие установки и оборудование:

– гидравлическая установка Института горного дела СО РАН, рассчитанная на предельную осевую нагрузку 1000 кН, с измерительной камерой, обеспечивающая следующие режимы нагружения: осевое и трехосное сжатие, растяжение и автоматическую запись в память компьютера результатов эксперимента;

– разработанный и изготовленный в ИГД СО РАН комплект оборудования с использованием сертифицированных датчиков S1802-0.05A0D4PU производства фирмы «Акустические Контрольные Системы, г. Москва» для измерения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн;

– стенд для определения деформационных и акустических характеристик при одноосном и трехосном нагружении образцов керна, позволяющий в процессе экспериментов проводить непрерывное измерение прямым методом деформации и осуществлять запись осевой нагрузки, продольной и поперечных деформаций между торцами образца и в средней его части. Для этого в состав стенда входил преобразователь линейных перемещений ЛИР – 940 – РСІ – 9pin – ГО фирмы ОАО «СКБ ИС».

Определение деформационных свойств горных пород производилось согласно требованиям [12–15].

Обработка подготовленных кернов образцов горных пород осуществлялась пучком ускоренных электронов на промышленном ускорителе ИЛУ-6 в Институте ядерной физики СО РАН в соответствии с заданными дозами при энергии электронов 2.4 МэВ.

Результаты и их обсуждение

Основные результаты исследований по изучению влияния радиационной модификации обработкой ускоренными электронами кернов горных пород на их механические и акустические свойства приведены в таблицах 1-4 и на рисунках 1-3.

Таблица 1

Результаты механического и динамического тестирования кернов известняка, роговика и гранита, обработанных потоком ускоренных электронов

Номер образца	Поглощенная доза, кГр	Размер образца, $d \times h$, мм	Механические свойства		
			Предел прочности на одноосное сжатие, σ^e , МПа	Упругие статические характеристики	
				Модуль деформации E , ГПа	Коэффициент Пуассона ν
Известняк ($\rho = 2.68 \text{ г/см}^3$)					
0	0	29.5×60.2	49.11	13.20	0.17
5	5	29.5×60.5	76.61	13.32	0.22
10	10	29.5×60.5	38.24	7.44	0.26
15	15	29.5×60.4	35.24	10.43	0.38
Роговик ($\rho = 2.66 \text{ г/см}^3$)					
0	0	29.5×60.3	123.15	29.70	0.175
5	5	29.4×60.3	115.20	22.72	0.18
10	10	29.4×60.3	78.97	9.71	0.18
15	15	29.5×60.2	135.89	28.64	0.19
Гранит ($\rho = 2.45 \text{ г/см}^3$)					
2	0	29.5×61.3	68.33	13.19	0.19
5	5	29.6×56.9	67.98	9.34	0.19
8	10	29.6×60.0	35.08	7.04	0.16
9	15	29.6×60.0	57.53	10.34	0.20

Анализ данных таблице 1 показывает, что обработка потоком ускоренных электронов кернов известняка, роговика и гранита изменяет их механические свойства. Увеличение поглощенной дозы приводит к снижению: предела прочности на сжатие, модулей деформации и упругости. Если без обработки предел прочности на сжатие для известняка составляет 49.11 МПа, то при поглощенной дозе 15 кГр — 35.24 МПа. Значения коэффициентов Пуассона при увеличении поглощенной дозы возрастают. Без обработки его значение составляет 0.17, а при поглощенной дозе 15 кГр — 0.38. Аналогичная закономерность наблюдается для роговика и гранита.

Результаты, приведенные в таблице 2 показывают, что ускоренные электроны оказывают влияние на акустические свойства известняка, роговика и гранита. Для гранита с увеличением величины поглощенной дозы до 15 кГр скорости продольных и поперечных волн сначала уменьшаются, а затем увеличиваются. Для исходного образца зерна гранита скорости продольных и попереч-

ных волн равны 3747 и 2287 м/с, для обработанного при дозе 5 кГр образца они соответственно равны 3543 и 2142 м/с. При дозе 15 кГр они равны 3905 и 2339 м/с.

Таблица 2

Результаты определения акустических свойств образцов кернов известняка, роговика и гранита, обработанных потоком ускоренных электронов

Номер образ-ца	Погло-щенная доза, кГр	Размер образца, $d \times h$, мм	Атмосферные условия			
			Скорость волн, м/с		Модуль упругости, ГПа	Кэффи-циент Пуассона
			продольных	поперечных		
Известняк ($\rho = 2.68 \text{ г/см}^3$)						
0	0	29.5×60.2	5021	2657	49.30	0.31
5	5	29.5×60.5	4605	1992	29.50	0.38
10	10	29.5×60.5	4386	1992	29.21	0.37
15	15	29.5×60.4	4485	1982	28.62	0.38
Роговик ($\rho = 2.66 \text{ г/см}^3$)						
0	0	29.5×60.3	5601.3	3030.7	63.62	0.287
5	5	29.4×60.3	5339.7	2972.7	60.62	0.277
10	10	29.4×60.3	5345.7	3012.0	61.81	0.267
15	15	29.5×60.2	5233.3	2971.3	59.52	0.260
Гранит ($\rho = 2.45 \text{ г/см}^3$)						
2	0	29.5×61.0	3747	2287	32.01	0.20
5	5	29.6×56.9	3543	2142	30.29	0.27
8	10	29.6×60.0	4054	2376	37.98	0.26
9	15	29.6×60.0	3905	2339	37.49	0.26

Из таблиц 1–2 также видно, что изменение основных деформационно-прочностных характеристик исследованных горных пород связано с радиационной модификацией их структуры под действием обработки потоком ускоренных электронов. Этот вывод следует и из анализа образцов кернов известняка и гранита после разрушения, показанных на рисунках 1 и 2. В результате разрушения образцов кернов известняка и гранита, обработанных потоком ускоренных электронов, одноосным сжатием образуется в основном большее количество частиц по сравнению с исходным образцом. Если из исходных образцов известняка и гранита образуются только 2 частицы, то из обработанных ускоренными электронами – от 5 до 10 частиц (рисунки 1 и 2).

Установленная на примере различных горных пород возможность их разупрочнения при воздействии ускоренными электронами может быть использована с целью снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке минерального сырья, содержащего в своем составе исследованные горные породы, и минимизации потерь полезных компонентов при последующем обогащении.

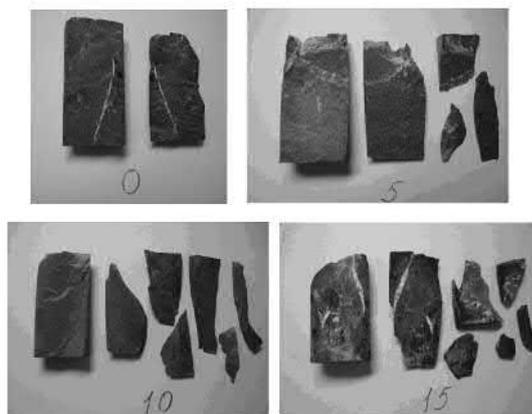


Рис. 1. Фотографии образцов керна известняка после разрушения:
0 – исходный образец, 5, 10 и 15 – образцы керна, обработанные потоком ускоренных электронов при дозах 5, 10 и 15 кГр



Рис. 2. Фотографии образцов керна гранита после разрушения:
2 – исходный образец, 5 и 9 – образцы керна, обработанные потоком ускоренных электронов при дозах 5 и 15 кГр

В работе [16] показано, что выбор оптимальной схемы рудоподготовки базируется на экспериментальном определении прямых прочностных показателей минерального сырья, косвенных показателей в сравнении с эталоном или нахождении удельных затрат электроэнергии, к которым сводятся все зарубежные методы.

Далее приводится оценка энергозатрат на разрушение и дробление на примере гранита, в том числе радиационно модифицированного пучком ускоренных электронов, с использованием отечественного оборудования ИГД СО РАН для испытаний кернов на разрушение при одноосном нагружении. Энергии разрушения и дробления определялись по экспериментально полученным диаграммам

усилие–продольная деформация. Пример такой диаграммы для исходного образца гранита приведен на рисунке 3.

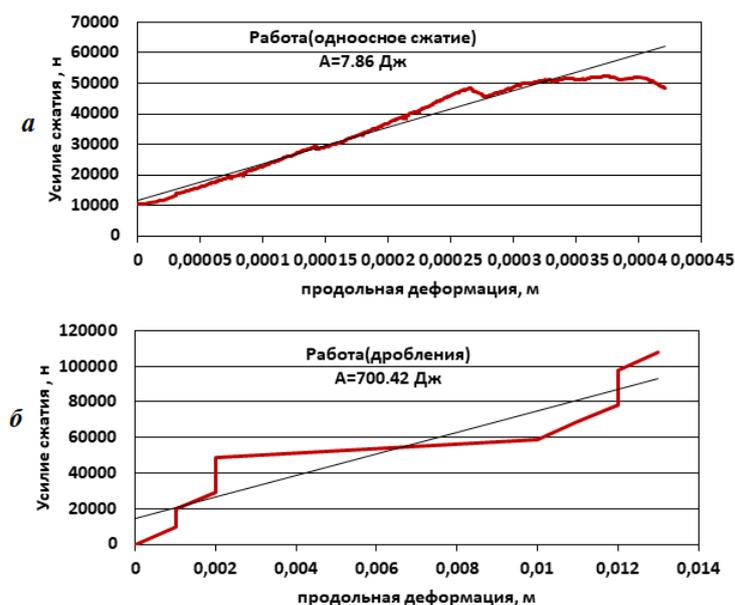


Рис. 3. Диаграммы усилие–продольная деформация для исходного образца гранита в виде зерна цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм (масса образца ~100 г):

a – при разрушении одноосным сжатием, *б* – при дроблении

Результаты исследований по влиянию радиационной модификации гранита обработкой ускоренными электронами на энергоемкость процессов его разрушения и дробления приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты исследований энергий разрушения и дробления ядер гранита, обработанных потоком ускоренных электронов

Доза, кГр	Предел прочности на сжатие, МПа	Энергия, Дж/кг		Средний размер частиц дробленного материала, мм
		Разрушения	Дробления	
0	68.33	78.6	7004.2	10.98
5	67.98	63.6	5297.4	8.96
10	35.08	30.6	4708.8	8.76
15	57.33	74.0	5297.4	11.55
20	86.29	226.2	7848.0	11.80

Расчет среднего размера дробленной частицы D_{cp} производился на основании экспериментальных данных по гранулометрическому составу дробленного материала (таблица 4) по известной формуле:

$$D_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot P_i}{100},$$

где d_i – средняя крупность дробленых частиц в i -ом классе, мм;
 P_i – содержание i -го класса, %.

Таблица 4

Гранулометрический состав дробленного материала,
 полученного при одноосном статическом сжатии обработанных
 потоком ускоренных электронов кернов гранита после их разрушения

Поглощенная доза, кГр	Гранулометрический состав дробленного материала, %				
	<2 мм	2–5 мм	5–7 мм	7–12 мм	>12мм
0	24,0	12,5	12,5	25,0	26,0
5	27,0	15,3	14,3	26,4	17,0
10	21,3	14,3	13,7	22,0	28,7
15	22,3	14,3	12,7	20,3	30,4
20	25,0	16,5	17,0	24,0	17,5

Так как разрушались керны цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм, то в расчетах использовано эквивалентное преобразование цилиндра в сферу. Учитывая равенство объемов цилиндра $V_{Ц}$ и сферы $V_{СФ}$:

$$V_{Ц} = V_{СФ} = \pi r_{Ц}^2 h_{Ц} = \frac{4}{3} \pi r_{СФ}^3 = 3.14 \cdot 15^2 \cdot 60 = 13500 \pi \text{ мм}^3,$$

находим радиус $r_{ЭСФ}$ и диаметр $D_{ЭСФ}$ эквивалентной сферы:

$$r_{ЭСФ} = \sqrt[3]{\frac{3V_{Ц}}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 13500 \pi}{4\pi}} = 21,6 \text{ мм}, \quad D_{ЭСФ} = 2 \cdot r_{ЭСФ} = 2 \cdot 21,6 = 43,2 \text{ мм}.$$

Данные таблиц 3 и 4 показывают, что использование ускоренных электронов для обработки кернов гранита позволяет не только снижать энергозатраты на их разрушение и дробление, но и изменять гранулометрический состав дробленного материала. Установленная на примере гранита возможность его разупрочнения при воздействии ускоренными электронами может быть использована с целью снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке минерального сырья, содержащего породную основу в виде гранита, известняка или других компонентов, например, кварца, хлорита, полевого шпата, роговика.

Установленные для известняка, роговика и гранита закономерности при их разрушении после воздействия потоком ускоренных электронов связаны со спецификой взаимодействия электронов с твердым веществом [17, 18]. Пучок электронов порождает точечные дефекты в минералах за короткий промежуток времени $\sim 10^{-11}$ с, в течение которого появляются вакансии и равное им число дис-

лоцированных атомов. Равновесие между ними достигается образованием постоянных кластеров или исчезновением неустойчивых повреждений диффузионным переносом. При обработке пучком электронов вносится определенный заряд, что приводит к зарядке поверхности и появлению потенциала. Во время облучения под действием электрического поля дефекты непрерывно мигрируют, объединяются и движутся в поле между дислокациями и границами раздела. Затем, достигая предельной концентрации, вакансии объединяются в каверны. Последние являются дефектами, которые становятся местами нарушения целостности материала. Этот факт подтверждает падение скорости волн в образцах известняка, роговика и гранита после обработки ускоренными электронами (таблицы 1 и 2). Кроме того, за счет воздействия ускоренных электронов в диэлектриках накапливается местный заряд с образованием электрического поля [19]. Вследствие этого облегчаются перемещения дислокаций в минералах и интенсифицируются процессы их разрушения. Каверны, электрической пробой и скопление дислокаций по границам минералов приводят к появлению микротрещин и потере механической прочности.

Особенностью радиационной модификации минерального сырья крупностью более 30 мм является возможность направленно изменять его структурно-фазовое состояние и физические свойства [20].

Научная новизна заключается в установлении эффекта дальнего действия при разупрочнении минерального сырья крупностью 30-50 мм, в том числе кернов гранита цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм ($D_{ЭСФ} = 43.2$ мм), в результате образующихся при торможении импульсного электронного пучка в минералах ударных волн.

Заключение

Проведены испытания образцов кернов радиационно модифицированных горных пород с определением механических и акустических свойств образцов кернов в атмосферных условиях в зависимости от осевого напряжения сжатия.

Установлено, что обработка потоком ускоренных электронов кернов известняка, роговика и гранита изменяет их механические и акустические свойства. Увеличение поглощенной дозы приводит к снижению: предела прочности на сжатие, модулей деформации и упругости. Если без обработки предел прочности на сжатие для известняка составляет 49.11 МПа, то при поглощенной дозе 15 кГр — 35.24 МПа. Значения коэффициентов Пуассона при увеличении поглощенной дозы возрастают. Без обработки его значение составляет 0.17, а при поглощенной дозе 15 кГр — 0.38. Аналогичная закономерность наблюдается для роговика и гранита. Для исходного образца керна гранита скорости продольных и поперечных волн равны 3747 и 2287 м/с, для обработанного при дозе 5 кГр образца они соответственно равны 3543 и 2142 м/с. При дозе 15 кГр они равны 3905 и 2339 м/с.

Изменение основных деформационно-прочностных характеристик исследованных горных пород связано с радиационной модификацией их структуры

под действием обработки потоком ускоренных электронов. Этот вывод следует и из анализа образцов кернов известняка и гранита после разрушения. Если из исходных образцов известняка и гранита образуются только 2 частицы, то из обработанных ускоренными электронами – от 5 до 10 частиц.

Показано, что оптимальная доза радиационной обработки ускоренными электронами для разупрочнения гранита и содержащего его минерального сырья равна 10 кГр. При такой обработке предел прочности на сжатие снижается с 68.33 до 35.08 МПа. Приводится оценка энергозатрат на разрушение и дробление на примере гранита с использованием отечественного оборудования ИГД СО РАН для испытаний кернов на разрушение при одноосном нагружении. Если энергии разрушения и дробления для исходного образца гранита составляют 78.6 и 7004.2 Дж/кг, то для радиационно модифицированного – 30.6 и 4708.8 Дж/кг. Установлено, что средний размер дробленной частицы после дробления радиационно модифицированного зерна гранита уменьшился с 10.98 до 8.76 мм.

С учетом полученных результатов разработана и рекомендована технологическая схема рудоподготовки и обогащения руд с использованием радиационной модификации их свойств путем обработки импульсным пучком электронов с энергией 2.4 МэВ и частотой 25 Гц, позволяющая снизить расход электроэнергии при рудоподготовке и минимизировать потери полезных компонентов при последующем обогащении. Достоинством новой технологии является наличие отечественного стандартного оборудования и комплектующих для ее реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чантурия В. А. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава / Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2020). – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. – С. 3–4.
2. Рыжова Л. П., Салей А. У. Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы рудных месторождений в России и за рубежом / Вестник науки и образования. — 2018. — Т. 1. — № 5(41). — С. 46–49.
3. Ежов А. И. Оценка техногенного сырья в Российской Федерации (твердые полезные ископаемые) / Горные науки и технологии. — 2016. — № 4. — С. 62–72.
4. Федеральный закон от 21.07.2014 г. № 219-ФЗ (ред. от 26.07.2019 г.) «О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды" и отдельные законодательные акты Российской Федерации».
5. Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р О стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 г.
6. Tabosa E., Runge K., and Duffy K-A. Strategies for increasing coarse particle flotation in conventional flotation cells / Proc. The 6th International Flotation Conference. Cape Town, South Africa, 2013.
7. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П. Взаимодействие минеральной частицы со свободным пузырьком воздуха в жидкости / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 6. С. 125–135.
8. Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Коваленко К. А. Развитие экологически безопасных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья / Горный журнал. – 2020. – № 5. С. 39-46.

9. Чантурия В. А., Бунин И. Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 3. С. 107–128.
10. Куксанов Н. К., Салимов Р. А., Брызгин А. А. Ускорители электронов для промышленного применения, разработанные в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН / Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – № 6. – С. 672–685.
11. Безуглов В. В., Брызгин А. А., Власов А. Ю., Воронин Л. А., Коробейников М.В. и др. Радиационные технологии и оборудование / Вопросы атомной науки и техники. Техническая физика и автоматизация. – М.: АО «НИИТФА», 2018. – Вып. 83. – С. 4–21.
12. ГОСТ 28985–91 Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.
13. ГОСТ 21153.2–84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.
14. ГОСТ 21153.7–75 Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.
15. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. – 712 с.
16. Газалеева Г. И., Братыгин Е. В., Курков А. В., Рогожин А. А. К выбору критериев оптимальных схем рудоподготовки / Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья. Материалы Международной конференции «Плаксинские чтения-2016», г. Санкт-Петербург, 26–30 сентября 2016 г. – Москва: АО «Издательский дом «Руда и Металлы», 2016. – С. 14–17.
17. Vochkarev G. R., Chanturija V. A., Vigdergaus V. E., Lunin V. D., Veigelt Yu. P., Rostovtsev V. I., Voronin A. P., Auslender V. L., and Polyakov V. A. Prospects of electron accelerators used for realizing effective low-cost technologies of mineral processing / Proceedinds of the XX International Mineral Processing Congress: 21-26 September 1997, Aachen, Germany, Clausthal-Zellerfeld, GDMB, 1997, Vol. 1. – P. 231 – 243.
18. Брызгин А. А., Коробейников М. В., Кондратьев С. А., Ростовцев В. И. Эффекты дальнего действия при взаимодействии электронного пучка с кристаллическими веществами // Труды XXIX Международной конференции «Радиационная физика твердого тела». Севастополь: Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий. – 2019. – С. 55–64.
19. Чантурия В. А., Маляров П. В. Обзор мировых достижений и перспективы развития техники и технологии дезинтеграции минерального сырья при обогащении полезных ископаемых / Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Материалы Международного совещания «Плаксинские чтения-2012», г. Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. – С. 3–10.
20. Углов В.В. Радиационные процессы и явления в твердых телах. – Минск, Высш. шк., 2016. – 188 с.

© В. И. Ростовцев, 2021

К РАЗРАБОТКЕ СТЕНДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Евгений Павлович Русин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник группы прикладной геомеханики, тел. (383) 205-30-30, доп. 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

Статья посвящена созданию оригинального лабораторного стенда для моделирования элементов систем переработки сыпучих материалов. В основе стенда – модифицированная абразивоструйная установка. В рассматриваемой версии стенда сменный модуль в виде плоского криволинейного канала имитирует изгиб пневмотранспортного трубопровода. Стенд позволит изучать эрозионный износ таких изгибов.

Ключевые слова: пневмотранспорт, трубопровод, колено, эрозионный износ, лабораторный стенд

DEVELOPMENT OF A TEST BENCH FOR SIMULATION OF ELEMENTS OF GRANULAR MATERIAL PROCESSING SYSTEMS

Evgeny P. Rusin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, PhD, Senior Researcher, Applied Geomechanics Group, phone: (383) 205-30-30, ext. 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

The paper deals with the development of an original laboratory test bench for modeling elements of granular material processing systems. The core of the test bench is a modified abrasive blasting machine. In this version of the test bench, a changeable module in the form of a flat curved channel imitates an elbow of a pneumatic conveying system. The test bench will allow studying the erosive wear of such elbows.

Keywords: pneumatic transport, pipeline, elbow, erosive wear, test bench

Введение

Термины «зернистый материал» и «зернистая среда» определяют твердый материал в зернистом состоянии, то есть дисперсную систему, состоящую из твердых частиц произвольной формы, находящихся в контакте. В зависимости от наличия и величины сцепления между частицами, зернистый материал может быть либо связным, либо несвязным (свободно текучим) [1]. Степень связности или несвязности продукта в значительной мере определяет подходы к его переработке, применяемое оборудование, технологические режимы. В частности, несвязные среды могут перемещаться таким экономичным видом транспорта как трубопроводный, связные требуют использования механических движителей, таких как шнековые, ленточные конвейеры и т.п. В связи с этим обстоятельством

при решении технических задач, невозможно охватить все многообразие зернистых материалов. Поэтому, рассматривая вопросы их переработки, следует уточнить, о каком именно классе веществ идет речь. В данном исследовании будем рассматривать свободно текущие зернистые материалы, которые обычно называют сыпучими.

Сыпучие материалы составляют существенную долю материалов, перерабатываемых различными отраслями промышленности. Переработка неизбежно сопряжена с транспортом, при этом 80% всего диапазона транспортируемых продуктов – это сыпучие материалы. Значительная их часть перемещается пневмотранспортом, объемы применения которого в мире в последнее время увеличиваются на 6.4% ежегодно благодаря растущему спросу на современные и энергоэффективные системы пневматической транспортировки [2]. Обусловлено это их преимуществами перед другими видами транспортного оборудования [3]:

- 1) возможность перемещать материал в горизонтальном, наклонном и вертикальном направлениях;
- 2) удобство монтажа в стесненных условиях, так как материал перемещается по трубопроводу небольшого диаметра, который можно проложить с учетом местных условий, например, в траншее, на столбах и т. п.;
- 3) возможность совмещения некоторых технологических функций с транспортированием;
- 4) высокая степень автоматизации процесса транспортирования и распределения материала по бункерам и легкость управления этими процессами;
- 5) возможность подачи материала одновременно из нескольких пунктов погрузки к нескольким пунктам выгрузки;
- 6) широкие диапазоны производительностей и расстояний транспортирования; в отдельных случаях производительность пневматических транспортных установок достигает до 300 т/ч, а дальность транспортирования до 2 км;
- 7) сравнительно невысокие капитальные затраты на оборудование и сооружение установок;
- 8) хорошие санитарно-гигиенические условия труда обслуживающего персонала, защищенность окружающей среды;
- 9) отсутствие потерь груза;
- 10) высокая надежность.

В горном деле основное применение пневмотранспорт находит в закладочных комплексах, предназначенных для закладки породой и иными закладочными материалами выработанного пространства на шахтах и рудниках (как действующих, так и заброшенных) в целях управления горным давлением и предотвращения просадок дневной поверхности [4-15].

Доля пневматической закладки в общем объеме закладочных работ в значительной мере зависит от истории и уровня развития техники горного дела в конкретном регионе. В частности, благодаря высокому уровню механизации и автоматизации подземных горных работ, последние 30 лет пневматическая закладка доминировала в угольной промышленности Германии [10]. В то же время, в китайских угольных шахтах преобладает гидравлический вариант этой технологии.

Поскольку пневмозакладка преимуществ по несущей способности формируемого закладочного массива не даёт, то в Китае ее применяют весьма редко и только в тех случаях, когда водные ресурсы недостаточны или дополнительное обводнение нежелательно [12].

В России в 1990-е годы пневматическая закладка применялась весьма интенсивно, в частности, на предприятиях Минуглепрома СССР [14]. В современной России она используется наряду с гидравлической [5].

Практикой подтверждена эффективность применения пневмотранспорта также для перемещения угля, концентратов руд, горно-химического сырья, глинозема, ВВ, зол ТЭЦ, формовочных смесей и др. [4-8, 16].

Специфика пневмотранспортных систем такова, что их взаимодействующие с перемещаемыми продуктами узлы и детали (трубопроводы и их изгибы, фитинги, отклоняющие устройства и др.) подвергаются интенсивному эрозионному износу. Опыт показывает, что закладочный трубопровод из стали Ст. 3 с толщиной стенки 8 мм полностью изнашивается при пропуске 10-12 тыс. тонн породы, поэтому ежегодная потребность в трубах из малоуглеродистой стали для пневмозакладки составляет десятки километров [14].

Наиболее быстро изнашивающимися частями пневмотранспортных трубопроводов являются их изгибы (колена) [3, 15, 16, 17]. При высокой абразивности перемещаемого продукта эти элементы могут приходить в негодность в течение всего лишь нескольких часов [16], поэтому повышение их долговечности является весьма насущной задачей. Исследования в этой области ведутся достаточно давно, экспериментальным и численно-экспериментальным исследованиям, направленным на снижение/предотвращение износа компонентов пневмотранспортных систем, посвящены работы [16-25]. Однако, универсального и эффективного решения обсуждаемой проблемы до настоящего времени не предложено и она продолжает оставаться актуальной. В основе ее решения должно быть изучение механики взаимодействия частиц, транспортируемых потоком воздуха, с указанными элементами.

Для проведения такого исследования и выявления принципиальных аспектов и закономерностей процесса была поставлена задача разработки и изготовления лабораторного стенда для физического моделирования такого взаимодействия.

Модель элемента пневмотранспортной системы

В разрабатываемом стенде в качестве исследуемого элемента используется модель колена трубопровода (рис. 1). Модель представляет собой пластину 1 с фигурным вырезом (каналом) 2, образующим изгиб трубопровода. Для удобства наблюдения за процессом пневмотранспортирования частиц и сравнения экспериментальных результатов с результатами численного моделирования в плоской постановке канал 2 выполнен прямоугольного сечения. Лицевая 3 и задняя (на иллюстрации не видна) стенки модели выполнены из прозрачного стекла. Канал 2 со стороны задней стенки закрыт светорассеивающим материалом для обеспе-

чения в случае необходимости равномерной подсветки рабочего пространства. Для визуализации следов взаимодействия транспортируемых частиц с боковыми поверхностями канала 2 они футерованы глянцевой непрозрачной пленкой. Сыпучий материал подаётся в модель по подающему патрубку 4 и выпускается по разгрузочному трубопроводу 5.

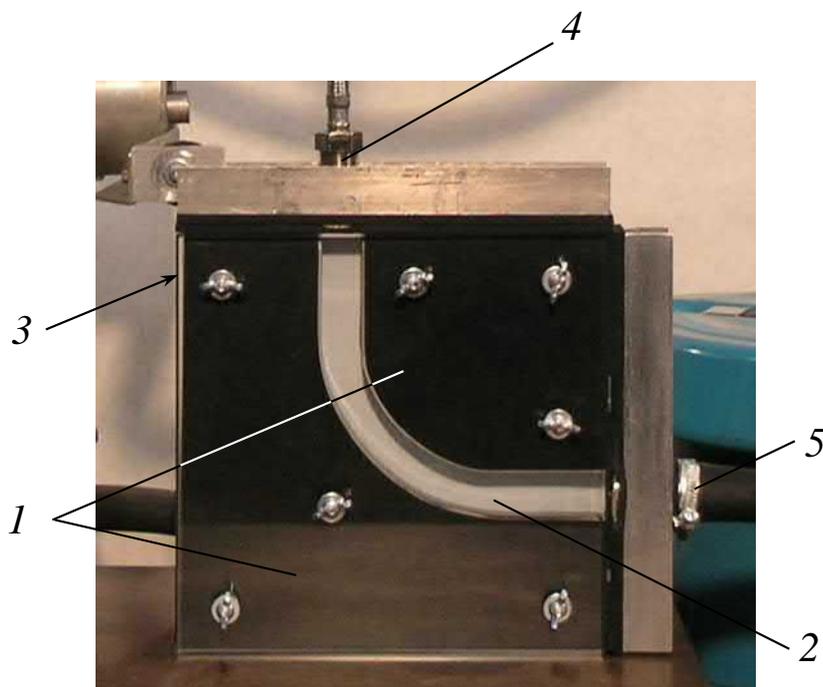


Рис. 1. Модель колена пневмотранспортного трубопровода.
Пояснения в тексте

В качестве модельного сыпучего материала в стенде предполагается использовать сухой песок фракции 0.5 мм. Для обеспечения беспрепятственного прохода частиц по каналу 2 и надежной фотофиксации картин их перемещения размеры его поперечного сечения выбраны как 16 (глубина) x 25 (ширина) мм. Данная модель в стенде может быть заменена узлом, моделирующим какой-либо другой исследуемый элемент. Возможно использование в стенде иных сыпучих материалов (рудной крошки, стальной дроби и др.).

Компоновка стенда

В [24, 25] сделано обобщение о том, что установки для исследования пневмотранспортных систем традиционно включают пять основных узлов: узел подачи сжатого воздуха, бункер-накопитель, податчик сыпучего материала, трубопровод, узел разгрузки материала. Работы [17, 21-24] посвящены решению задач близких к теме настоящего исследования, состав используемых в них исследовательских стендов примерно одинаков. Примером такого стенда может служить

испытательная установка, использованная авторами [24] для изучения износа изгибов пневмотранспортных трубопроводов.

Поставленная в настоящем исследовании задача предполагает уход от крупногабаритных компонентов и максимальное использование элементов имеющейся инфраструктуры и лабораторного оснащения. Поэтому состав разрабатываемого стенда (рис. 2) отличен от состава таковых, использованных авторами [21-24]. В целях упрощения конструкции лабораторной установки принят модульный принцип её построения. А именно, для приготовления воздушно-песчаной смеси использовано готовое комплексное решение – установка абразивоструйная Zitrek И-М-30 [26] (на рис. 2 поз. 1), характеристики которой приведены в табл. 1. Установка имеет весьма широкий диапазон регулирования подачи воздушно-песчаной смеси и включает бункер-накопитель 2, узел приема сыпучего материала 3, дозатор 4 с регулировочной втулкой 5, смеситель 6, в котором формируется песчано-воздушная струя, рукав 7 подвода сыпучего материала к смесителю 6, рукав 8 подвода воздуха к смесителю 6, кран 9 для включения и выключения подачи смеси. Из смесителя 6 смесь поступает в модель 10 колена трубопровода (см. рис. 1 и описание выше), а далее в приемный бункер 11 с фильтром (фильтр на рисунке не показан) для подавления пыли. Сжатый воздух подается в стенд по магистральному рукаву 12 от стационарной системы, включающей компрессор, ресивер и другие необходимые элементы (на иллюстрации не показаны). Для фотофиксации изучаемого процесса используются стандартные средства фотосъемки: цифровая фотокамера, осветительная аппаратура и др.

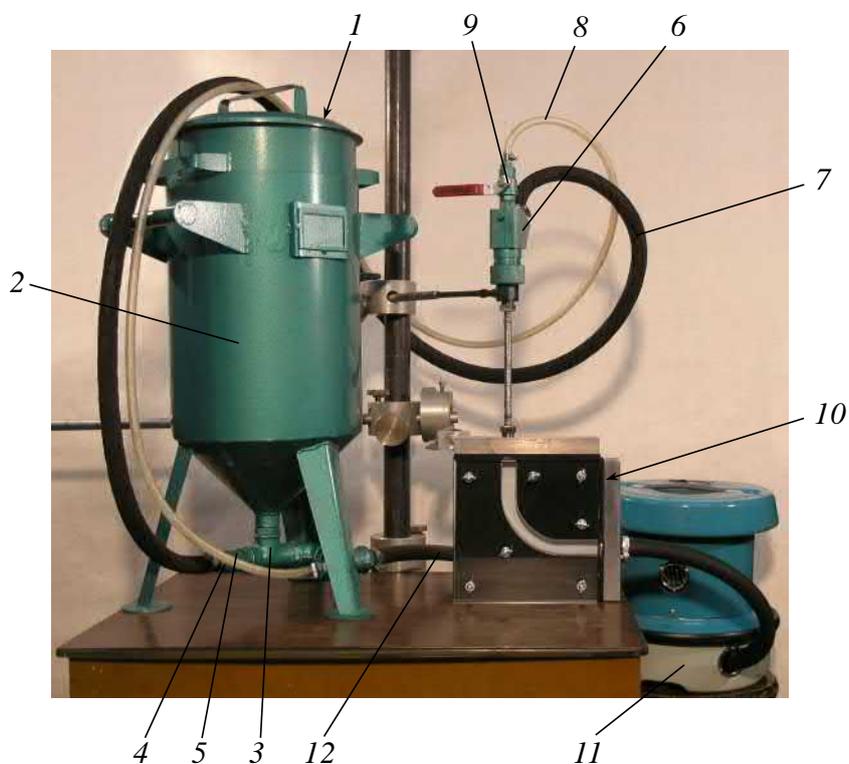


Рис. 2. Стенд для моделирования элементов систем переработки зернистых материалов

Предварительные испытания показали работоспособность отдельных компонентов стенда. Экспериментальные исследования эрозионного износа изгиба пневмотранспортного трубопровода и средств защиты от эрозионного износа проведены 2020 г. и будут являться предметом отдельной публикации.

Таблица 1

Основные технические характеристики установки Zitrek И-М-30

Наименование параметра	Норма
1. Габаритные размеры, мм	850x485
2. Масса, кг	25
3. Объем ёмкости, л	30
4. Рабочее давление, кгс/см ²	3-6
5. Расход сжатого воздуха, м ³ /мин.	0,2-1,2
6. Производительность м ² /час	0,5-3
7. Абразивный материал	без ограничения

Предварительные испытания показали работоспособность отдельных компонентов стенда. Экспериментальные исследования модели изгиба трубопровода запланированы на 2020 г. и будут являться предметом отдельной публикации.

Заключение

Таким образом, с учетом опыта создания стендов для экспериментальных исследований пневмотранспортных систем разработан и изготовлен стенд для моделирования элементов таких систем. Стенд построен по модульному принципу, в его основе – модифицированная абразивоструйная установка. В рассматриваемой версии стенда встроен сменный модуль в виде плоского криволинейного канала. Модуль имитирует изгиб пневмотранспортного трубопровода и позволяет изучать эрозионный износ таких изгибов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта НИР FWNZ-2021-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Першина С.В., Катыльмов А.В., Однолько В.Г., Першин В.Ф. Весовое дозирование зернистых материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 260 с.
2. Markets and Markets Research Private Ltd. Pneumatic Conveying Systems Market - Global Forecast 2022. – 2017. – [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/pneumatic-conveying-systems-market-7630455.html> (Дата обращения: 10.12.2019).
3. Каримов И. Гидравлический и пневматический транспорт. – [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.detalmach.ru/lect31.htm> (Дата обращения: 10.12.2019).
4. Смолдырев А.Е. Гидравлический и пневматический транспорт в металлургии и горном деле. – М.: Металлургия, 1967. – 357 с.

5. Горная энциклопедия. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.mining-enc.ru> (Дата обращения: 10.12.2019).
6. Dyni, R.C. An instrumented pneumatic backfilling system. – Bureau of Mines, United States Department of the Interior. – Report of investigations 9485. – 1993. – 14 p.
7. Dyni, R.C. and Burnett, M. Speedy backfilling for old mines // *Civil Engineering*. – 1993. – Vol. 63. – No. 9. – Pp. 56-58.
8. Burnett, J.M, Burnett, M., Ziemkiewicz, P., Black, D.C. Pneumatic backfilling of coal combustion residues in underground mines. – Hynes, T.P., Blanchette, M.C. [Eds.] *Proceedings of Sudbury`95: Mining and the Environment, Sudbury (Canada), 23 May - 1 June 1995*. – 1995. – Pp. 1211-1220.
9. Chugh, Y. P., De, I., & Powell, E.. A model study for blind pneumatic backfilling of fly ash in abandoned underground mines // *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. – 2005. – 19(4), 295–311. DOI: 10.1080/13895260500157954
10. Junker, M., Witthaus, H. Progress in the research and application of coal mining with stowing // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2013. – 23(1), 7–12. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.01.002.
11. Gupta, A.K., Paul, B. A review on utilisation of coal mine overburden dump waste as underground mine filling material: a sustainable approach of mining // *Int. J. Mining and Mineral Engineering*, Vol. 6, No. 2, 2015. – Pp. 172-186. DOI: 10.1504/IJMME.2015.070380.
12. Chen, S., Yin, D., Cao, F., Liu, Y., Ren, K. An overview of integrated surface subsidence-reducing technology in mining areas of China // *Natural Hazards*. – 2015. – 81(2), 1129–1145. DOI:10.1007/s11069-015-2123-x.
13. Valgma, I. et al. Backfilling technologies for Estonian oil shale mines. – *Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry, 30 June – 3 July 2013, Milos island, Greece*. – Pp. 374-378.
14. Куликов Н.В., Шумихин Е.В. Применение труб из нетрадиционных материалов в гидро- и пневмозакладочных трубопроводах // *Горный журнал*. – 1991. – № 10. – С. 59-60.
15. Битимбаев М.Ж., Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н. Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых. – Алматы, Казахстан: Ассоциация высших учебных заведений РК. – 2012. – 624 с.
16. Mills D., Jones, M.G., Agarwal, V.K. *Handbook of Pneumatic Conveying Engineering*. – New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. – 720 p.
17. Kesana et al. Ultrasonic measurement of multiphase flow erosion patterns in a standard elbow // *J Energy Res Technol*, 2013. – 135(3):32905. <https://doi.org/10.1115/1.4023331/> .
18. Mills, D., Mason, J.S. Particle size effects in bend erosion // *Wear*, 1977. – 44(2):311–328. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90147-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90147-8) .
19. Weinberger, C.B., Shu, M.T. Helical gas-solids flow II. Effect of bend radius and solids flow rate on transition velocity // *Powder Technol.* – 1986. - 48(1):19–22. DOI: 10.1016/0032-5910(86)80060-2.
20. Mekhail TA, Aissa WA, Hassanein SA, Hamdy O (2011) CFD simulation of dilute gas–solid flow in 90° square bend // *Energy Power Eng* 3(3):246–252. <https://doi.org/10.4236/epe.2011.33031>.
21. Suhane, A., Agarwal, V.K. Effect of bend geometry on erosion and product degradation in pneumatic conveying pipeline systems // *Int J Eng Res Appl*. – 2012. – 2(4):129–136.
22. Hongjun Zhu, Shuai Li. Numerical analysis of mitigating elbow erosion with a rib // *Powder Technology* 330 (2018) 445–460. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.046> .
23. Jun Yao, Benzhaoh Zhang, Jianren Fan. An experimental investigation of a new method for protecting bends from erosion in gas-particle flows // *Wear* 240 _2000. 215–222
24. Verma, R., Agarwal, V.K., Pandey, R.K., Gupta, P. Erosive wear reduction for safe and reliable pneumatic conveying systems: review and future directions // *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*. – Vol. 7. – No. 3. –2018. – Pp. 193-214. – DOI 10.1007/s41872-018-0055-7.

25. Burdine, N. Design of a pneumatic conveying test loop for laboratory testing. – USA, TN, Chattanooga: University of Tennessee at Chattanooga, 2018. – 83 p.
26. Установка абразивоструйная эжекторного типа Zitrek И-М-30. Паспорт. – Великие Луки: ООО ПневмоСтройТехника [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.vlpst.ru> (Дата обращения: 10.12.2019).

REFERENCES

1. Pershina, S.V., Katalymov, A.V., Odnolko, V.G., Pershin, V.F. (2009) Weight dosing of granular materials. [Vesovoe dozirovanie zernistykh materialov]. Moscow: Mashinostroenie. – 260 p. [In Russian].
2. Markets and Markets Research Private Ltd. (2019, December 10) Pneumatic Conveying Systems Market - Global Forecast 2022. – Retrieved from <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/pneumatic-conveying-systems-market-7630455.html>
3. Karimov, I. (2019, December 10) Hydraulic and pneumatic transport. [Gidravlicheskiy i pnevmaticheskij transport]. Retrieved from <http://www.detalmach.ru/lect31.htm> . [In Russian].
4. Smoldyrev, A.E. (1967) Hydraulic and pneumatic transport in metallurgy and mining. [Gidravlicheskiy i pnevmaticheskij transport v metallurgii i gornom dele]. M.: Metallurgy, [Metallurgiya], 357 p. [In Russian].
5. Mining encyclopedia. (2019, December 10). [Gornaya enciklopediya]. Retrieved from <http://www.mining-enc.ru>. [In Russian].
6. Dyni, R.C. (1993) An instrumented pneumatic backfilling system. Bureau of Mines, United States Department of the Interior. Report of investigations 9485, 14 p.
7. Dyni, R.C. and Burnett, M. (1993) Speedy backfilling for old mines. Civil Engineering, 63(9), 56-58.
8. Burnett, J.M, Burnett, M., Ziemkiewicz, P., Black, D.C. (1995) Pneumatic backfilling of coal combustion residues in underground mines. Hynes, T.P., Blanchette, M.C., eds. Proceedings of Sudbury`95: Mining and the Environment, Sudbury (Canada), 23 May - 1 June 1995, 1211-1220.
9. Chugh, Y. P., De, I., & Powell, E. (2005) A model study for blind pneumatic backfilling of fly ash in abandoned underground mines. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 19(4), 295–311. DOI: 10.1080/13895260500157954
10. Junker, M., Witthaus, H. (2013) Progress in the research and application of coal mining with stowing. International Journal of Mining Science and Technology, 23(1), 7–12. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.01.002.
11. Gupta, A.K., Paul, B. (2015) A review on utilisation of coal mine overburden dump waste as underground mine filling material: a sustainable approach of mining. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 6(2), 172-186. DOI: 10.1504/IJMME.2015.070380.
12. Chen, S., Yin, D., Cao, F., Liu, Y., Ren, K. (2015) An overview of integrated surface subsidence-reducing technology in mining areas of China. Natural Hazards, 81(2), 1129–1145. DOI:10.1007/s11069-015-2123-x.
13. Valgma, I. et al. (2013) Backfilling technologies for Estonian oil shale mines. – Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry, 30 June – 3 July 2013, Milos island, Greece, 374-378.
14. Kulikov, N.V., Shumikhin, E.V. (1991) Application of pipes made of unconventional materials in hydraulic and pneumatic backfilling pipelines [Primenenie trub iz netraditsionnykh materialov v gidro- i pnevmozakladochnykh truboprovodakh]. Mining journal [Gornyj zhurnal], No. 10, 59-60. [In Russian].
15. Bitimbaev, M.Zh., Krupnik, L.A., Shaposhnik, Yu.N. (2012) Theory and practice of backfilling operations in the development of mineral deposits. [Teoriya i praktika zakladochnykh rabot pri razrabotke mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh]. Almaty, Kazakhstan: Association of Higher Educational Institutions of the Republic of Kazakhstan [Assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedenij RK], 624 p.

16. Mills, D., Jones, M.G., Agarwal, V.K. (2004) Handbook of Pneumatic Conveying Engineering. New York: Marcel Dekker, Inc., 720 p.
17. Kesana et al. (2013) Ultrasonic measurement of multiphase flow erosion patterns in a standard elbow. Journal of Energy Resource Technology, 135(3):32905. <https://doi.org/10.1115/1.4023331/>.
18. Mills, D., Mason, J.S. (1977) Particle size effects in bend erosion. Wear, 44(2):311–328. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90147-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90147-8).
19. Weinberger, C.B., Shu, M.T. (1986) Helical gas-solids flow II. Effect of bend radius and solids flow rate on transition velocity. Powder Technology, 48(1):19–22. DOI: 10.1016/0032-5910(86)80060-2.
20. Mekhail, T.A., Aissa W.A., Hassanein, S.A, Hamdy, O. (2011) CFD simulation of dilute gas–solid flow in 90° square bend. Energy Power Engineering, 3(3):246–252. <https://doi.org/10.4236/epe.2011.33031>.
21. Suhane, A., Agarwal, V.K. (2012) Effect of bend geometry on erosion and product degradation in pneumatic conveying pipeline systems. International Journal of Engineering Research and Applications, 2(4):129–136.
22. Zhu, H., Li, S. (2018) Numerical analysis of mitigating elbow erosion with a rib. Powder Technology, 330, 445–460. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.046>.
23. Yao, J., Zhang, B., Fan, J. (2000) An experimental investigation of a new method for protecting bends from erosion in gas-particle flows. Wear, 240, 215–222.
24. Verma, R., Agarwal, V.K., Pandey, R.K., Gupta, P. (2018) Erosive wear reduction for safe and reliable pneumatic conveying systems: review and future directions. Life Cycle Reliability and Safety Engineering, 7(3), 193-214. – DOI 10.1007/s41872-018-0055-7.
25. Burdine, N. (2018) Design of a pneumatic conveying test loop for laboratory testing. USA, TN, Chattanooga: University of Tennessee at Chattanooga, 83 p.
26. PnevmoStroyTechnika, LLC. (2019, December 12) Abrasive blasting unit of the ejector type Zitrek I-M-30. Passport. [Ustanovka abrazivostrujnaya ezhektornogo tipa Zitrek I-M-30. Passport]. – Velikiye Luki: PnevmoStroyTechnika, LLC. Retrieved from: <http://www.vlpst.ru>.

© E. П. Русин, 2021

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ШАХТНЫХ ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Евгений Юрьевич Русский

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник, e-mail: geomining@mail.ru

В статье рассматривается узел крепления рабочей лопадки неповоротнолопастных шахтных осевых вентиляторов. При увеличении окружных скоростей вращения (которое приводит к увеличению центробежных сил) растут нагрузки на лопадку, и, как следствие, нагрузки на узел крепления лопадки. Соответственно, необходима разработка конструкции узлов крепления лопадок, обеспечивающая необходимую прочность конструкции. Основная задача при проектировании узлов крепления лопадок заключается в сохранении напряженно-деформированного состояния в допустимых пределах (действующие напряжения не превышают предельных) для заданных скоростей вращения. Для достижения данной цели используются методы подбора характеристик материала, варьирования конструктивной структуры узла крепления лопадки с расчетом прочности на каждом этапе с целью выбора рациональных параметров.

Ключевые слова: рабочие лопадки, осевой вентилятор, узел крепления, напряженно-деформированное состояние, ANSYS

DESIGNING ATTACHMENTS FOR BLADES OF AXIAL MINE FANS

Yuri E. Russky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54, Krasny prospect, Novosibirsk, 630091, Russia, Senior Researcher, e-mail: geomining@mail.ru

The subject of the research is the attachment of fixed blades of axial mine fans. Within increasing rotational speeds (and increasing centrifugal forces as a result), the loads on the blades and, thus, on their attachments grow. Accordingly, the design of the blade attachment should ensure the required strength of the structure. The key objective of the blade attachment design is to keep stresses and strains within permissible limits (so that the effective stresses are beyond the ultimate values) at the preset rotational speeds. Then methods used to meet the objective include selection of the appropriate characteristics of the materials, variation of structure of the blade attachment and calculation of the attachment strength at each stage to select the most efficient parameters.

Keywords: blades, axial fan, attachment, stress–strain parameters, ANSYS

Одним из важных узлов вентилятора является лопаточный узел [1-4]. Снижение массы лопаточного узла позволяет существенно поднять окружные скорости вращения (до 250 м/с), например, путем топологической оптимизации пера лопадки [5]. Помимо оптимальной формы сердечника лопадки, существенно влияющей на массу лопадки и ее прочность, важной составляющей конструкции является узел крепления лопадки к рабочему колесу [6-7]. Для лопадок с большой массой, работающих на высоких скоростях вращения (до 250 м/с по концам лопадок), узел крепления также является фактором, ограничивающим скорость вращения.

Основная задача при проектировании узлов крепления лопаток заключается в сохранении напряженно-деформированного состояния (НДС) в допустимых пределах (действующие напряжения не превышают предельных) для заданных скоростей вращения [8-9]. Для достижения данной цели можно использовать методы подбора характеристик материала, варьирования конструктивной структуры узла крепления лопатки с расчетом прочности на каждом этапе с целью выбора рациональных параметров [10-15].

Решение данных задач позволяет разрабатывать высоконагруженные вентиляторы главного проветривания, эксплуатируемые на высоких скоростях вращения ротора, а, следовательно, с повышенной производительностью в тех же габаритных размерах ВГП. Это, в свою очередь, приводит к снижению площади строительной части ГВУ, уменьшению размеров охранных целиков, а также позволяет эффективно модернизировать устаревшие ГВУ за счет замены их вентиляторов такого же типоразмера, но со значительно большей производительностью [16-18].

Рассмотрим проектирование узла крепления лопатки на примере одной из шахт Кузбасса с главной вентиляторной установкой (ГВУ) ВОД-40, имеющей диаметр рабочего колеса по концам лопаток 4000 мм.

Планами реконструкции шахты предусматривается обеспечение режима работы вентиляторов с параметрами $Q = 500 \text{ м}^3/\text{с}$ и $PSV = 2000 \text{ Па}$. ГВУ шахты укомплектована вентиляторами ВОД-40, которые, во-первых, выработали ресурс работы, во-вторых, могут обеспечить подачу воздуха не более $350 \text{ м}^3/\text{с}$ при $PSV = 2000 \text{ Па}$. Установить на ГВУ вентиляторы большего диаметра не представляется возможным из-за стесненности шахтного двора. Необходимо модернизировать вентилятор ВОД-40 таким образом, чтобы при исходном диаметре рабочего колеса обеспечить требуемую производительность за счет более высокой скорости вращения ротора. Из-за больших нагрузок на лопатку (вследствие увеличения центробежных сил) необходима разработка конструкции узлов крепления лопаток, обеспечивающая необходимую прочность конструкции.

Для существующих вентиляторов серии ВО, выпускаемых ОАО НЭМЗ "ТАЙРА", ранее был предложен узел крепления [19], показанный на рис. 1.

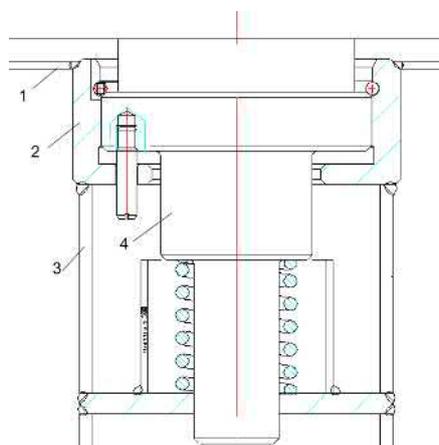


Рис.1 Узел крепления лопатки:

1 – обечайка РК, 2 – стакан, 3 – опорные диски РК, 4 – хвостовик лопатки

Он обеспечивает передачу усилий от лопаточного узла на опорные диски РК, при этом разгружается силовой пояс РК. Такой узел крепления способен обеспечить передавать практически любые нагрузки, предел которых зависит от прочности самого РК. Помимо указанного элемента (стакана), в узел крепления входит и хвостовик лопатки, посредством которого от лопасти передаются нагрузки на стакан РК.

Рассмотрим узел крепления лопатки осевого вентилятора на примере вентиляторов, выпускаемых Артемовским машиностроительным заводом "ВЕНТ-ПРОМ" (рис. 2).

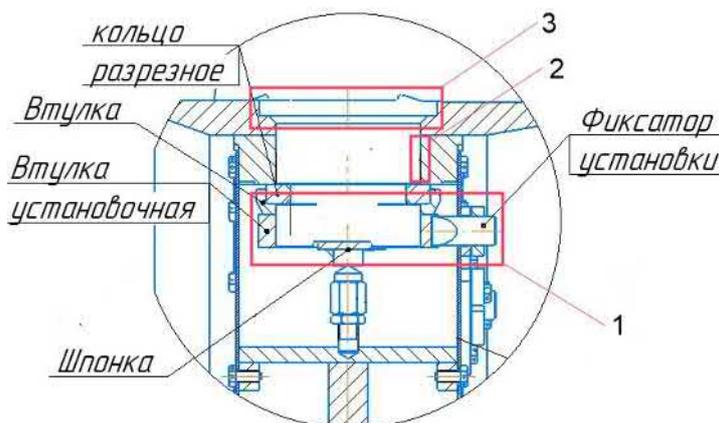


Рис. 2. Узел крепления лопатки

Силовые факторы, действующие на лопатку: центробежная сила и аэродинамические нагрузки, составляющие не более 5% от центробежных, поэтому ими можно пренебречь. Центробежная сила, помимо растяжения лопатки, вызывает кручение и изгиб (так как центр тяжести лопатки не лежит на ее оси) [20].

Нагрузка от растяжения воспринимается элементом 1 (рис. 2), нагрузка от изгиба компенсируется элементом 2, соответственно, два элемента лопатки должны воспринимать всю нагрузку – основание лопатки (рис. 2, элемент 3), к которому приварены лопасти (или отлиты вместе с сердечником лопатки), и элемент 1, воспринимающий осевую нагрузку. Отсюда следует, что при проектировании узлов крепления лопаток необходимо обеспечить прочность этих двух элементов, что позволит расширить режимы работы вентилятора путем увеличения скоростей вращения ротора в тех же габаритных размерах.

Рассмотрим работу типовой конструкции узла крепления лопатки, при работе с $n = 750$ об/мин (скорость по концам лопаток 157 м/с). На рис. 3 показано распределение НДС в лопатке.

Как видно из рис. 3, максимальные напряжения возникают в месте соединения пера лопатки к основанию (область 1), и в месте крепления хвостовика к корпусу (область 2). Соответственно, с ростом оборотов РК эти напряжения будут увеличиваться. Задача состоит в снижении напряжений в указанных областях. Для этого проведем ряд исследований.

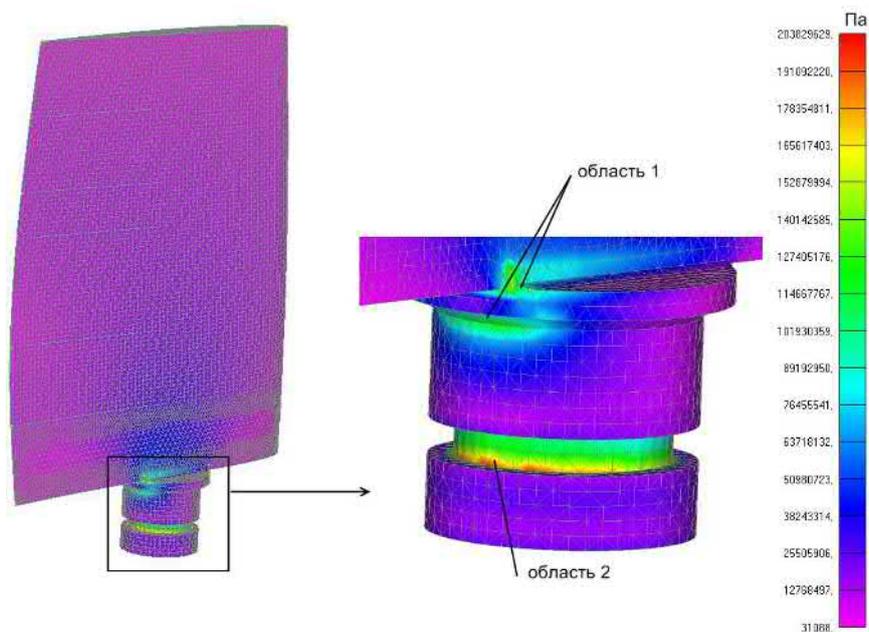


Рис. 3. Типовая конструкция узла крепления лопатки:
 область 1 – напряжения 140 МПа, область 2 – напряжения 203 МПа (области максимальных напряжений)

Рассмотрим задачу снижения напряжений в области 1. Снижение уровня напряжений можно достичь путем увеличения диаметра основания и установкой ребер жесткости. Для решения этой задачи выполним анализ напряжений с варьированием геометрических параметров основания лопатки. На рис. 4 представлены результаты анализа НДС для наибольшего значения диаметра основания, а в таблице 1 – зависимости изменения НДС от диаметра основания.

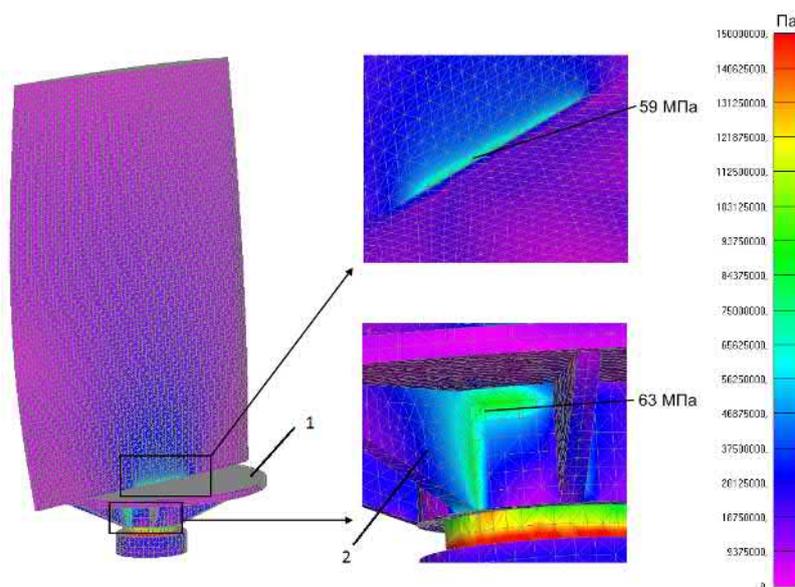


Рис.3. Распределение НДС в лопатке
 с диаметром основания 0.478 м и с 8 ребрами:
 1 – основание, 2 – ребро жесткости

НДС в элементах лопатки в зависимости от их конструктивного исполнения

№ п/п	Диаметр основания, м	Максимальные напряжения в области примыкания лопасти к основанию, МПа	Максимальные напряжения в области примыкания основания к хвостовику, МПа
1	0.178	102	97
2	0.278	75	92
3	0.378	71	88
4	0.478	70	85
5	0.478 с ребрами (4 шт)	67	83
6	0.478 с ребрами (8 шт)	59	63

Как видно из результатов приведенных исследований, НДС в области 1 (рис. 2), удалось снизить с 140 до 59 МПа (в 2.4 раза).

Таким образом, необходимо увеличивать диаметр основания до размера нижней части лопастей, и использовать ребра жесткости. Количество ребер зависит от конкретного вентилятора (его диаметра, частоты вращения и материала изготовления лопатки).

Рассмотрим хвостовик лопатки. Хвостовик лопатки в данном месте (область 2, рис. 3) воспринимает растягивающие усилия от нормальной составляющей силы инерции. Соответственно, уровень напряжений в нем прямо пропорционален нагрузке и обратно пропорционален диаметру хвостовика:

$$\sigma_n = F_n / S,$$

где σ_n – напряжения в хвостовике, F_n – нормальная составляющая силы инерции, S – диаметр хвостовика.

Для снижения напряжений в хвостовике выполним ряд расчетов с варьированием размера хвостовика в месте его соединения с корпусом РК (область 1 на рис. 1). На рис. 5 представлено распределение НДС для одного из расчетных случаев, а в таблице 2 – зависимости изменения НДС от диаметра хвостовика.

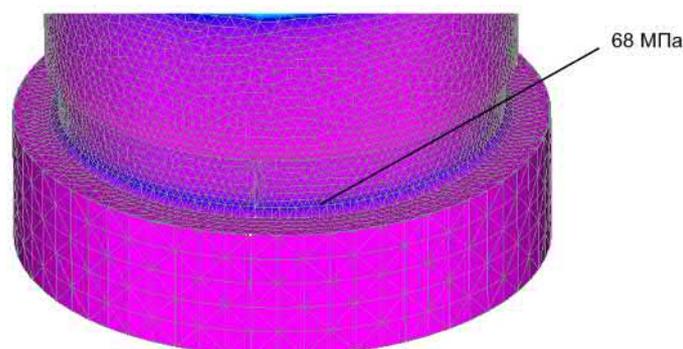


Рис. 5. Напряжения в хвостовике лопатки для диаметра хвостовика 0.157 м

НДС в хвостовике лопатки в зависимости от его диаметра

№ п/п	Диаметр хвостовика, м	Максимальные напряжения в хвостовике лопатки, МПа
1	0.117	203
2	0.122	184
3	0.137	125
4	0.157	68

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что необходимо увеличивать диаметр основания хвостовика лопатки до размера нижней части лопастей, и использовать ребра жесткости. Количество ребер зависит от конкретного вентилятора (его диаметра, частоты вращения и материала изготовления лопатки). Кроме того, на НДС влияет размер хвостовика в месте установки стопорных колец, служащих для его фиксации в стакане рабочего колеса. Используя указанный подход, НДС в узле крепления удалось снизить с 203 до 68 МПа (в 3 раза).

Работа выполнена в рамках научной темы FWNZ-2021-0004

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.М. Красюк, Е.Ю. Русский, Н.А. Попов. Новые направления в создании шахтных осевых вентиляторов главного проветривания // Горный журнал. – 2019. – № 10. – С. 61–66. DOI: 10.17580/gzh.2019.10.08
2. A Krasyyuk, E. Russky, I. Lugin, N. Popov Engineering and analysis of aerodynamics and design parameters for metro tunnel fans with the same blade for different hub/tip diameter ratios// Proceedings of IFOST-2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), June 1-3, 2016. - Novosibirsk, Russia. . Part 2. Organized by Novosibirsk State Technical University (Russia). – p. 594 – 598
3. Yang, Y.aEmail, Ouyang, H.bEmail, Yang, Y.aEmail, Cao, D.cEmail, Wang, K. Vibration analysis of a dual-rotor-bearing-double casing system with pedestal looseness and multi-stage turbine blade-casing rub // Mechanical Systems and Signal Processing Volume 143, September 2020, Номер статьи 106845/
4. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин. М.: Машиностроение, 1982. – 260 с.
5. Левин А.В. Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин / А.В. Левин, К.Н. Боришанский, Е.Д. Консон // Л.: Машиностроение, 1981. – 711 с
6. Красюк А.М., Лугин И.В., Русский Е.Ю., Попов Н.А. Обоснование параметров и оценка прочности основных конструктивных узлов осевого тоннельного вентилятора// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015, – № 6. – С. 80-92.
7. Красюк А.М., Лугин И.В., Русский Е.Ю., Косых П.В. Обоснование способа продления ресурса шахтных двухступенчатых осевых вентиляторов главного проветривания// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019, – № 3. – С. 150-197.
8. Баженов В. А. Численные методы в механике. М.: Высшая школа, 2005. – 564 с.
9. ГОСТ 1583-93 Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия.
10. Eschenauer H., Olhoff N. Topology Optimization of Continuum Structures: A Review // ASME Applied Mechanics Reviews. 2001. Vol. 54. No. 4. Pp. 331-390.

11. Zhao J., Du F., Yao W. Structural Analysis and Topology Optimization of a Bent-Bar-Frame Piston Based on the Variable Density Approach // Proceedings of the ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference. 2014. Pp. 1-7.
12. Du F., Tao Z. Study on Lightweight of the Engine Piston Based on Topology Optimization // Advanced Materials Research. 2011. Vols. 201-203. Pp. 1308-1311.
13. Barbieria S.G., Giacomini M., Mangeruga V., Mantovani S. A Design Strategy Based on Topology Optimization Techniques for an Additive Manufactured High Performance Engine Piston // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. Pp. 641-649.
14. Hu, J., Li, M. Email Author, Yang, X., Gao, S. Cellular structure design based on free material optimization under connectivity control // CAD Computer Aided Design Volume 127, October 2020, Номер статьи 102854.
15. Zhao, L.a, Xu, B.a Email Author, Han, Y.a, Rong, J.b. Continuum structural topological optimization with dynamic stress response constraints // Advances in Engineering Software Volume 148, October 2020, Номер статьи 102834.
16. Брусиловский И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов. — М.: Машиностроение, 1984.
17. Фришман М. Н. Аэродинамическое совершенствование шахтных вентиляционных установок с осевыми вентиляторами // Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1984
18. Красюк А. М., Лугин И. В. Исследование динамики воздушных потоков в метрополитене от возмущающего действия поездов // ФТПРПИ. — 2007. — № 6.
19. Патент на изобретение №2484310. Рабочее колесо осевого вентилятора. Авторы: Красюк А.М., Русский Е.Ю.
20. Русский Е.Ю. Исследование динамических свойств узлов вентиляторов в возмущенном воздушном потоке // ГИАБ. — 2017. — № 2.

REFERENCES

1. A.M. Krasnyuk, E.YU. Russkij, N.A. Popov. Novye napravleniya v sozdanii shahtnyh osevyh ventilyatorov glavnogo provetrivaniya // Gornyj zhurnal. — 2019. — № 10. — S. 61–66. DOI: 10.17580/gzh.2019.10.08
2. A Krasnyuk, E. Russky, I. Lugin, N. Popov Engineering and analysis of aerodynamics and design parameters for metro tunnel fans with the same blade for different hub/tip diameter ratios// Proceedings of IFOST-2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), June 1-3, 2016. - Novosibirsk, Russia. . Part 2. Organized by Novosibirsk State Technical University (Russia). — p. 594 – 598
3. Yang, Y.a Email, Ouyang, H.b Email, Yang, Y.a Email, Cao, D.c Email, Wang, K. Vibration analysis of a dual-rotor-bearing-double casing system with pedestal looseness and multi-stage turbine blade-casing rub // Mechanical Systems and Signal Processing Volume 143, September 2020, Nomer stat'i 106845/
4. Kostyuk A.G. Dinamika i prochnost' turbomashin. M.: Mashinostroenie, 1982. — 260 s.
5. Levin A.V. Prochnost' i vibraciya lopatok i diskov parovyh turbin / A.V. Levin, K.N. Borishanskij, E.D. Konson // L.: Mashinostroenie, 1981. — 711 s
6. Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Russkij E.YU., Popov N.A. Obosnovanie parametrov i ocenka prochnosti osnovnyh konstruktivnyh uzlov oseвого tonnel'nogo ventilyatora// Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. — 2015, — № 6. — S. 80-92.
7. Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Russkij E.YU., Kosyh P.V. Obosnovanie sposoba prodleniya resursa shahtnyh dvuhstupenchatyh osevyh ventilyatorov glavnogo provetrivaniya// Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. — 2019, — № 3. — S. 150-197.
8. Bazhenov V. A. CHislennye metody v mekhanike. M.: Vysshaya shkola, 2005. — 564 s.
9. GOST 1583-93 Splavy alyuminievye litejnye. Tekhnicheskie usloviya.

10. Eschenauer H., Olhoff N. Topology Optimization of Continuum Structures: A Review // *ASME Applied Mechanics Reviews*. 2001. Vol. 54. No. 4. Pp. 331-390.
11. Zhao J., Du F., Yao W. Structural Analysis and Topology Optimization of a Bent-Bar-Frame Piston Based on the Variable Density Approach // *Proceedings of the ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference*. 2014. Pp. 1-7.
12. Du F., Tao Z. Study on Lightweight of the Engine Piston Based on Topology Optimization // *Advanced Materials Research*. 2011. Vols. 201-203. Pp. 1308-1311.
13. Barbieria S.G., Giacomini M., Mangerugaa V., Mantovani S. A Design Strategy Based on Topology Optimization Techniques for an Additive Manufactured High Performance Engine Piston // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 11. Pp. 641-649.
14. Hu, J., Li, M. Email Author, Yang, X., Gao, S. Cellular structure design based on free material optimization under connectivity control // *CAD Computer Aided Design* Volume 127, October 2020, Nomer stat'i 102854.
15. Zhao, L.a, Xu, B.a Email Author, Han, Y.a, Rong, J.b. Continuum structural topological optimization with dynamic stress response constraints // *Advances in Engineering Software* Volume 148, October 2020, Nomer stat'i 102834.
16. Brusilovskij I. V. *Aerodinamika osevyh ventilyatorov*. — M.: Mashinostroenie, 1984.
17. Frishman M. N. *Aerodinamicheskoe sovershenstvovanie shahtnyh ventilyacionnyh ustanovok s osevyimi ventilyatorami* // *Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk.* — M.: IGD im. A. A. Skochinskogo, 1984
18. Krasnyuk A. M., Lugin I. V. *Issledovanie dinamiki vozdušnyh potokov v metropolitene ot vozmushchayushchego dejstviya poezdov* // *FTRPI*. — 2007. — № 6.
19. Patent na izobretenie №2484310. *Rabochee koleso oseвого ventilyatora*. Avtory: Krasnyuk A.M., Russkij E.YU.
20. Russkij E.YU. *Issledovanie dinamicheskikh svojstv uzlov ventilyatorov v vozmushchennom vozdušnom potoke* // *GIAB*. — 2017. — № 2.

© E. Ю. Русский, 2021

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КОМБИНАЦИИ СОБИРАТЕЛЕЙ ПРИ АДСОРБЦИИ НА ГРАНИЦЕ «ГАЗ – ЖИДКОСТЬ»

Дина Владимировна Семьянова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел.(383) 205-30-30 доб. 166, e-mail: d.semjanova@yandex.ru

Известна перспективность использования во флотации комбинации реагентов-собирателей. Синергетический эффект от применения сочетания собирателей проявляется не только при адсорбции на минеральной поверхности, способствуя ее гидрофобизации, но и в снижении поверхностного натяжения на границе раздела «газ-жидкость». Ранее обоснованный механизм действия физической формы сорбции реагента базируется на связи поверхностных характеристик реагентов (поверхностное давление, скорость растекания) и их собирательной силы. Предполагается, что соотношение комбинации реагентов для дальнейшей флотации может быть выбрано исходя из достигаемого максимального синергетического эффекта на границе газ-жидкость. В настоящей работе изучена адсорбция на границе раздела газ-жидкость в водных растворах бинарных смесей лаурилсаркозината натрия и гексадецилтриметиламмоний бромиды. Определены параметры взаимодействия; соотношение компонентов раствора, при котором достигается максимальный синергетический эффект.

Ключевые слова: флотация, комбинация реагентов, синергетический эффект, физическая форма сорбции реагента

SYNERGISTIC EFFECT OF A COMBINATION OF COLLECTORS IN ADSORPTION AT GAS-LIQUID INTERFACE

Dina V. Semyanova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, office: +7 (383) 205 30 30 ext. 166, e-mail: d.semjanova@yandex.ru

The promising nature of flotation with a combination of collecting agents is well known. The synergetic effect of combinations of collectors develops as hydrophobization of a mineral surface during adsorption and as reduction in surface tension at gas-liquid interface. The earlier proved mechanism of physisorption of an agent is based on the connection of its surface characteristics (surface pressure, spreading rate) and their collectability. It is assumed that the ratio of agents in their combination for flotation can be selected from the maximum synergetic effect achieved. This study focuses on adsorption at the gas-liquid interface in aqueous solutions of binary mixtures of *sodium lauroyl sarcosinate* and *hexadecyltrimethylammonium bromide*. The interaction parameters and the ratio of the components in the solution so that the maximum synergetic effect is achieved are determined.

Keywords: flotation, combination of agents, synergetic effect, physisorption

Введение

Многочисленными исследованиями [1–9] отмечена перспективность применения при флотационном обогащении в качестве собирателя комбинации реагентов. Высокую эффективность при использовании сочетания реагентов в сравнении с индивидуальными объясняют возникновением синергетического эффекта. Синергистом называется вещество, введение которого в небольшом количестве может значительно повысить эффективность другого реагента [1]. Синергетический эффект от использования сочетания собирателей как правило связывают с увеличением массы адсорбированных минеральной поверхностью реагентов, что приводит к повышению гидрофобности минеральной поверхности [2, 3]. В ряде работ отмечается, что синергетический эффект от использования сочетания собирателей наблюдается не только на границе минерал-жидкость, но и на границе газ-жидкость [4–9]. В [9] приведены данные по флотации каолинита, использовалось сочетание реагентов: додециламин хлорид, жирные кислоты (октановая, декановая, додекановая). Установлено, что смесь реагентов (додециламинхлорид и октановая кислота) обладает собирательной способностью, превышающей собирательную способность додециламинхлорида: 85,47% и 60,86% соответственно. Показано, что в результате использования сочетания реагентов происходит соадсорбция октановой кислоты, что способствует большей гидрофобизации минеральной поверхности; кроме того, авторы предполагают, что сочетание реагентов способствует снижению поверхностного натяжения и приводит к формированию более мелких пузырьков, что так же положительно влияет на флотацию.

Авторы [10] отмечают, что смеси поверхностно-активных веществ позволяют более эффективно, по сравнению с индивидуальными веществами, регулировать свойства дисперсных систем. Такое неидеальное поведение смешанных растворов обусловлено неспецифическим взаимодействием между молекулами различных реагентов. Эффект такого взаимодействия проявляется при мицеллообразовании и при формировании адсорбционного слоя на границе газ-жидкость, когда состав образующихся агрегатов отличен от состава исходного раствора. Изучение этих процессов, вычисление параметра взаимодействия бинарных растворов флотационных реагентов позволяет определить соотношение, при котором проявляется максимальный синергизм их действия.

Автором [11] комбинация реагентов рассматривается как сочетание основного собирателя и присадки, в результате взаимодействия которых образуются микрокапли, обладающие низким поверхностным натяжением. Такие микрокапли выполняют функцию физической формы сорбции. Ранее предложенный метод в [12] механизм действия физической формы сорбции реагента основывается на связи поверхностных параметров собирателей (поверхностного натяжения, поверхностного давления, скорости растекания по поверхности воды фронта пленки реагента) с их флотационной активностью. Высокое поверхностное давление в сочетании со скоростью растекания формирует высокую мощность поверхностного потока производных форм реагента, что приводит к сокращению времени индукции и более быстрому образованию флотационного комплекса. Таким образом, выбор соотно-

шения собирателей, при котором достигается максимальный синергетический эффект в снижении поверхностного натяжения, приведет к выбору соотношения реагентов с наибольшей силой физически сорбированного собирателя.

Цель исследования: оценить применимость механизма действия физической формы сорбции реагента к сочетанию собирателей. В ходе работы предполагается определить параметры взаимодействия для сочетания таких реагентов как лаурилсаркозинат натрия и гексадецилтриметиламмоний бромид, на основе установленных параметров определить соотношения компонентов с максимальным синергетическим эффектом для дальнейших флотационных экспериментов.

Методы и материалы

В эксперименте использовали ПАВ фирмы «Sigma Aldrich» (чистота 98%). Общую концентрацию C растворов смесей меняли от 10^{-4} до 10^{-2} моль/л. Мольное соотношение компонентов (α) в смесях составляло 0,2; 0,5 и 0,8.

Поверхностное натяжение растворов измеряли методом максимального давления в пузырьке воздуха с помощью тензиометра LAUDA MPT C.

Значения ККМ рассчитаны для смесей аналогичного состава при условии идеального смешения по уравнению Ланге-Бека [10, 13]:

$$\frac{1}{C_{12}} = \frac{\alpha_1}{C_1} + \frac{1-\alpha_1}{C_2} \quad (1),$$

где C_1 и C_2 – ККМ индивидуальных реагентов; C_{12} – ККМ смеси; α_1 и $(1-\alpha_1)$ – доли реагентов в растворе.

При идеальном смешении состав мицеллы, коэффициенты активности компонентов в которой $f_1=f_2=1$, рассчитывается по формуле:

$$x_{1\text{ид}}^m = \frac{\alpha_1 C_2}{\alpha_1 C_2 + \alpha_2 C_1} \quad (2)$$

Для термодинамического описания процесса мицеллообразования и определения состава смешанных мицелл использовали известный подход Рубена и Розена, в основе которого лежит теория регулярных растворов.

Уравнение Рубена:

$$\frac{(x_1^m)^2 \ln \left[\frac{\alpha_1 C_{12}}{x_1^m C_1} \right]}{(1-x_1^m)^2 \ln \left[\frac{(1-\alpha_1) C_{12}}{(1-x_1^m) C_2} \right]} = 1, \quad (3)$$

где α_1 и $(1-\alpha_1)$ – доли компонентов в бинарном растворе, в нашем случае α_1 – доля реагента гексадецилтриметиламмоний бромида, $(1-\alpha_1)$ – доля лаурилсаркозината натрия; x_1 и $(1-x_1)$ – доли гексадецилтриметиламмоний бромида и лаурилсаркозината натрия в мицелле; C_1 , C_2 – значения ККМ гексадецилтриметиламмоний бромида и лаурилсаркозината натрия; C_{12} – ККМ бинарного раствора.

Рассчитанные мольные доли ПАВ в смешанной мицелле позволяют определить значение параметра взаимодействия β_m между молекулами:

$$\beta_m = \ln[\alpha_1 C_{12} / (x_1^m C_1)] / [(1 - x_1^m)^2], \quad (4)$$

Если рассчитанный параметр β_m удовлетворяет двум условиям $\beta_m < 0$ и $|\beta_m| < \left| \ln \frac{C_1}{C_2} \right|$, можно говорить о синергизме действия компонентов бинарного раствора.

Расчет коэффициентов активности компонентов в смешанной мицелле:

$$f_1^m = \exp[\beta_m (1 - x_1^m)^2]; \quad (5)$$

$$f_2^m = \exp[\beta_m (x_1^m)^2] \quad (6)$$

Представления о мицеллообразовании в растворах смесей ПАВ были распространены на адсорбцию ПАВ из смешанных растворов на границе раздела фаз газ-жидкость. Выражения для расчета состава смешанных адсорбционных слоев (x_1^σ и x_2^σ) и параметра взаимодействия β_σ имеют вид:

$$\frac{(x_1^\sigma)^2 \ln \left[\frac{\alpha_1 C_{12}^\sigma}{x_1^\sigma C_1^\sigma} \right]}{(1 - x_1^\sigma)^2 \ln \left[\frac{(1 - \alpha_1) C_{12}^\sigma}{(1 - x_1^\sigma) C_2^\sigma} \right]} = 1, \quad (7)$$

$$\beta_\sigma = \ln[\alpha_1 C_{12}^\sigma / (x_1^\sigma C_{12}^\sigma)] / [(1 - x_1^\sigma)^2] \quad (8)$$

Для проведения расчетов на изотермах поверхностного натяжения проводят сечение $\sigma = \text{const}$ и по точкам пересечения этой прямой с изотермами поверхностного натяжения определяют концентрации растворов индивидуальных ПАВ (C_1 и C_2) и смесей (C_{12}) при которых достигается выбранное значение поверхностного натяжения. Полученные значения подставляют в 7 и 8.

Для определения состава смешанных адсорбционных слоев и параметров взаимодействия в слоях были выбраны четыре сечения: 55, 50, 45 и 40 мН/м. x_1 – мольная доля гексадецилтриметиламмоний бромида в смешанных адсорбционных слоях.

Результаты

Изотермы поверхностного натяжения растворов в индивидуальных ПАВ и их смесей (рис. 1) типичны для растворов мицеллообразующих ПАВ: с ростом концентрации поверхностное натяжение сначала снижается, а при достижении критической концентрации мицеллообразования (ККМ) принимает постоянное значение. ККМ лаурилсаркозината натрия и гексадецилтриметиламмоний бромида составили 0,01 и 0,0009 моль/л соответственно. Определенные по изломам на изотермах поверхностного натяжения ККМ бинарных растворов, вычисленные значения ККМ при условии идеального смешения (по уравнению 1) приведены в табл. 1.

В таблице 2 приведены результаты расчетов состава смешанных адсорбционных слоев (x_1^σ и x_2^σ) и параметра взаимодействия β_σ по формулам 7 и 8.

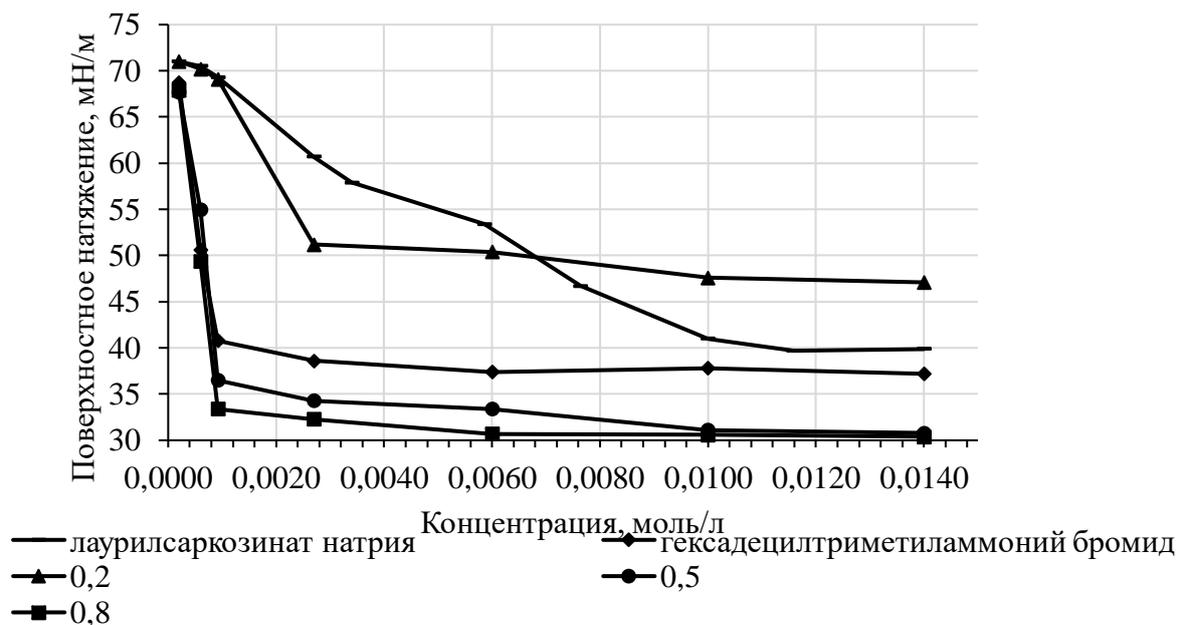


Рис. 1. Изотермы поверхностного натяжения в растворах ПАВ

Таблица 1

Характеристики смешанного мицеллообразования в бинарном растворе ПАВ: гексадецилтриметиламмоний бромид (компонент 1) – лаурилсаркозинат натрия (компонент 2)

α_1	ККМ смеси, моль/л		x_1^m		β_m
	Идеал.	Экспер.	Идеал.	Экспер.	
0,2	0.003	0.0028	0.74	0.68	-0,87
0,5	0.0016	0.0007	0.92	0.67	-5,00
0,8	0.0011	0.0008	0.98	0.81	-9,51

Таблица 2

Расчет параметров взаимодействия и состава смешанных адсорбционных слоев гексадецилтриметиламмоний бромида - лаурилсаркозината натрия на межфазной поверхности газ-жидкость

σ , мН/м		α		
		0,2	0,5	0,8
55	$\beta\sigma$	0,89	-2.69	-4.11
	x_1^σ	0.76	0.72	0.76
50	$\beta\sigma$	-2.12	-3.06	-2.77
	x_1^σ	0.84	0.73	0.94
45	$\beta\sigma$	-	-4.27	-5.29
	x_1^σ	-	0.66	0.73
40	$\beta\sigma$	-	-6.54	-7.01
	x_1^σ	-	0.62	0.69

Обсуждение

Согласно расчетам, из бинарных растворов лаурилсаркозината натрия и гексадецилтриметиламмоний бромиды формируются смешанные адсорбционные слои на границе раздела газ-жидкость. Параметр взаимодействия β имеет отрицательное значение практически на всем диапазоне рассмотренных концентраций (таблица 2). Следовательно, на границе раздела газ-жидкость возникает синергетический эффект при взаимодействии исследуемых компонентов, который проявляется в большем снижении поверхностного натяжения и формировании более высокого поверхностного давления. Кроме того, для смесей с $\alpha=0,5$ и $0,8$ ККМ ниже, чем ККМ индивидуальных ПАВ.

Заключение

Используя теорию регулярных растворов, можно составлять сочетание смеси таким образом, чтобы достигался максимальный эффект в снижении поверхностного натяжения. Согласно предложенной теории, возникающая при этом физическая форма сорбции реагента будет обладать высокой мощностью поверхностного потока. При образовании флотационного комплекса это приведет к сокращению времени индукции и повышению флотационной активности смеси реагентов. Дальнейшие эксперименты предполагают проведение флотационных экспериментов с использованием сочетаний рассмотренных реагентов в соотношении $0,5$ и $0,8$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yong-jie Bu, Run-qing Liu, Wei Sun, Yue-hua Hu Synergistic mechanism between SDBS and oleic acid in anionic flotation of rhodochrosite // International Journal of Minerals and Materials. – 2015. – V. 22. – N 5. – P.447-452.
2. Игнаткина В.А., Бочаров В.А. Основные принципы выбора селективных собирателей при флотации минералов с близкими флотационными свойствами // Семинар №24. – 2006. – С. 334 – 340.
3. Hao J., Ya G., Khoso S.A., Wanying J., Yuehua H. A new approach for characterization of hydrophobization mechanisms of surfactants on muscovite surface // Separation and purification technology. – 2019. – V. 209. – P.936-945.
4. Alexandrova L., Hanumantha Rao K., Forsberg K.S.E., Grigorov L., Pugh R.J. The influence of mixed cationic-anionic surfactants on the three-phase contact parameters in silica-solution systems // Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects. – 2011. – V. 373. – P.145-151.
5. Hanumantha Rao K., Forsberg K.S.E. Mixed collector systems in flotation // International Journal of Mineral Processing. – 1997. – V. 51. – P.67-79.
6. Helbig C., Baldauf H., Mahnke J., Stockelhuber K.W., Schulze H.J. Investigation of Langmuir monofilms with anionic /cationic collector mixtures // International journal of mineral processing. – 1998. – V. 53. – P.135-144.
7. Tian J., Xu L., Deng W., Jiang H., Gao Z., Hu Y. Adsorption mechanism of new anionic/cationic collectors in a spodumene-feldspar system // Chemical Engineering Science. – 2017. – P. 99 – 107.
8. Valdiviezo E., Oliveira J.F. Synergism in aqueous solutions of surfactant mixtures and its effect on the hydrophobicity of mineral surfaces // Minerals Engineering. – 1993. – V.6. – N 6. – P.655-61.

9. Liang S., Jinbo Z., Lingyun L., Huaifa W. Flotation of fine kaolinite using dodecylamine chloride/fatty acids mixture as collector // Powder Technology. – 2017. – V. 312. – P.159-165.
10. Женевская А.С, Митрофанова Г.В. Синергизм действия в бинарном растворе неионогенного и анионного поверхностно-активных веществ // Труды Кольского научного центра РАН. – 2020. – №3 - 4. – Т.11. – С.62 – 68.
11. Кондратьев С.А. Синергетический эффект от применения сочетания флотационных реагентов-собирателей // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения 2013): Материалы Международного совещания (Томск, 16 – 19 сентября 2013 г.). – Томск: 15 августа 2013. – С. 240 – 243.
12. Кондратьев, С.А. Физическая форма сорбции реагента и ее назначение во флотации. – Новосибирск: Наука, 2018. – 184с.
13. Соболева О.А., Кривобокова М.В. Смешанные мицеллы и адсорбционные слои неионогенного поверхностно-активного вещества с катионным (мономерным и димерным)// Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 2004. – №5. – Т.45. – С.344-349.

© Д. В. Семьянова, 2021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ МЕТОДОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА

Александр Александрович Скулкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383) 205-30-30, доб. 337, e-mail: chuppt@yandex.ru

Представлен опыт измерения напряженного состояния массива горных пород на Таштагольском железорудном месторождении и результат напряжений, действующих в наведенном поле вблизи 10 орта на глубине 800 м от дневной поверхности (горизонт -350), используя методом измерительного гидроразрыва. На замерной станции определены зоны концентраций напряжений вокруг горной выработки.

Ключевые слова: измерительный гидроразрыв, зонд, напряжённое состояние, скважина, трещина, горная выработка

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF STRESS PARAMETERS IN THE MINING FIELD

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 337, e-mail: chuppt@yandex.ru

The experience of measuring the stress state of the rock mass at the Tashtagol iron ore deposit and the result of stresses acting in the induced field in the vicinity of 10 orts at a depth of 800 m from the daily surface (horizon -350) is presented using the method of measuring hydraulic fracturing. Stress concentration zones around the mine are determined at the measuring station.

Keywords: hydraulic fracturing, rock pressure, measure borehole, probe, stress state, crack, mine

Введение

Несмотря на сложные горно-геологические условия, связанные с большой глубиной отработки, наличие тектонических зон и удароопасности, Таштагольское месторождение имеет приоритетное значение для металлургической отрасли Кузбасса.

На руднике Таштагольский добычные работы ведутся на глубинах свыше 700 м. В связи с этим проводится комплекс работ по геомеханическому обоснованию выемки запасов. Для этого необходимы данные о текущем состоянии массива горных пород. Первые эксперименты по определению напряжений на Таштагольском месторождении выполнены в 1962 - 1968 гг. на глубинах 233 - 410 м от поверхности Земли в выработках, пройденных по рудной залежи, а также во

вмещающих породах (сиениты, сланцы) [1-11]. Применялся метод торцевой разгрузки и метод Н. Хаста. В данных экспериментах впервые установлен факт превышения горизонтальными напряжениями вертикальной компоненты в 1,5 - 2,0 раза.

В последние годы силовое поле в области рудников Горной Шории подверглось воздействию двух крупных динамических событий – Кочуринского (5.02.1988 г.) и Чуйского (27.09.2003 г.) землетрясений [12].

Под влиянием состоявшихся землетрясений возможно изменение направления действия тектонических сил в области залегания месторождения, поле которых обычно менее однородно по сравнению с гравитационным. Во взаимодействии с гравитационными и локальными полями напряжений тектонические воздействия создают новые более сложные поля напряжений. Ввиду того, что новейших данных по инструментальному контролю напряжений в массиве в подземных условиях рудника «Гаштагол», относящихся к периоду последнего 30-летия нет, возникает потребность в выполнении очередного цикла экспериментальных наблюдений. В современных условиях они должны являться составной частью геомеханико-геодинамического мониторинга [13,14], учитывать специфику контролируемого объекта как нелинейной открытой самоорганизующейся системы с формирующимися определенным образом энергонасыщенными очаговыми зонами.

Сведения о напряженном состоянии породного массива необходимы для принятия правильных решений при проектировании и строительстве подземных сооружений, а также при отработке месторождений полезных ископаемых. На сегодняшний день среди способов экспериментального определения напряженного состояния породных массивов своей высокой универсальностью выделяется метод измерительного гидроразрыва пород в скважине [15, 16]. Ее характеризуют два отличительных признака: размер исследуемого (в единичном опыте) объема горной породы и возможность применения в глубоких скважинах (на больших расстояниях от наблюдателя до исследуемого участка массива).

В настоящей работе приведены результаты экспериментального определения наведенного поля напряжений в породном массиве вблизи района очистных работ (в 10-м орте на горизонте -350) методом измерительного гидроразрыва.

Методы и материалы

Исследования велись по классической схеме, в которой определение напряжений по данным гидроразрыва основано на предположении, что ось скважины ориентирована в направлении одного из главных напряжений исходного поля (обычно за главное принимают вертикальное направление) [17].

Для определения природного поля, участки для контроля действующих в массиве напряжений, а также места замерных станций должны находиться на максимальном удалении от зоны очистных работ. Конструкция замерной станции предусматривает проведение не менее трех скважин диаметром 76 мм глубиной до 15 м. Место расположения замерной станции было выбрано в непосредствен-

ной близости от района ведения очистных работ, что покажет нам не природное поле напряжений, а действующее в окрестности замерной станции.

На замерной станции выбуриваются ортогональные скважины. Проводится обследование поверхности стенок скважины. Предпочтительно в торцевой части скважины устанавливается измерительный зонд и выполняется тест гидроразрыва. В процессе нагружения стенок скважины с помощью регистратора производится запись «Р – t» диаграммы (диаграмма изменения Давления в системе от Времени). Фиксируется критическое давление флюида в момент гидроразрыва и давление его стабилизации после прекращения подачи флюида. Давление нагнетания сбрасывается до нулевого значения, процесс нагружения стенок скважины повторяется 2 – 3 раза с регистрацией в каждом случае «Р – t» диаграммы.

Далее используется методика [18], в которой формулы для расчета компонент действующих напряжений по данным разно ориентированных скважин подбираются в зависимости от соотношения вертикальной и горизонтальных составляющих поля напряжений. По параметрам гидравлического теста определяют значение меньшей и рассчитывают значение большей горизонтальной компонент действующих напряжений. Для определения меньшей компоненты используют метод, полученный в [19, 20].

В результате анализа производственной обстановки было выбрано наиболее подходящее место возможного размещения замерных станций (рис. 1).

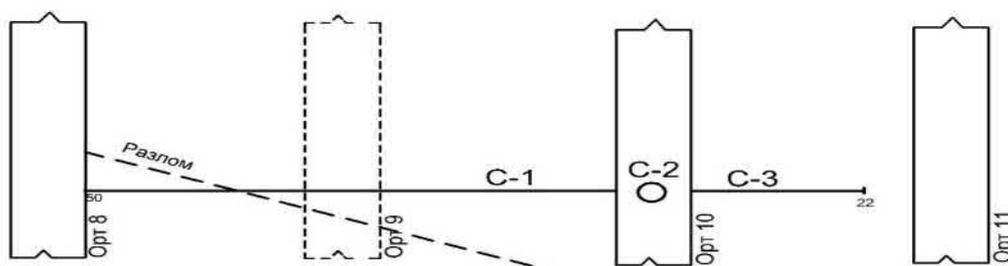


Рис. 1. Схема расположения замерных скважин.

Замерная станция № 1 находится в Орте № 10 на горизонте -350 м и включает в себя три скважины, где скважины С-1 и С-3 направлены в левый и правый борт выработки горизонтально, а С-2 - вертикально вниз. Все скважины пройдены по магнетитовой руде.

В классическом варианте методики измерительного гидроразрыва предполагается использование данных по трем ортогональным скважинам. Так как не удалось подобрать точки, где возможно проведение трех ортогональных скважин, была принята попытка получить значения поля напряжений исходя из данной конфигурации.

Для натуральных экспериментов применялся измерительный зонд с четырьмя пакерующими элементами (рис. 2). В зонде предусмотрено два гидроцилиндра, с помощью которых производится их осевое сжатие. Имелась возможность из-

менять протяженность межпакерного пространства путем замены центральной части несущего стержня. При выполнении тестов гидроразрыва размер межпакерного пространства составлял 5-6 диаметров скважины. Для беспрепятственной досылки устройства в измерительную скважину диаметром 76 мм зонд был оснащен направляющими пластинами.

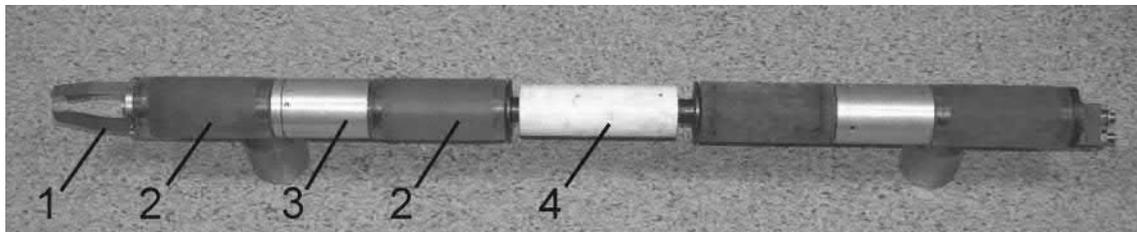


Рис. 2. Общий вид измерительного зонда с четырьмя пакерами:

1 – направляющие пластины; 2 – полиуретановые пакеры; 3 – гидроцилиндры; 4 – втулка для заполнения межпакерного пространства

При выполнении тестов гидроразрыва регистрировались следующие параметры процесса: P_r – давление гидроразрыва; P_s – давление запираения при гидроразрыве; P_r' – давление раскрытия трещины разрыва при повторном нагружении; P_s'' – давление запираения при повторном нагружении; P_r'' – давление раскрытия трещины при третьем нагружении; P_s''' – давление запираения при третьем нагружении;

На замерной станции выполнено 17 тестов гидроразрыва в 3 скважинах. Журнал наблюдений при выполнении тестов гидроразрыва приведен в таблице 1, а результаты обработки «P– t» диаграмм – в таблице 2.

В ходе испытаний во всех скважинах не удалось создать трещину, так как прочность магнетитовой руды на разрыв превышает разрешающую способность комплекса (>60 МПа). Вследствие этого было принято решение о нахождении природных трещин в скважинах и их раскрытии. Трещины искались по выбуренному керну. По обследованному керну были выделены следующие места: в скважине С-1 трещины располагались на глубинах 11, 10, 9, 8.5 м, в скважине С-2 на глубине 11, 7.5, 6, 5.5 м, а в скважине С-3 трещины находятся на глубине 10, 6.5 м.

Журнал наблюдений при выполнении тестов гидроразрыва на замерной станциях № 1 приведен в табл. 1, а результаты обработки P– t диаграмм – в табл. 2.. Ориентация этих трещин относительно оси скважины неизвестна, поэтому можно говорить лишь об оценочных значениях главных напряжений.

Таблица 1

Журнал наблюдений при выполнении тестов гидроразрыва на замерной станции Таштагольского рудника.

Координаты эксперимента		1-е нагружение		2-е нагружение	
№	Расстояние от контура выработки до места гидроразрыва, м	Давление раскрытия трещины, P'_r , МПа	Давление за-пиранья, P'_s , МПа	Давление рас-крытия тре-щины, P''_r , МПа	Давление за-пиранья, P''_s , МПа
С-1	11	14,6	9.9	13.1	9.7
	10	12.4	9.3	11.44	9.3
	9	10.92	10.45	11.76	11.45
	8.5	13.08	12.76	-	-
С-3	10	26.8	18.3	22.45	21
	6.5	41.39	33.95	-	-
С-2	11	50.65	49.6	-	-
	7.5	43.7	42.58	43.12	42.58
	6	37.66	37.44	34.9	34.9
	5.5	36.8	36.7	36.7	33.2

Таблица 2

Значения компонент напряжений, оцененные в экспериментах на Таштагольском руднике.

Индекс измерительной скважины	Расстояние от контура выработки, м	σ_h , МПа	σ_{min} , МПа	σ_{max} , МПа
С-1	11		9.8	
	10		9.3	
	9		10.95	
	8.5		12.76	
С-3	10	21		
	6.5			33.95
С-2	11			49.6
	7.5			42.58
	6			36.17
	5.5			35

Результаты

В результате обработки $P - t$ диаграмм установлены следующие значения напряжений, действующих в массиве: $\sigma_{min} = 9,3 \div 12,76$ МПа; $\sigma_{max} = 33,95 \div 49,6$ МПа, а $\sigma_h = 21$ МПа. Данные значения указывают на не равнокомпонентное поле напряжений на замерной станции, где максимальная горизонтальная компонента превышает γh от 1,6 до 2,36 раз, а минимальная равна $0,44 \div 0,6$ от вертикальной.

Анализируя полученные значения выявлен рост напряжений при удалении от подошвы выработки вдоль скважины С-2, а для левого борта выработки, вдоль скважины С-1, ситуация обратная. Это свидетельствует о концентрации напря-

жений вокруг выработки. Опираясь на полученные данные возможен выбор различных мер по предотвращению горных ударов таких как: разгрузка массива, выбор оптимальной крепи выработки, оптимальное расположение соседних выработок для минимизации влияния от них.

Заключение

В подземных выработках Таштагольского железорудного месторождения методом измерительного гидроразрыва выполнен цикл экспериментальных исследований. Полученные данные говорят о тектоническом поле напряжений вблизи Орта № 10. Величины полученных напряжений могут служить опорными сведениями и оказаться полезными при решении практических задач, где необходимо учитывать реальное состояние массива в ближней зоне влияния горных выработок. Опыт практического использования измерительного гидроразрыва показал работоспособность метода при контроле напряженно-деформированного состояния массива горных пород не только для определения природного поля, но и для выявления зон концентраций напряжений вокруг выработок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Batugin S.A. Shamanskaya A. G. Investigation of the stress state of the rock mass by the method of unloading in the conditions of the Tashtagol iron ore deposit // J. Min. Sci.. - 1965. - Vol. 2. - Pp. 28 – 33. [Батугин С.А. Шаманская А. Г. Исследование напряженного состояния массива горных пород методом разгрузки в условиях Таштагольского железорудного месторождения // ФТПРПИ. — 1965. — № 2. — С. 28 - 33.]
2. Egorov P.V., Shamanskaya A.T. Investigation of the stress state of rocks in areas of discontinuities by the method of unloading at the Tashtagol iron ore deposit // Measurement of stresses in the massif of rocks: mater. seminar - Novosibirsk: Science, 1968. - Pp 107 - 114. [Егоров П.В., Шаманская А.Т. Исследование напряженного состояния горных пород в районах разрывных нарушений методом разгрузки на Таштагольском железорудном месторождении // Измерение напряжений в массиве горных пород: матер. семинара - Новосибирск: Наука, 1968. — С. 107 – 114.]
3. Батугин С.А. Пути повышения точности и надежности определения напряжений в массиве горных пород методом разгрузки. / Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород», Новосибирск: «Наука» СО АН СССР, 1968, С. 58-77.
4. Нестеренко Г.Т., Шаманская А.Т., Егоров П.В. Приближенный метод оценки напряженного состояния горных пород / Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород», Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1970, С. 46-49.
5. Бобряков А.П., Крамаренко В.И., Ревуженко А.Ф., Шемякин Е.И. О стрелянии горных пород // ФТПРПИ, 1980, № 5, С. 3-12.
6. Егоров П.В., Шаманская А.Т., Бояркин В.И., Шрепп Б.В. Сравнение двух методов измерения напряжений в горных породах / Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород», Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1970, С. 59-61.
7. Шаманская А.Т. Распределение напряжений вокруг горных выработок, пройденных в крепких скальных породах / Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород», Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1970, С. 91-95.
8. Шрепп Б.В., Бояркин В.И. Изучение проявлений опорного давления на призабойный массив / Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород», Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1970, С. 95-101.

9. Егоров П.В., Шаманская А.Т. Естественное поле напряжений массива пород Горной Шории / *Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород»*, Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1972, С. 140-143.
10. Шрепп Б.В., Бояркин В.И., Свечников В.Ф. Изучение напряженного состояния массива с использованием фотоупругих тензометров и оптических датчиков / *Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород»*, Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1972, С. 221-223.
11. Лапшин Е.М., Шрепп Б.В., Бояркин В.И. и др. Исследование параметров тектонического поля напряжений на глубоких горизонтах Таштагольского месторождения / *Сб научных трудов «Исследование напряжений в горных породах»* – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985, С. 11-17.
12. Лобанова Т.В. Заключение по результатам геодинамического районирования Таштагольского месторождения с оценкой сейсмической активности при ведении горных работ и соответствия параметров ведения горных работ геодинамической ситуации. – Новокузнецк: ОАО «Восточный научно-исследовательский горнорудный институт» (ОАО ВостНИГРИ), 2010. – 48 с.
13. Линдин Г.Л., Лобанова Т.Ф. Особенности сейсмоактивности Таштагольского месторождения перед горными ударами // *ФТПРПИ*, 2012, № 2, С. 70-79.
14. Курленя М.В., Леонтьев А.В., Беляков В.Г., Ярославцев А.Ф. Фундаментальные и прикладные задачи геомеханического мониторинга // *ФТПРПИ*, 1996, № 2, С. 15-25 (часть 1), № 6, С. 3-18 (часть 2).
15. Y. Mizuta, S. Kikuchi, K. Tokunaga. Studies on Hydraulic Fracturing Stress Measurement Assisted by Water Jet Borehole Slotting. // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* – 1993. – Vol. 30, – No. 7. – pp. 981-984.
16. G. Klee, A. Bunger, G. Meyer, F. Rummel, B. Shen. In Situ Stresses in Borehole-1/South Australia Derived from Breakouts, Core Discing and Hydraulic Fracturing to 2 km Depth. // *Rock Mech. Rock Eng.* (2011). – V 44, No. 5, pp. 531-540.
17. Kurlenya M.V., Leontyev A.V., and Popov S.N., Development of the hydraulic fracturing method for studying the stress state of a rock massif, *J. Min. Sci.* - 1994. - Vol. 1. - Pp. 3 - 20. [Курленя М.В., Леонтьев А.В., Попов С. Н. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород // *ФТПРПИ*. — 1994. — № 1. — С. 3 – 20.]
18. Leontiev A.V., Popov S.N. Experience of practical application of measuring hydraulic fracturing // *Gornyi Zhurnal.* - 2003. - No. 3. - Pp. 37 – 43. [Леонтьев А.В., Попов С.Н. Опыт практического применения измерительного гидроразрыва // *Горный журнал*. — 2003. — № 3. — С. 37 – 43.]
19. Rubtsova E.V., Skulkin A.A. On the methods of indirect determination of the pressure of closing the crack during measuring hydraulic fracturing // *Interexpo Geo-Siberia.* - 2016. —Т. 2. - No. 3. - Pp. 265 - 269. [Рубцова Е. В., Скулкин А. А. О методах косвенного определения величины давления заклинивания трещины при измерительном гидроразрыве // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. — 2016. —Т. 2. — № 3. — С. 265 – 269.]
20. Рубцова Е.В., Скулкин А.А. Развитие методических основ измерительного гидроразрыва / *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – № 5. – С. 188–191.

© А. А. Скулкин, 2021

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЯЖЕЛЫХ ПНЕВМОМОЛОТОВ ГРАВИТАЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ ПОГРУЖЕНИЯ ОБСАДНЫХ ТРУБ В ГРУНТ

Павел Николаевич Тамбовцев

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 54, оф. 417, кандидат технических наук, старший научн. сотрудник лаборатории моделирования импульсных систем, доцент, тел. (953) 790-94-02, e-mail: tambovskiyp@mail.ru

При вертикальном погружении в грунт стальных труб диаметром 530-1420 мм, длиной до 100-150 м требуются высокие (10 -100 кДж) энергии удара. Создание таких машин на базе существующих конструкций пневмомолотов сдерживается высоким требуемым расходом энергоносителя. В связи с этим актуальна разработка пневмоударного устройства с высокой энергией удара при низком удельном расходе сжатого воздуха. В работе представлены результаты экспериментальных исследований лабораторного образца нового пневмомолота гравитационного типа, изучен рабочий процесс устройства, получены значения энергии удара, частоты ударов, расхода сжатого воздуха в зависимости от давления в магистрали. Опыты подтвердили стабильный циклический режим работы устройства при достижении им высокой энергии удара и низкого удельного расхода энергоносителя при магистральном давлении 0,36 - 0,77 МПа. С использованием критериев динамического подобия разработан типоразмерный ряд тяжелых пневмомолотов, установлены их энергетические показатели, расход сжатого воздуха, дана оценка эффективности использования новых машин.

Ключевые слова: Пневмомолот гравитационный, эксперимент, рабочий цикл, диаграммы давлений, энергия удара, частота ударов, удельный расход, динамическое подобие

EXPERIMENTAL VALIDATION OF PARAMETERS OF HEAVY GRAVITY PNEUMATIC HAMMERS FOR CASING PIPE RAMMING IN SOIL

Pavel N. Tambovtsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Pulse-Generation Modeling Laboratory, Associate Professor, +7 953 790 9402, e-mail: tambovskiyp@mail.ru

Vertical penetration of steel pipes with a diameter of 530–1420 mm and to 100–150 m long in soil requires high blow energy (10–100 kJ). Design of the percussion machines using the available pneumatic hammers is constrained due to the high flow rate of an energy source required. It is of the current concern to design an air-driven percussive tool capable to ensure high blow energy at low flow rate of compressed air. This study describes the testing data of a breadboard model of a new gravity pneumatic hammer. The operating mode of the model hammer is studied, and the blow energies, blow frequencies and compressed air flow rates are evaluated as functions of air pressure in the main line. The tests proved stability of cycling operation of the model tool at the high blow energy and low flow rate of the energy source at the main line pressure of 0.36–0.77 MPa. Using the dynamic similarity criteria, the standard sizes of heavy pneumatic hammers are developed, their blow energy and air flow rate are determined, and the efficiency is evaluated.

Keywords: gravity pneumatic hammer, test, operating cycle, pressure diagrams, blow energy, blow frequency, flow rate, dynamic similarity

Введение

В горной и строительной отрасли распространены работы по вертикальному погружению в грунт стальных труб диаметром 530-1420 мм для образования и обсадки скважин различного назначения, формирования опор, укрепления откосов. Глубина погружения труб достигает 100-150 м. В этих целях применяют ударные машины с гидро-, электро- и пневмоприводом [1-7]. Пневмоударные машины (пневмомолоты) просты и надежны в эксплуатации; машины с энергией удара 0,5-4,0 кДж хорошо себя зарекомендовали в строительстве при забивании труб диаметром 325-820 мм, длиной до 25 м [7-9]. При увеличении диаметров и длины погружаемых труб требуются более высокие энергии ударов (10 - 100 кДж). Создание таких машин на базе существующих конструкций пневмомолотов сдерживают высокий требуемый расход энергоносителя (55-550 м³/мин) и отсутствие высокопроизводительных (свыше 50 м³/мин) передвижных компрессорных станций. Поэтому разработка новых пневмомолотов, обеспечивающих высокие энергии удара и обладающих низким удельным расходом сжатого воздуха актуальна. С этой точки зрения перспективным оказывается пневмоударное устройство гравитационного типа с клапанным воздухораспределением [10, 11]. Компоновка такого устройства в сборе с трубой и его принципиальная схема показаны на рис.1. Ударный узел состоит из корпуса, ударника, накопительной 1 и рабочей 2 камеры, воздухораспределительных клапанов j_{12} , j_{23} , магистрального j_{01} и выхлопных j_{3a} каналов. Прямой ход ударника осуществляется за счет гравитации, обратный ход – за счет давления сжатого воздуха в рабочей камере 2.

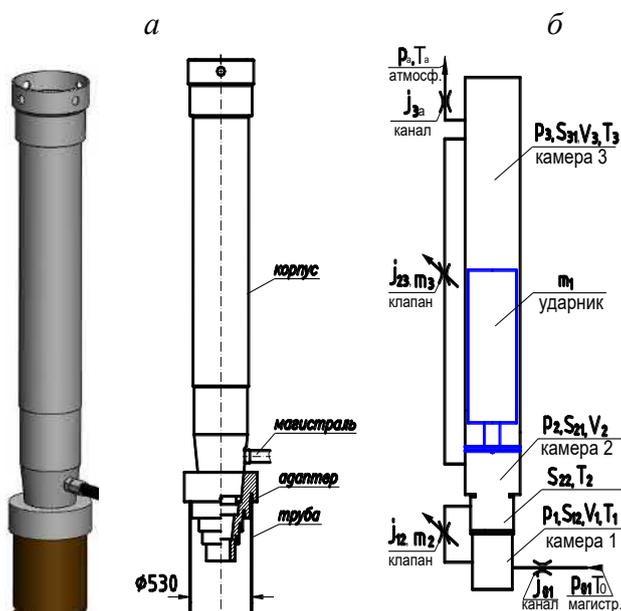


Рис. 1. Пневмоударное устройство гравитационного типа для погружения обсадных труб:

а – компоновка промышленного варианта пневмомолота при соединении с трубой, б – принципиальная схема устройства с обозначением основных параметров (S_{ij} - эффективные площади подвижных элементов, j_{ij} - площади проходных сечений из i -й камеры в j -ю камеру, V_i - объем i -камеры, p_i , T_i - давление и температура в i -й камере, магистрали, атмосфере, m_i - массы ударника, клапанов)

Задачи и методы экспериментальных исследований

Цель экспериментальных исследований – проверить работоспособность нового устройства, выявить особенности его работы, установить показатели рабочего цикла и оценить эффективность воздухораспределительной системы. В задачи экспериментов входило: запись диаграмм давления в камерах машины, диаграмм расхода воздуха, измерение хода ударника при различных значениях давления в магистрали.

Серии экспериментов проведены на стенде (рис.2), включающем ударный узел, работопоглотитель и элементы измерительной системы. Массогабаритные характеристики ударного узла: диаметр 105 мм, длина 1900 мм, общая масса устройства 55 кг. Значения конструктивных параметров: $m_1 = 12,8 \text{ кг}$, $m_2 = 0,17 \text{ кг}$, $S_{21} = 48,5 \text{ см}^2$, $S_{12} = S_{22} = 16,2 \text{ см}^2$, $j_{01} = 0,38 \text{ см}^2$, $j_{12} = 2,68 \text{ см}^2$, $j_{23} = 5,76 \text{ см}^2$, $j_{3a} = 7,0 \text{ см}^2$, $V_1 = 150 \text{ см}^3$, $V_2 = 50 \text{ см}^3$, $V_3 = 8900 \text{ см}^3$.

Диаграммы давления и расхода позволяют оценить эффективность и установить основные параметры рабочего цикла, выявить ее достоинства и недостатки [12, 13]. Для снятия диаграмм давления, расхода сжатого воздуха применяли датчики давления 1-3 (рис. 2), датчик расхода 4, аналого-цифровой преобразователь 5, персональный компьютер 6 с программным обеспечением обработки данных.

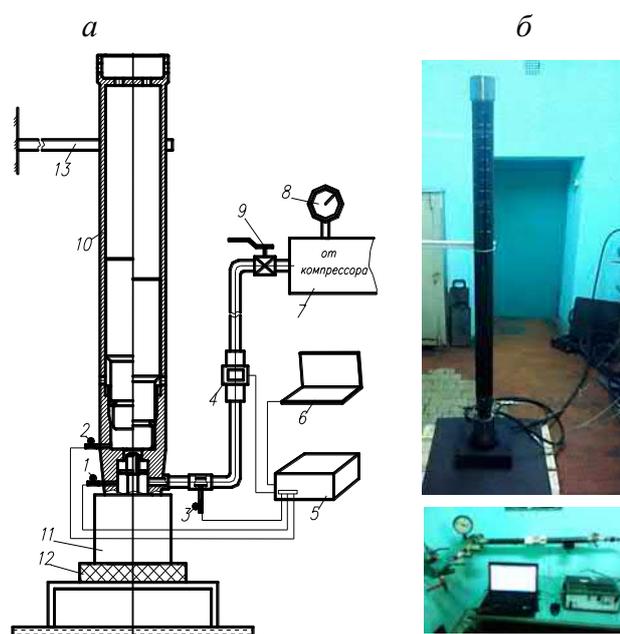


Рис. 2. Экспериментальные исследования лабораторного образца:

а – схема стенда, б - внешний вид лабораторного образца, элементы измерительная система (манометр, расходомер, АЦП, ПК): 1-3 – датчики давления в камерах и магистрали (10 bar, НВМ Р8 АР), 4 – датчик расхода сжатого воздуха (Digital flow switch PF2A706H –F14-28), 5 – АЦП (Е-440), 6 – ПК, 7 – ресивер, 8 – манометр, 9 – магистральный кран, 10 – ударный узел, 11 – адаптер, 12 – работопоглотитель, 13 – хомут-держатель.

Формула для определения среднего абсолютного расхода по показаниям

расходомера имеет вид:

$$Q = \frac{1000}{T_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{и}}} G(t) \cdot dt \quad (1)$$

где $T_{\text{ц}}$ – продолжительность цикла, с; G – мгновенный расход, л/мин; t – время, с; $t_{\text{и}}$ – период импульса расхода за удар, с.

Измерение рабочего ход ударника осуществляли с помощью видеокамеры, для этого в корпусе выполнено продольное отверстие с разметкой длины габаритного хода, позволяющее наблюдать за движением ударника в период цикла.

Значения энергии удара определялись по формуле:

$$E_{\text{уд}} = E \cdot k_{\text{п}} = m_1 \cdot g \cdot l \cdot k_{\text{п}} = m_1 \cdot g \cdot l \cdot \left(1 - \frac{p_{\text{max}} \cdot S \cdot \Delta x}{2 \cdot m_1 \cdot g \cdot l} \right), \quad (2)$$

где E – потенциальная энергия ударника; $k_{\text{п}}$ – коэффициент потерь энергии ударника от давления сжатого воздуха при впуске до момента удара, m_1 – масса ударника, g – ускорение свободного падения, l – длина рабочего хода, p_{max} – максимальное давление в рабочей камере в момент удара, S – эффективная площадь ударника, Δx – расстояние между положениями ударника в момент начала впуска сжатого воздуха в рабочую камеру и в момент начала удара. Потери на трение и сопротивление воздуха до момента впуска в рабочую камеру не учитываются.

Удельный расход сжатого воздуха на единицу кинетической энергии, сообщенной ударнику в период обратного хода до начала выхлопа:

$$q_1 = \frac{Q}{60 \cdot m_1 \cdot g \cdot l_2 \cdot n}, \quad (3)$$

где l_2 – обратный ход ударника с момента начала выхлопа до верхней точки его подъема, n – частота ударов.

Удельный расход на единицу ударной мощности устройства (общий удельный расход):

$$q_2 = \frac{Q}{60 \cdot N} = \frac{Q}{60 \cdot n \cdot E_{\text{уд}}} = \frac{Q}{60 \cdot n \cdot m_1 \cdot g \cdot (l_1 + l_2) \cdot k_{\text{п}}}, \quad (4)$$

где l_1 – обратный ход ударника до начала выхлопа.

Результаты экспериментов и их анализ

Проведено несколько серий опытов работы ударного узла при избыточном давлении в магистрали 0,36-0,77 МПа, экспериментальные диаграммы представлены на рис. 3-4, они отражают рабочий процесс устройства при его запуске и в установившемся режиме работы. Опыты показали, что устройство работает циклично и в режиме близком к оптимальному, то есть рабочая камера сообщает ударнику заданную кинетическую энергию, воздухораспределительный механизм исключает непроизводительные потери сжатого воздуха после выхлопа. Из диаграмм давления следует, что до начала впуска сжатого воздуха избыточное давление в камере 2 отсутствует ($p_2=p_a$), в период удара давление $p_2 \leq 4,2 \dots 4,5$ МПа, поэтому потери кинетической энергии ударника составляют не более 3,2...3,4 % от потенциальной энергии E , коэффициент $\kappa_n \approx 0,97$. В таблице 1 приведены основные показатели рабочего цикла, полученные при обработке экспериментальных данных.



Рис. 3. Экспериментальные диаграммы давлений, при магистральном давлении 0,60 МПа:

а - рабочий процесс при запуске и в установившийся режиме, в – период разгона ударника при обратном ходе; $p_i(t)$ – давления сжатого воздуха в i -камерах, в магистрали.

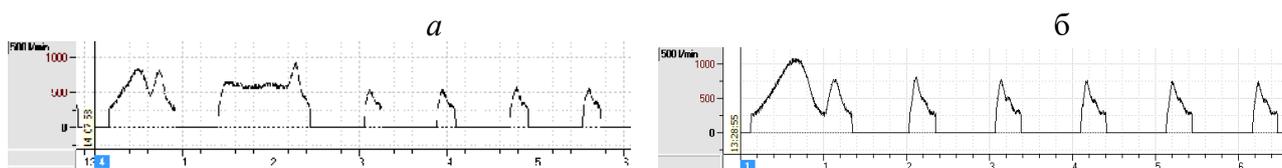


Рис. 4. Диаграммы расхода сжатого воздуха $G(t)$ опытного образца гравитационного пневмоударного устройства (показания в программе Power Graph):

а – при магистральном давлении $p=0,40$ МПа, б – $p=0,60$ МПа,

На рис.5 представлены графики технических характеристик устройства в зависимости от давления p_0 : рабочий ход l ударника (рис.5а); частота ударов n (рис.5б); абсолютный расход сжатого воздуха Q (рис.5в); энергия удара A (рис.5г), ударная мощность N , удельный расход q_1 при разгоне ударника (рис.5д), общий удельный расход сжатого воздуха q_2 . Графики показывают, что при изме-

нении p_0 от 0,4 до 0,7 МПа ход ударника линейно увеличивается от 0,80 до 1,38 м, энергия удара - от 97 до 168 Дж, частота ударов снижается с 1,22 Гц до 0,94 МПа, ударная мощность растет от 119 до 158 Вт. Абсолютный расход сжатого воздуха находится в пределах $Q=0,096...0,134$ об/мин, удельные расходы $q_1 = (14,1...16,07) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$, $q_2 = (13,5...15,3) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$.

Таблица 1

Экспериментальные показатели рабочего цикла устройства

Показатели	Значения					
Магистральное давление (изб.) p_0 , МПа	0,36	0,4	0,5	0,6	0,7	0,77
Продолжительность цикла $T_{ц}$, с	0,65	0,82	0,93	1,00	1,06	1,09
Ход ударника l , с	0,5	0,8	1,0	1,2	1,38	1,44
Скорость удара v , м/с	3,09	3,42	4,40	4,78	5,12	5,23
Абсолютный расход, Q , м ³ /мин	0,13	0,096	0,11	0,134	0,129	0,152
Энергия удара $E_{уд}$, Дж	61	97,4	124	146	168	175
Частота ударов n , Гц	1,54	1,22	1,08	1,00	0,94	0,92
Ударная мощность N , Вт	94	119	134	146	158	161
Удельный расход $q_1 \times 10^{-6}$, м ³ /Дж*	27,5	14,71	16,0	16,02	14,10	16,2
Удельный расход $q_2 \times 10^{-6}$, м ³ /Дж**	23,2	13,46	14,8	15,30	13,60	15,73

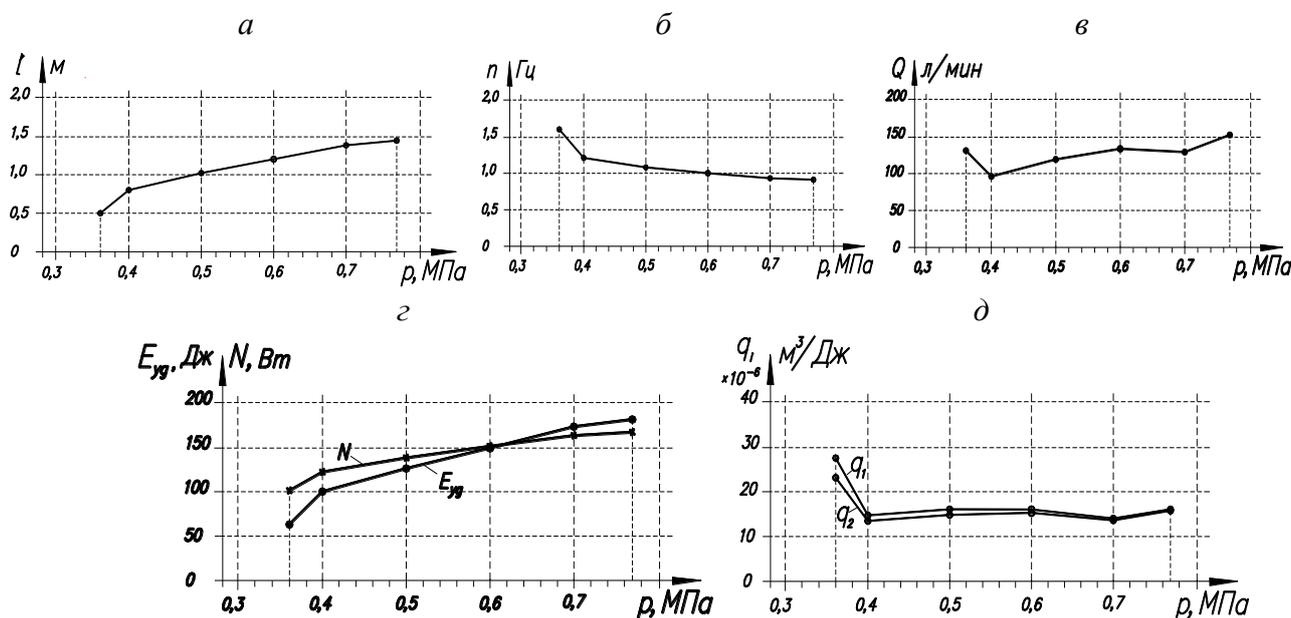


Рис. 5 – Экспериментальные зависимости технических характеристик устройства от магистрального давления (p_0):

a - рабочий ход (l) ударника, $б$ - частота ударов (n), $в$ - расход сжатого воздуха (Q), $г$ - энергия удара (E), ударная мощность (N); $д$ - удельные расходы сжатого воздуха (q_1, q_2).

Типоразмерный ряд новых пневмомолотов в рамках подобия

В качестве основы для создания типоразмерного ряда тяжелых пневмомолотов нового типа принят рассмотренный лабораторный образец устройства. При переходе от него к новой машине необходимо все линейные размеры изменить в i -раз, при этом скорость, сообщаемая ударнику при разгоне до начала выхлопа, и соответственно, перемещение l_2 ударника с момента начала выхлопа до верхней точки обратного хода, будут неизменными. Удельный расход q_1 сжатого воздуха не изменится, удельный расход q_2 изменится, их соотношения получим из формул (3, 4):

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{1}{\left(\frac{l_1}{l_2} + 1\right) \cdot k_{\Pi}}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что значение q_2 / q_1 будет уменьшаться при увеличении l_1 / l_2 (рис. 6). Это значит, что с увеличением типоразмера пневмомолота будет понижаться общий удельный расход q_2 . Так, по сравнению с лабораторным образцом пневмомолота ($m_1 = 12,8 \text{ кг}$, $q_2/q_1=0,94$) удельный расход q_2 подобного пневмомолота с $m_1 = 500 \text{ кг}$ ($q_2/q_1=0,77$) становится меньше на 18 %, с $m_1 = 1000 \text{ кг}$ ($q_2 / q_1=0,72$) меньше на 23 %, при $m_1 = 2000 \text{ кг}$ ($q_2 / q_1=0,67$) – на 29 %, при $m_1 = 5000 \text{ кг}$ ($q_2 / q_1=0,59$) – на 37 %, при $m_1 = 10000 \text{ кг}$ ($q_2 / q_1=0,56$) - на 40 %, при $m_1 = 20000 \text{ кг}$ ($q_2 / q_1=0,53$) - на 44%.

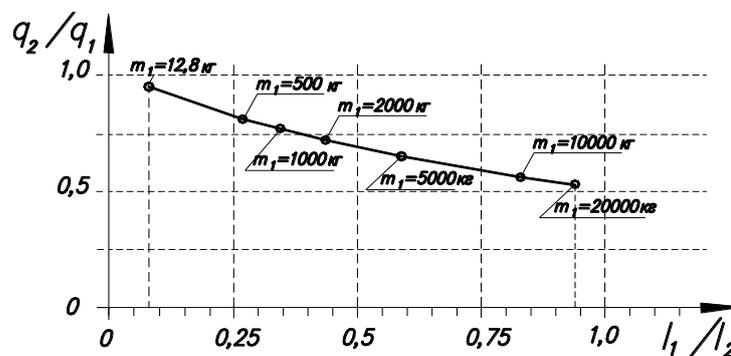


Рис. 6. Зависимость соотношения удельных расходов q_2 / q_1 от соотношения длин l_1 / l_2 перемещения ударника при давлении в магистрали $p = 0,6 \text{ МПа}$ ($l_2 = 1,11 \text{ м}$, $q_1 = 16,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$)

Порядок расчета основных конструктивных и технических параметров тяжелых пневмомолотов произведен в следующей последовательности:

1. Для базовой модели приняты единицы измерения [15]: единица массы $m_6^* = m_{16}$ – масса ударника ($m_{16} = 12,8 \text{ кг}$); единица перемещения ударника $l_6^* = l_{16}$ –

обратный ход ударника до начала выхлопа ($l_{1\sigma} = 0,09$ м); единица давления $p^* = p_0$ – давление в магистрали ($(0,5..0,7) \cdot 10^6$ Па); единица площади $S_6^* = S_{216}$ – эффективная площадь ударника ($S_{216} = 48,5 \cdot 10^{-4}$ м²); единица времени $t_6^* = \sqrt{m_1^* \cdot l_1^* / (p^* \cdot S^*)} = 0,0199$ с (при $p_0 = 0,6$ МПа).

Комплексный критерий подобия ($\beta = 169,6$) рассчитан по формуле:

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot R \cdot T_o^* \cdot \frac{m_1^*}{p_o^* \cdot S_m^* \cdot l_1^*}}, \quad (6)$$

где k - показатель адиабаты (1,4), R - газовая постоянная, T_o - температура сжатого воздуха в магистрали (293° К).

2. Исходя из ограничений по габаритам и требуемой энергии удара заданы массы ударника, установлены масштаб и конструктивные параметры нового типоразмера машины, определены единицы измерения (m_n^* , l_n^* , S_n^* , t_n^*).

3. По формулам, приведенным в таблице 2 определены технические показатели пневмомолотов с массами ударника 500, 1000, 2000, 5000 кг, в таблице 3 представлены результаты расчетов.

Таблица 2

Зависимости для расчета показателей типоразмера пневмомолота

Показатели	Формула для расчета	№
Энергия удара	$E_{уд.н} = m_{1.н} \cdot g \cdot (l_{1.н.} + l_2) \cdot k_n$	(7)
Скорость удара	$v_n = \sqrt{2 \cdot E_{уд} / m_1}$	(8)
Прямой и обратный ход	$l_{н.н.} = l_{о.н.} = l_{1.н.} + l_2$	(9)
Обратный ход ударника до начала выхлопа	$l_{1н} = l_{1\sigma} \cdot i$	(10)
Обратный ход ударника с момента начала выхлопа до верхней точки	$l_2 = 0,91; 1,11; 1,29$ м (при $p = 0,5; 0,6; 0,7$ МПа)	(11)
Период цикла	$T_{ц.н} = t_{о.н.} + t_{н.н.}$	(12)
Период прямого хода	$t_{н.н.} = \sqrt{2l_{н.н.} / g}$	(13)
Период обратного хода	$t_{о.н.} = t_{1.н.} + t_2$	(14)
Период обратного хода ударника до выхлопа	$t_{1.н.} = \bar{t}_1 \cdot t_n^*$	(15)
Период перемещения ударника с момента начала выхлопа до верхней точки	$t_2 = \sqrt{2l_2 / g}$	(16)
Безразмерный параметр времени	$\bar{t}_1 = t_{1\sigma} / t_6^*$	(17)
Частота ударов, ударная мощность	$n_n = 1 / T_{ц.н.}$ $N_n = n_n \cdot E_{уд}$	(18)
Расход сжатого воздуха	$Q_n = q_1 \cdot m \cdot g \cdot l_2 \cdot 60 \cdot n_n$	(19)
Удельный расход сжатого воздуха на единицу кинетической энергии, сообщенной ударнику в период обратного хода до начала выхлопа	$q_1 = \frac{Q_6}{60 \cdot m \cdot g \cdot l_2 \cdot n_6}$	(20)
Фактический удельный расход на единицу мощности нового типоразмера пневмомолота	$q_{2н} = \frac{Q_n}{60 \cdot N_n}$	(21)

Таблица 3

Технические показатели типоразмерного ряда новых пневмомолотов

Показатели	Значения											
	500			1000			2000			5000		
m_1 , кг	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7
p_o , МПа	5,78	6,73	7,59	12,3	14,22	15,94	26,5	30,3	33,7	74,60	84,12	92,7
$E_{уд.н.}$, кДж				2			5	5	8			8
l_n , м	1,215	1,415	1,595	1,29	1,495	1,675	1,39	1,59	1,77	1,568	1,768	1,95
				5			5	5	5			0
$l_{л.м}$	0.305			0,385			0,485			0,658		
l_2 , м	0,91	1,11	1,29	0,91	1,11	1,29	0,91	1,11	1,29	0,91	1,11	1,29
n_n , Гц	0,92	0,88	0,82	0,88	0,84	0,80	0,83	0,80	0,76	0,76	0,74	0,71
N_n , кВт	5,32	5,92	6,22	10,8	11,94	12,75	22,0	24,2	25,6	56,70	62,25	65,8
				4			3	8	7			7
v_n , м/с	4,81	5,19	5,51	4,96	5,33	5,64	5,15	5,51	5,81	5,46	5,80	6,09
T_u , с	1,09	1,14	1,22	1,33	1,194	1,25	1,20	1,25	1,31	1,32	1,36	1,41
Q_n , м ³ /мин	4,03	4,59	5,12	7,72	8,78	9,99	14,5	16,7	18,9	33,28	38,42	44,2
							5	2	9			2
$q_1 \times 10^{-6}$, м ³ /Дж	16,37	16,00	16,45	16,3	16,00	16,45	16,3	16,0	16,4	16,37	16,00	16,4
				7			7	0	5			5
$q_{2н} \times 10^{-6}$, м ³ /Дж	12,6	12,9	13,7	11,9	12,3	13,1	11,0	11,5	12,3	9,8	10,4	10,7

В таблице 4 представлены для сравнения основные технические показатели новых пневмомолотов и их аналогов с пневматическим, электрическим и гидравлическим приводом

Таблица 4

Сравнение технических показателей пневмомолотов с аналогами

Показатели	Типы молотов									
	Гравитац. пневмомолот (ГПМ-500)	Пневмомолот Т-500 (Россия) [16]	Пневмомолот М-400 (Россия) [8,17]	Гравитац. пневмомолот ГПМ-1000	Пневмомолот Т-1000 (Россия) [16]	Электромагнитн. молот МЭМ-10 (Россия) [2]	Гравитац. пневмомолот ГПМ-5000	Гидромолот (Корея) Bruce SGH-0512 [18]	Гидромолот (Нидерланды) Hydrohammer S-90 [19,20]	Электромагнитный молот МЭМ-100 (Россия) [2]
Группа типоразмера	1 ударник 500-570 кг			2 840-1000 кг			3 4500-6000 кг			
m_1 , кг	500	500	570	1000	1000	840	5000	5000	4500	6000
p_o , МПа	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	-	0,6	23,0	30,0	-
$E_{уд.}$, кДж	6,73	5,00	4,00	14,22	11,5	10,0	84,12	59,0	90,0	100,0
n , Гц	0,88	1,00	2,43	0,84	0,70	1,50	0,74	0,66	0,76	0,40
N , кВт	5,96	5,10	6,22	11,94	8,05	15,00	62,65	38,90	40,0	40,0
$N_{потр.}$, кВт*	7,65	9,73	33,3	14,63	18,3	50,0	64,0	-	-	250
Q_n , м ³ /мин	4,59	6,00	20,0	8,78	11,0	-	38,42	-	-	-
$q_{2н} \times 10^{-6}$, м ³ /Дж	12,9	19,6	34,0	12,3	22,8	-	10,4	-	-	-
v_n , м/с	5,19	4,47	3,74	5,33	4,80	4,88	5,80	4,86	6,33	5,77
$P_{общ. потр.}$, кВт**	30,6	40,0	133,3	58,5	73,3	50,0	256,1	193	167	250
M , т***	1,55	1,30	1,56	2,80	2,50	2,65	11,0	8,0	14,2	18,6
Общ. к. п. д., %****	19,4	12,7	7,3	20,4	11,0	30,0	24,5	20,2	24,0	16,0

Выводы

Лабораторный образец пневмоударного устройства показал близкий к оптимальному и стабильный режим работы при магистральном давлении 0,4-0,7 МПа. Для обеспечения такого режима, при разработке нового типоразмеры молота необходимо чтобы величина безразмерного комплексного критерия подобия β , отражающего соотношения между массой, рабочей площадью, ходом ударника и магистральным давлением сжатого воздуха составляла 170.

При создании пневмомолотов с массами ударника 500, 1000, 2000, 5000 кг энергия удара составит соответственно 6,73 кДж (5,78-7,59 кДж), 14,22 кДж (12,32-15,94 кДж), 30,35 кДж (26,55-33,78 кДж), 84,12 кДж (74,60 – 92,78 кДж) при магистральном давлении 0,6 МПа (0,5-0,7 МПа), частота ударов 0,88-0,74 Гц (0,71-0,92 Гц). Для эксплуатации пневмомолотов при магистральном давлении 0,6 МПа достаточно использовать компрессорное оборудование, обеспечивающее подачу сжатого воздуха 4,6 м³/мин ($m_1=500$ кг), 8,8 м³/мин ($m_1=1000$ кг), 16,8 м³/мин ($m_1=2000$ кг), 38,5 м³/мин ($m_1=5000$ кг).

Особенностью новых пневмомолотов является низкий удельный расход сжатого воздуха, что указывает на высокую эффективность воздухораспределительной системы. Общий удельный расход q_2 находится в пределах $(9,8..13,7) \cdot 10^{-6}$ м³/Дж в зависимости от магистрального давления и массы ударника; с увеличением типоразмера пневмомолота q_2 существенно понижается.

Значения общего к.п.д. (с учетом силового оборудования), ударной мощности предлагаемых пневмомолотов в большинстве случаев превосходят значения отечественных и зарубежных аналогов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Червов В.В. Расширение области применения пневмомолотов с переменной структурой ударной мощности //Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019. Международный научн. конгр. Сборник материалов в 2-х т. – Новосибирск: СГГА, 2019. Т.2. № 5 – С. 103-110.
2. Симонов Б.Ф., Погарский Ю.В. Кадышев А.И., Вовк В.С. Электромагнитные молоты для морского нефтегазопромыслового строительства // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2019 - № 2 (12). – С. 59-65.
3. Червов В.В. Определение основных параметров пневматического молота для забивания в грунт труб большого диаметра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018. Международный научн. конгр. Сборник материалов. – Новосибирск: СГГА, 2018. Т.6. – С. 318-328.
4. Кондратенко А. С., Шахторин И. О. Разработка технических решений бурения скважин с одновременной обсадкой для предварительной дегазации угольных пластов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Сборник материалов. – Новосибирск — 2018. — т. 5, № 1. — С. 252 – 256.
5. 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.
6. 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

7. Григоращенко В.А. Прокладка металлических труб пневмопробойниками // Препринт № 38. - Новосибирск — 1990, - 32 с.
8. 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.
9. 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.
10. Патент РФ № 2440460 “Пневмоударная машина для забивания инструментов в грунт” автор Тамбовцев П.Н., опубл. 20.01.2012 г. (8стр.).
11. Патент РФ на ПМ № 143973: «Гравитационная пневмоударная машина» // автор П. Н. Тамбовцев, опубл. 10.08.2014, Бюл. №22.
12. Есин Н.Н. Методика исследования и доводки пневматических молотков, – Новосибирск, 1965, - С. 25-26, - 76с.
13. Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Тупицын К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия, - Новосибирск, 1985, -134 с.
14. Программное обеспечение «PowerGraph» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.powergraph.ru>, (12.05.2021).
15. Петреев А.М., Мюнцер Е.Г. О системе безразмерных параметров пневмоударных устройств / Ручные пневматические машины ударного действия // Сборник научных трудов. – Новосибирск, 1982, - С. 16-27.
16. Червов В.В. Совершенствование конструкции пневмомолота для забивания в грунт вертикальных труб большого диаметра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020. Международный научн. конгр. Сборник материалов. – Новосибирск: СГГА, 2020. Т.2. – С. 219-225.
17. Машина для забивания труб М-400 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pnevmoteh.ru>, (12.05.2021).
18. КОПЕРНИК. Гидравлический молот Bruce SGH-0512. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.koper.pro> (12.05.2021).
19. HYDROHAMMER S-90. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ihsciqip.com> (12.05.2021).
20. Характеристики гидростанций для HYDROHAMMER S. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ihcees.fr/en/products/ihc-equipments/power-packs/> (12.05.2021).

© П. Н. Тамбовцев, 2021

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПОРОДНОЙ МАССЫ ПО ВРАЩАЮЩЕМУСЯ ТРУБОПРОВОДУ

Гил Нам Хан

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник группы прикладной геомеханики, тел. (383) 205-30-30, доп. 193, e-mail: khan.igd@gmail.com

Евгений Павлович Русин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник группы прикладной геомеханики, тел. (383) 205-30-30, доп. 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

Численно методом дискретных элементов исследовано влияние угловой скорости вращающейся вокруг своей продольной оси горизонтальной трубы и формы ее поперечного сечения на эффективность пневмотранспортирования по ней сыпучего материала. В качестве условия эффективного пневмотранспортирования принимается нахождение в поперечном сечении трубы в течение одного ее оборота максимального количества бесконтактных, то есть не контактирующих с другими частицами материала и с трубой, частиц. Предложен метод поиска бесконтактных частиц, позволяющий подсчитывать их количество при фиксированных углах поворота трубы в процессе ее вращения. Для различных форм поперечного сечения определены оптимальные угловые скорости, при которых среднее число бесконтактных частиц в сечении максимально. Результаты исследования могут быть использованы для повышения производительности выноса продуктов разрушения при бурении горизонтальных скважин в горных породах и грунтах.

Ключевые слова: бурение, буровая мелочь, пневмотранспорт, вращающийся трубопровод, метод дискретных элементов, бесконтактные частицы

NUMERICAL SIMULATION OF THE BROKEN ROCK MASS TRANSPORTATION IN A ROTATING PIPELINE

Guil Nam Khan

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, PhD, Senior Researcher, Applied Geomechanics Group, phone: (383) 205-30-30, ext. 193, e-mail: khan.igd@gmail.com

Evgeny P. Rusin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, PhD, Senior Researcher, Applied Geomechanics Group, phone: (383) 205-30-30, ext. 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

The impact of the angular velocity of a horizontal pipe rotating around its longitudinal axis and the shape of its cross-section on the efficiency of pneumatic conveying of bulk material in it has been numerically investigated by the discrete elements method. The maximum number of non-contact particles, that is, particles being not in contact with other material particles and with the pipe, in the cross

section of the pipe during one its revolution, is assumed the condition for effective pneumatic conveying. A method for searching for non-contact particles is proposed, which makes it possible to calculate their number at fixed pipe position angles during its rotation. For various cross-sectional shapes, the optimal angular velocities are determined at which the average number of non-contact particles in the cross-section is maximum. The results of the study can be used to increase the productivity of the removal of products of destruction when drilling horizontal boreholes in rocks and soils.

Keywords: drilling, drill cuttings, pneumatic transport, rotating pipe, discrete element method, non-contact particles

Введение

При бурении скважин в горных породах и грунтах важно обеспечить эффективное удаление продуктов разрушения из скважины. Недостаточная производительность выноса буровой мелочи приводит к заштыбовке забоя скважины, ухудшению процесса скола (резания) породы, ее переизмельчению с одновременным интенсивным износом инструмента, повышению энергоемкости и снижению механической скорости бурения. Также может произойти закупоривание шламотранспортного тракта и, как следствие, остановка процесса бурения [1]. При вертикально направленном бурении удаление выбуренных частиц не представляет особой сложности благодаря небольшой площади для скопления шлама и движению транспортирующей фазы в направлении противоположном гравитации [2]. Процесс существенно затрудняется в случае бурения горизонтальных скважин [2–7], особенно в грунтах [8, 9].

Вращение горизонтально расположенной транспортной магистрали вокруг собственной продольной оси значительно улучшает перемещение материала в ней. При этом для каждого набора условий бурения существует оптимальный диапазон скорости вращения, в котором обеспечивается наибольшая производительность транспортирования частиц [10–14]. В этом отношении важна также форма поперечного сечения трубопровода, поскольку она влияет на характеристику потока транспортирующей фазы [15, 16] и на распределение частиц в нем.

Именно поэтому возникла задача исследовать влияние формы поперечного сечения и скорости вращения трубопровода на эффективность транспортирования частиц сыпучего материала в нем.

Метод исследования и постановка задачи

Численное исследование в данной работе ведется в плоской постановке с использованием разработанной в ИГД СО РАН компьютерной программы PM2D [17], основанной на методе дискретных элементов с линейной вязко-упругой моделью взаимодействия частиц сыпучего материала [18–21]. Моделируется вращение горизонтальных труб вокруг собственной продольной оси. Для труб с различными формами поперечного сечения определяются скорости вращения, при которых в поперечном сечении в течение одного оборота находится максимальное количество бесконтактных, то есть не контактирующих с другими частицами материала и с трубой, частиц. Считается, что при выполнении этого условия про-

изводительность пневмотранспортирования сыпучего материала максимальна. В расчетах частица считается бесконтактной, если минимальный зазор δ между ней и окружающими ее соседями составляет не менее 1 % от ее размера. Связано это с тем, что при меньшем значении зазора δ в течение вращения трубы бесконтактные частицы вступают в контакт с другими частицами, переходя в контактное состояние, и находятся в нем большую часть времени.

На рис. 1 приведены различной формы поперечные сечения труб (плоские емкости), на 30% заполненные сыпучим материалом Ω . Размеры квадратного, прямоугольного и эллиптического сечений выбраны из условия, что они вписываются в круглое сечение радиусом r . Материал Ω моделируется совокупностью N частиц – дискретных элементов (ДЭ) Ω_i ($i = 1, 2, \dots, N$). Под ними понимаются цилиндры единичной высоты, оси которых ортогональны плоскости Oxy в выбранной декартовой системе координат $Oxyz$, начало O которой совмещено с центром масс емкости. Плоскость Oxy проходит через центры масс Ω_i , ось Oz направлена перпендикулярно плоскости рисунка. Каждой частице Ω_i с радиусом r_i присваиваются физико-механические характеристики: плотность ρ_i , модуль упругости E_i , угол контактного трения φ_i и коэффициент e_i восстановления скорости частицы.

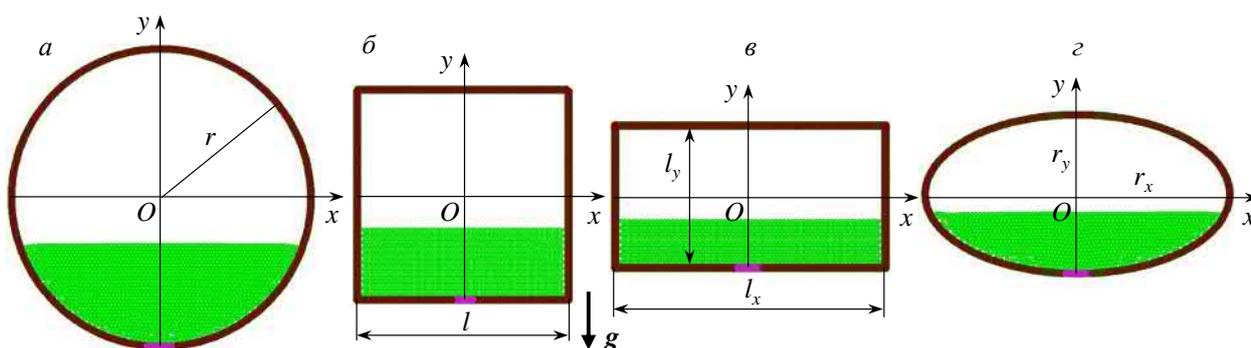


Рис. 1. Начальные положения плоских емкостей, на 30% заполненных сыпучим материалом:

a – окружность радиусом r ; b – квадрат со стороной l ; v – прямоугольник со сторонами l_x, l_y ; z – эллипс с полуосями r_x и r_y ; g – ускорение свободного падения

Емкости моделируются граничными дискретными элементами (ГДЭ) радиусом r_b . Отличаются они от ДЭ тем, что на них задаются краевые условия:

$$\omega_{bj} = \omega, \quad (1)$$

где ω_{bj} – угловая скорость ГДЭ относительно оси Oz , $j = 1, \dots, N_b$, N_b – число ГДЭ; ω – константа. При этом с угловой скоростью ω вокруг оси Oz вращаются все точки граничных дискретных элементов, а не только их центры. Ускорение свободного падения g направлено против оси Oy .

Результаты численного моделирования и их обсуждение

Во всех приведенных ниже расчетах радиус и физико-механические характеристики ДЭ приняты следующими: $r_i = 1.25$ мм, $\rho_i = 2500$ кг/м³; $E_i = 10$ ГПа; $\varphi_i = 26^\circ$; $e_i = 0.3$. Радиус r_b ГДЭ принят равным 2.50 мм; расстояние между соседними ГДЭ выбрано равным 1.25 мм, т.е. они накладываются друг на друга. Сделано это для уменьшения неровностей границы емкости, созданной граничными дискретными элементами. Физико-механические характеристики ГДЭ выбраны теми же, что и у ДЭ. Расчеты проводились с угловыми скоростями ω от 1 до 3 об/с с интервалом 0.5 об/с. Размеры емкостей круглой, квадратной, прямоугольной и эллиптической формы приняты следующими: $r = 100$ мм; $l = 2r/\sqrt{2}$; $l_x = 2r/\sqrt{1.25}$, $l_y = 0.5l_x$; $r_x = r$, $r_y = 0.5r_x$. При заданных значениях размеров квадратная, прямоугольная и эллиптическая емкости вписываются в круглую емкость.

На рис. 2 показаны положения частиц материала и их векторы скорости на стадии поворота емкостей различной формы на угол $\alpha = 120^\circ$.

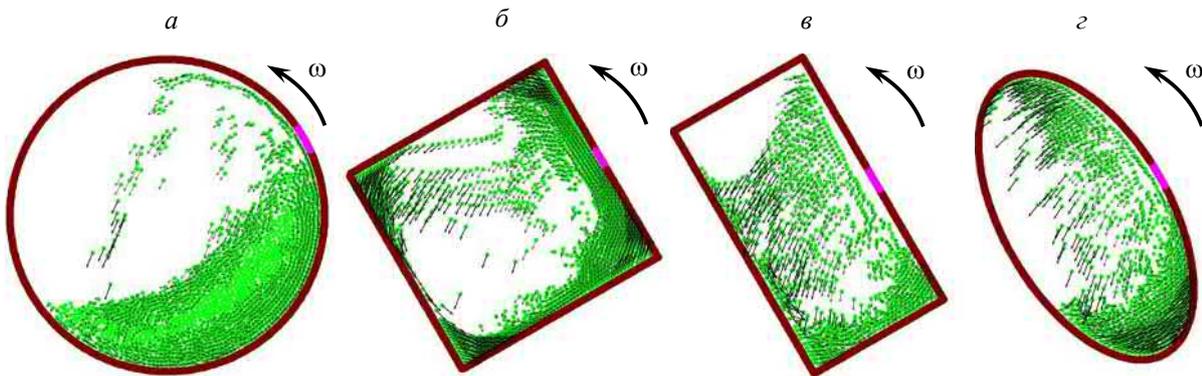


Рис. 2. Поля линейных скоростей частиц сыпучего материала в плоских емкостях различной формы с оптимальными для них угловыми скоростями ω при $\alpha = 120^\circ$: а – $\omega = 2.5$ об/с; б – $\omega = 2.0$ об/с; в – $\omega = 1.5$ об/с; z – $\omega = 2.0$ об/с

Приведенным на рис. 2 картинам деформирования сыпучего материала соответствуют угловые скорости емкостей: $\omega = 2.5$ об/с для круглой; $\omega = 2.0$ об/с для квадратной; $\omega = 1.5$ об/с для прямоугольной; $\omega = 2.0$ об/с для эллиптической. Из расчетов следует, что в данных случаях число частиц, в среднем в течение всего процесса вращения находящихся в бесконтактном состоянии, максимально. Это подтверждают графики и таблица, приведенные ниже.

На рис. 3 представлены графики зависимости относительного числа $n = 100 N_a / N$ (%) бесконтактных частиц от угла α поворота круглой, квадратной, прямоугольной и эллиптической формы емкостей при их оптимальных угловых скоростях ω . Здесь N_a – число бесконтактных частиц, N – число всех частиц сыпучего материала. Из рис. 3 следует, что в среднем в течение одного оборота ем-

кости наибольшего значения число n достигает при разных угловых скоростях ω для емкостей различной формы: $\omega = 2.5$ об/с для круглой; $\omega = 2.0$ об/с для квадратной; $\omega = 1.5$ об/с для прямоугольной; $\omega = 2$ об/с для эллиптической.

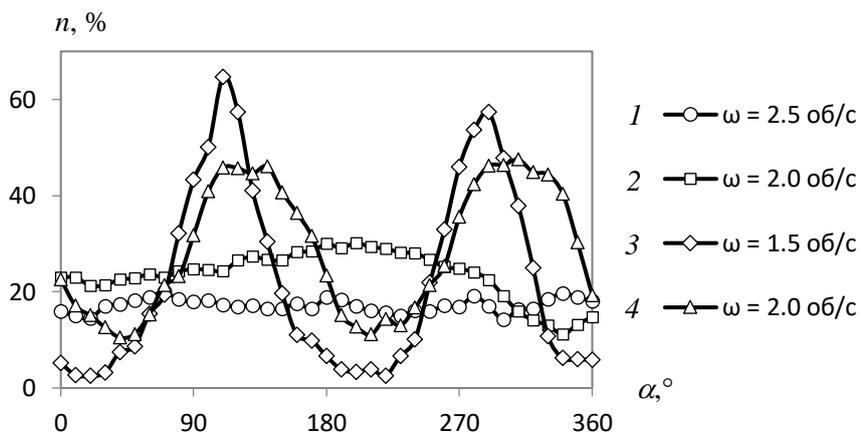


Рис. 3. Распределение относительного числа n бесконтактных частиц в диапазоне от 0 до 360° угла поворота α емкостей различной формы при их оптимальных угловых скоростях ω :

1 – окружность; 2 – квадрат; 3 – прямоугольник; 4 – эллипс

В круглой емкости распределение относительного числа n бесконтактных частиц в течение ее полного оборота примерно равномерное. Связано это с тем, что окружность имеет бесконечное число осей симметрии, а небольшие отклонения n от его среднего значения вызваны периодическим проскальзыванием сыпучего материала по внутренней поверхности емкости.

В квадратной емкости распределение числа n более неравномерное, чем в круглой емкости. Происходит это из-за того, что в квадратной емкости четыре оси симметрии, и при ее вращении углы квадрата служат опорой для сыпучего материала и не позволяют ему проскальзывать по поверхности емкости при больших ее углах поворота, чем в емкости круглой формы на участках подъема материала. Соответственно срыв сыпучего материала с поверхности квадратной емкости происходит более интенсивно, чем в круглой емкости.

В прямоугольной емкости распределение числа n еще более неравномерное, чем в квадратной емкости. Максимальных своих значений $\sim 60\%$ достигает оно при угловой скорости $\omega = 1.5$ об/с и угле поворота емкости $\alpha \approx 110^\circ$ и $\alpha \approx 290^\circ$, т.е. после достижения длинной стороной емкости вертикального положения, когда частицы сыпучего материала начинают интенсивно отделяться от длинной стенки емкости (рис. 2в). При приближении длинной стороны к горизонтальному положению происходит консолидация сыпучего материала и соответственно уменьшается доля бесконтактных частиц.

В эллиптической емкости с соотношением полуосей $r_x/r_y = 2$ число n достигает своих пиковых значений $\sim 45\%$ при $\omega = 2.0$ об/с и угле поворота емкости $\alpha \approx 110^\circ$ и $\alpha \approx 290^\circ$, т.е. примерно при тех же значениях α , что и в прямоугольной емкости. Несмотря на то, что пиковые значения числа n в эллиптической емкости меньше, чем в прямоугольной емкости, в среднем число n на всем интервале угла поворота α от 0 до 360° больше в эллиптической емкости из-за более широкого диапазона относительно больших значений n на всем интервале значений угла α .

Данное утверждение подтверждает табл. 1, в которой приведены средние значения n_c относительного числа бесконтактных частиц, находящихся в емкости в течение одного ее оборота, вычисленные по формуле

$$n_c = \sum_{i=1}^k (n_i)/k, \quad (2)$$

где $k = 37$ – количество замеров относительного числа $n_i = N_{ai}/N$, N_{ai} – число бесконтактных частиц при $\alpha = \alpha_i$, α_i – угол поворота емкости от 0 до 360° с интервалом 10° . В табл. 1 добавлены результаты расчетов, проведенных с двумя эллиптическими емкостями с полуосями $r_x = 100$ мм, $r_y = 25$ мм и $r_x = 100$ мм, $r_y = 75$ мм соответственно. В табл. 1 жирным шрифтом выделены максимальные значения n_c , равные 17.1, 23.5, 22.0, 19.4, 28.8, 20.3 % для круглой, квадратной, прямоугольной и трех эллиптической формы емкостей при угловых скоростях ω , равных 2.5, 2.0, 1.5, 1.5, 2.0, 2.5 об/с соответственно. Из найденных n_c максимального своего значения в 28.8 % достигает в эллиптической емкости с полуосями $r_x = 100$ мм и $r_y = 50$ мм, вращающейся с угловой скоростью $\omega = 2.0$ об/с.

Таблица 1

Средние значения n_c относительного числа бесконтактных частиц во вращающейся емкости различной формы

ω , об/с	n_c , %					
	Окружность $r = 100$ мм	Квадрат $l = 70$ мм	Прямоугольник $l_x = 90$ мм $l_y = 45$ мм	Эллипс $r_x = 100$ мм $r_y = 25$ мм	Эллипс $r_x = 100$ мм $r_y = 50$ мм	Эллипс $r_x = 100$ мм $r_y = 75$ мм
1.0	4.9	9.5	11.0	12.5	5.8	4.4
1.5	7.6	20.5	22.0	19.4	18.5	8.8
2.0	12.2	23.5	14.1	11.8	28.8	18.5
2.5	17.1	1.1	0.9	4.3	6.2	20.3
3.0	0.9	0.0	0.5	0.5	2.3	0.7

В трубах с подобными формами поперечных сечений значения n_c , приведенные в табл. 1, будут соответствовать угловым скоростям ω_s , равным:

$$\omega_s = \omega \sqrt{d/d_s}, \quad (3)$$

где d, d_s – характерные линейные размеры рассмотренных в данной работе сечений трубы и подобных им соответственно. На рис. 4 приведены расположения частиц сыпучего материала и векторы их линейных скоростей в подобных эллиптических емкостях при одном и том же угле их поворота $\alpha = 120^\circ$. Характерный линейный размер d_s правой емкости (рис. 4б) в четыре раза больше, чем размер d у левой емкости (рис. 4а). Для удобства сравнения на рис. 4 обе емкости приведены к одному масштабу. В соответствии с соотношением (3), в расчетах угловая скорость ω_s правой емкости принята в два раза меньшей, чем скорость вращения ω левой емкости. В сравниваемых емкостях частицы в среднем расположены в подобных точках пространства, а направления линейных скоростей частиц в них одинаковы.

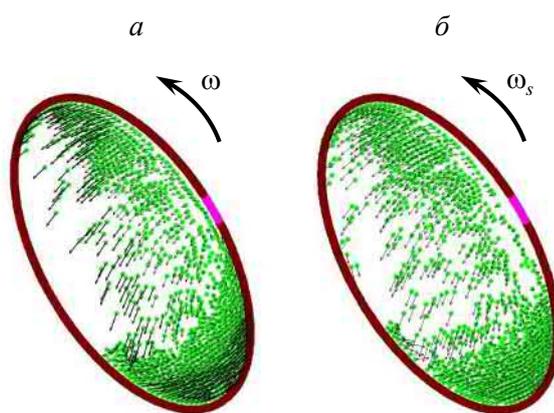


Рис. 4. Поля линейных скоростей частиц сыпучего материала в эллиптических емкостях с полуосями:

$r_x = 100$ мм, $r_y = 50$ мм (а); $r_x = 400$ мм, $r_y = 200$ мм (б – масштаб относительно а уменьшен в четыре раза); $\omega = 2$ об/с; $\omega_s = 1$ об/с

Таким образом, табл. 1 и соотношение (3) позволяют найти оптимальную угловую скорость труб с поперечными сечениями, подобными рассмотренным в данной работе, для эффективного пневмотранспортирования сыпучего материала по ним.

Заключение

Проведенные исследования показали, что производительность пневмотранспортирования сыпучего материала во вращающейся вокруг собственной продольной оси горизонтальной трубе становится максимальной при определенной ее угловой скорости, которая считается оптимальной. Предложен метод ее определения, который заключается в подсчете числа бесконтактных частиц на дискретных стадиях вращения трубы и усреднении этих чисел за время полного оборота трубы. Оптимальная скорость вращения различна у труб, отличающихся формой поперечного сечения. Среди рассмотренных в данном исследовании наилучшей с точки зрения производительности пневмотранспортирования является эллиптическая форма с соотношением полуосей, равном двум. Результаты

исследования позволяют находить оптимальные угловые скорости для труб с формами поперечного сечения подобными рассмотренным в данной работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта НИР FWNZ-2021-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тымчур А. Д. К вопросу улучшения пневмотранспорта выбуренных частиц при бурении взрывных скважин на карьерах // Известия УГГУ. – 2000. – № 11. – С. 277–279.
2. Pedrosa, C., Saasen, A., Ytrehus, J.D. Fundamentals and Physical Principles for Drilled Cuttings Transport—Cuttings Bed Sedimentation and Erosion // *Energies*. – 2021. – No. 14. – P. 545.
3. Zhu, X, Shen, K., Li, B., Lv, Y. Cuttings Transport Using Pulsed Drilling Fluid in the Horizontal Section of the Slim-Hole: An Experimental and Numerical Simulation Study // *Energies*. – 2019. – No. 12. – P. 3939.
4. Hakim, H., Katende, A., Sagala, F. et al. Performance of polyethylene and polypropylene beads towards drill cuttings transportation in horizontal wellbore // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 165. – Pp. 962–969.
5. Zeng, C., Yan, X., Zeng, Z., Yang, S. The formation and broken of cuttings bed during reaming process in horizontal directional drilling // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2018. – Vol. 76. – Pp. 21–29.
6. Liu, W., Zhu, X., Jing, J. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 163. – Pp. 311–319.
7. Liu, W., Qian, X., Li, T. et al. Investigation of the tool-rock interaction using Drucker-Prager failure criterion // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 173. – Pp. 269–278.
8. Данилов Б. Б., Кондратенко А. С., Смоляницкий Б. Н., Смоленцев А. С. Совершенствование технологии проходки скважин в грунте методом продавливания // ФТПРПИ. – 2017. – № 3. – С. 57–64.
9. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Шер Е. Н. Определение условий транспортирования пластичного грунта сжатым воздухом по горизонтальному трубопроводу при бурении скважин // ФТПРПИ. – 2014. – № 3. – С. 66–74.
10. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н. Экспериментальное обоснование процесса транспортирования разрушенного грунта при горизонтальном бурении скважин // ФТПРПИ. – 2012. – № 3. – С. 82–90.
11. Feng, S., Jia, W., Yan, J., Wang, C., Zhang, K. A new method of flow blockage collapsing in the horizontal pipe: the pipe-rotation mechanism // *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. – 2020. – Vol. 18. – No. 8.
12. Jia W, Feng S. Study on mass at the bottom of the pipe and gas velocity distribution during flow blockage collapsing under pipe-rotation mechanism // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. – 2020. – Vol. 15. – No. 6.
13. Han, X., Li, P., Li, J. CFD-DEM Simulation of Reverse Circulation Pneumatic Cuttings Removal during Coal Seam Drilling // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2020. – Article ID 3707864. – 14 p.
14. Hongtu, Z., Ouya Z., Botao, L. et al. Effect of drill pipe rotation on gas-solid flow characteristics of negative pressure pneumatic conveying using CFD-DEM simulation // *Powder Technology*. – 2021. – Vol. 387. – Pp. 48–60.
15. Fokeer, S., Lowndes, I.S., Hargreaves, D.M. Numerical modelling of swirl flow induced by a three-lobed helical pipe // *Chemical Engineering and Processing*. – 2010. – Vol. 49. – Pp. 536–546.
16. Daschiel, G., Krieger, V., Jovanović, J., Delgado, A. Numerical simulation of turbulent flow through Schiller's wavy pipe // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2014. – Vol. 761. – Pp. 241–260.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615760 РМ2D / Хан Г.Н., Ланис А.Л. – Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22 мая 2015 г.
18. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // *Geotechnique*. – 1979. – Vol. 29. – No. 1. – Pp. 47 – 65.
19. Schäfer, J., Dippel, S., Wolf, D.E. Force schemes in simulations of granular materials // *Journal de Physique I France*. – 1996. – Vol. 6. – No. 1. – Pp. 5–20.
20. Kruggel-Emden, H., Simsek, E., Rickelt, S., et al. Review and extension of normal force models for the Discrete Element Method // *Powder Technology*. – 2007. – Vol. 171. – No. 3. – Pp. 157–173.
21. Хан Г.Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // *Физическая мезомеханика*. – 2008. – Т.11. – №1. – С.109–114.

REFERENCES

1. Tymchur, A.D. (2000) К вопросу улучшения пневмотранспорта выбуренных частиц при бурении взрывных скважин на карьерах [On the issue of improving the pneumatic transport of drilled particles when drilling blast holes in open pits] *Izvestiya UGGU*, 11, 277–279. [In Russian] .
2. Pedrosa, C., Saasen, A., Ytrehus, J.D. (2021) Fundamentals and Physical Principles for Drilled Cuttings Transport – Cuttings Bed Sedimentation and Erosion. *Energies*, 14, 545.
3. Zhu, X, Shen, K., Li, B., Lv, Y. (2019) Cuttings Transport Using Pulsed Drilling Fluid in the Horizontal Section of the Slim-Hole: An Experimental and Numerical Simulation Study. *Energies*, 12, 3939.
4. Hakim, H., Katende, A., Sagala, F. et al. (2018) Performance of polyethylene and polypropylene beads towards drill cuttings transportation in horizontal wellbore. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 165, 962–969.
5. Zeng, C., Yan, X., Zeng, Z., Yang, S. The formation and broken of cuttings bed during reaming process in horizontal directional drilling. *Tunneling and Underground Space Technology*, 76, 21–29.
6. Liu, W., Zhu, X., Jing, J. (2018) The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 163, 311–319.
7. Liu, W., Qian, X., Li, T. et al. (2019) Investigation of the tool-rock interaction using Drucker-Prager failure criterion. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 269–278.
8. Danilov, B.B., Kondratenko, A.S., Smolyanitsky, B.N., Smolentsev A.S. (2017) Improvement of Pipe Pushing Method. *Journal of Mining Science*, 53, 478–483.
9. Danilov, B.B., Smolyanitsky, B.N., Sher, E.N. (2014) Determination of conditions for compressed air-assisted removal of plastic soil in horizontal pipeline in drilling. *Journal of Mining Science*, 50, 484–490.
10. Danilov, B.B., Smolyanitsky, B.N. (2012) Experimental substantiation of broken soil transportation in horizontal borehole drilling. *Journal of Mining Science*, 48, 480–486.
11. Feng, S., Jia, W., Yan, J., Wang, C., Zhang, K. (2020) A new method of flow blockage collapsing in the horizontal pipe: the pipe-rotation mechanism. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 18(8).
12. Jia W, Feng S. (2020) Study on mass at the bottom of the pipe and gas velocity distribution during flow blockage collapsing under pipe-rotation mechanism. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15 (6).
13. Han, X., Li, P., Li, J. (2020) CFD-DEM Simulation of Reverse Circulation Pneumatic Cuttings Removal during Coal Seam Drilling. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 3707864, 14.
14. Hongtu, Z., Ouya Z., Botao, L. et al. (2021) Effect of drill pipe rotation on gas-solid flow characteristics of negative pressure pneumatic conveying using CFD-DEM simulation. *Powder Technology*, 387, 48–60.

15. Fokeer, S., Lowndes, I.S., Hargreaves, D.M. (2010) Numerical modeling of swirl flow induced by a three-lobed helical pipe. *Chemical Engineering and Processing*, 49, 536–546.
16. Daschiel, G., Krieger, V., Jovanović, J., Delgado, A. (2014) Numerical simulation of turbulent flow through Schiller's wavy pipe, *Journal of Fluid Mechanics*, 761, 241–260.
17. Certificate of State Registration (Russia) of computer program No. 2015615760 PM2D / Khan, G.N., Lanis, A.L. – Date of state registration in the Register of Programs for Computers May 22, 2015.
18. Cundall P.A., Strack O.D.L. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47 – 65.
19. Schäfer, J., Dippel, S., Wolf, D.E. (1996) Force schemes in simulations of granular materials. *Journal de Physique I France*, 6(1), 5–20.
20. Kruggel-Emden, H., Simsek, E., Rickelt, S., et al. (2007) Review and extension of normal force models for the Discrete Element Method. *Powder Technology*, 171 (3), 157–173.
21. Khan, G.N. (2008). Asymmetric failure of the rock mass near a hollow [O nesimmetrichnom rezhime razrusheniya massiva gornyh porod v okrestnosti polosti]. *Physical Mesomechanics [Fizicheskaya mezomekhanika]*, 11(10), 109-114. [in Russian].

© Г. Н. Хан, Е. П. Русин, 2021

ОБ ОДНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СРЕЗ

Анвар Исмагилович Чанышев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, a.i.chanyshev@gmail.com; Новосибирский Государственный Университет Экономики и Управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, Каменская, 52, профессор кафедры МиЕН

Ильгизар Маратович Абдулин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный просп., 54, научный сотрудник, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

Обсуждается вопрос возможности определения прочностных свойств горных пород на основе применения данных, полученных при срезе горных пород по заранее указанному направлению. Утверждается, что из этих экспериментов возможно установить лишь предельную силу трения при движении разрушенных частей материала друг по другу.

Ключевые слова: напряжения, деформации, эксперименты, срез, критерий прочности Кулона-Мора, угол внутреннего трения

AN ALTERNATIVE INTERPRETATION OF SHEAR TESTING DATA

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Phys.-Math.), office: +7 (383) 205 30 30 (716); Novosibirsk State University of Economics and Management, 52 Kamenskaya street, Novosibirsk, 630099, Russia, Professor at the Mathematics and Natural Sciences Department, office: (383) 243 94 75, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Igizar M. Abdulin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Researcher, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

The authors discuss determinability of rock strength using data from tests on shearing along the pre-set direction. It is claimed that such tests can only provide the limiting friction force of particles during their contact motion.

Keywords: stresses, strains, tests, shear, Mohr–Coulomb failure criterion, internal friction angle

Введение

При решении задач горного дела требуется знать прочностные свойства материалов на сжатие, растяжение, на сдвиги, и т.п. Для этих целей производятся отборы образцов горных пород. Особое внимание уделяется внутренней структуре материалов так, чтобы в результате испытаний в них реализовывалось бы

однородное напряженно-деформированное состояние. Из серии экспериментов на образцах выделяются опыты на срез [1], когда за счет вертикального сжатия образцов и применения специально изготовленных оголовников для концов образца в нем создается направление принудительного скольжения, не совпадающее с плоскостями действия максимальных касательных напряжений или с плоскостями, следующими из условия прочности Кулона-Мора. Через угол наклона плоскости принудительного скольжения к оси абсцисс устанавливается отношение нормального и касательного усилий, остающееся неизменным вплоть до полного смещения одной части разрушенного образца по другой. С изменением угла наклона плоскости скольжения получаются разные отношения нормального и касательного усилий, разные их значения, с помощью которых формируется кривая прочности геоматериала, по виду совпадающая с условием прочности Кулона-Мора. По этой кривой устанавливаются коэффициент сцепления горной породы, угол внутреннего трения. Преимущество этого вида испытания очевидно – из сжатия находятся все возможные другие пределы прочности материала. Однако здесь имеются некоторые замечания, на которых попытаемся заострить внимание.

Попытаемся подойти к этим экспериментам критически, оценивая все выполняемые шаги.

Анализ представленного метода изучения прочностных свойств горных пород на срез при осевом нагружении материала

В [1] рассматривается следующая схема нагружения материала (рис. 1).

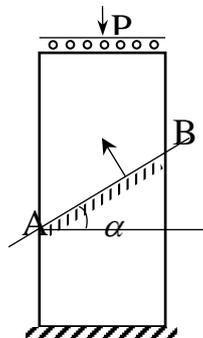


Рис. 1. Схема нагружения образца горной породы при срезе под действием осевого сжатия (проектируемая плоскость среза составляет с горизонтальной осью угол α).

Образец горной породы в виде кругового цилиндра или прямоугольного параллелепипеда подвергается действию осевого сжатия. Концы образца помещаются в металлические обоймы. Сила осевого сжатия равна P . Точки A и B на рис. 1 свободны от действия обойм. Чтобы не ограничивать сдвиг материала по плоскости AB с нормалью \vec{n} к верхней части образца прикладывается сила P с применением роликовой постели [1], свободно перемещающейся в горизонтальном

направлении. Точка приложения силы P перемещается вместе постелью влево (вправо) в зависимости от направления образующейся плоскости скольжения.

При этом нормальное сжимающее напряжение и касательное определяются по формулам тензорного проектирования в предположении, что в образце реализуется однородное напряженное состояние сжатия. Согласно [1]

$$\tau_n = \frac{P}{S_0} \cos \theta, \quad \sigma_n = \frac{P}{S_0} \sin \theta,$$

где P – разрушающая вертикально сила, $\theta = \pi/2 - \alpha$ – угол между плоскостью из среза и направлением действия разрушающей силы, $S_0 = ld$ – площадь плоскости среза, d – диаметр).

Рассмотрим процесс сжатия образца. До тех пор, пока не началось сдвигание одной части образца относительно другой (образующихся при разрушении образца), можно считать, что в нем (в образце) создается однородное напряженно-деформированное состояние с отличным от нуля напряжением

$$\sigma_y = \frac{P}{S},$$

где S – площадь поперечного сечения образца, P – приложенная сила (все другие напряжения σ_{ij} полагаются равными нулю). Если допустить, что разрушения в образце начнутся на тех площадках, где касательное усилие τ_n на площадке с нормалью \vec{n} по модулю достигнет какого-то значения τ_s , то тогда очевидно, что впервые это произойдет на площадках действия максимального касательного напряжения, образующих с осью y углы $\pm\pi/4$. Это случится в силу того, что касательное напряжение τ_{xy} связано с другим касательным напряжением $(\sigma_x - \sigma_y)/2$ условием

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \tau_s. \quad (1)$$

При этом τ_{xy} – касательное напряжение, действующее на площадке с нормалью y в направлении оси x , $(\sigma_x - \sigma_y)/2$ – касательное усилие, действующее в плоскостях, образующих угол $\pm 45^\circ$ с осью y . Из (1) следует, что τ_{xy} достигнет максимума, если $(\sigma_x - \sigma_y)/2 = 0$, то есть там, где $\sigma_x = \sigma_y$, то есть на площадках действия максимальных касательных напряжений. Из (1) также следует, что τ_{xy} обращается в ноль там, где площадка с нормалью y – главная. Таким образом

получается, что в сжатом в направлении z образце разрушения прежде всего наступят на площадках, ориентированных под углом $\pm 45^\circ$ к оси сжатия. И пока разрушение наступит на площадке с нормалью \vec{n} , наклоненной под углом α к оси абсцисс, разрушение произойдет в целом веере площадок, расположенных в секторе с углом $\pi/4 - \alpha$, $\pi/4 + \alpha$. На рис. 2 представлена структура материала вдоль плоскости скольжения с нормалью $\vec{n} = (-\sin \alpha, \cos \alpha)$.

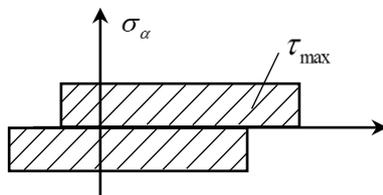


Рис. 2. Схема сдвига одной разрушенной части материала по другой

На этом рисунке представлено, что скольжение одной части образца горной породы по другой его части будет происходить, когда материал вдоль этой плоскости и сверху и снизу будет уже разрушенным. То, что регистрируется в опытах на срез, представляет собой предельную силу трения при движении двух частей уже разрушенного материала.

Аналогичная картина имеет место, если в качестве условия разрушения горной породы принять условие Кулона-Мора [2]

$$\max_n |\tau_n + a\sigma_n| = \tau_s, \quad (2)$$

где $a = \operatorname{tg} \psi$, ψ – угол внутреннего трения. В этом случае площадки, на которых выполняется условие (2), наклонены к оси сжатия под углом $\pm(45^\circ + \psi/2)$. Т. е. получаем аналогичную ситуацию как на рис. 2. Прежде чем наступит сдвиговое разрушение вдоль AB на рис. 1, материал в соседних с AB областях уже разрушится за счет выполнения (2) на более ранних этапах нагружения силой P .

Отметим, что задачи, связанные с исследованиями сдвигового деформирования массивов горных пород исследовались в многочисленных работах [3-12].

Таким образом в случае применения метода изучения прочностных свойств горных пород срезом в экспериментах фиксируется предельная сила трения, которую необходимо преодолеть при сдвиге одной части разрушенного материала по другой.

Сделаем еще одно замечание, касающееся интерпретации экспериментов на срез. Как известно [13], деформируемые твердые тела состоят из связанных друг с другом частиц. Эти частицы остаются прижатыми друг к другу как в естественном состоянии среды, когда на нее никакие внешние силы не действуют, так и в состоянии приложения сил (растягивающих). Этот факт в [14] отмечен как дей-

ствие сил внутреннего взаимодействия частиц, обусловленных силами межатомного, молекулярного взаимодействия, которые в теории упругости никак не учитываются. Возникает вопрос: а где же тогда они учитываются в теориях неупругости, включая теорию разрушения материалов?

Представим себе плоскость скольжения с нормалью \vec{n} , как изображено на рис. 1. В направлении нормали \vec{n} действуют две силы, два усилия: σ_n и N . Усилие N прижимает элементы среды вдоль AB друг к другу в естественном состоянии среды. Кроме N действует усилие σ_n , которое приводит к растяжению слоя материала вдоль AB в случае $\sigma_n > 0$ и сжатию в случае $\sigma_n < 0$. Наличие этих двух усилий означает, что для преодоления силы трения вдоль AB необходимо соблюсти условие

$$|\tau_n| = |(N + \sigma_n)k_{fr}| \geq \tau_s, \quad (3)$$

где τ_s – предельное значение силы (усилие) трения, k_{fr} – коэффициент трения. Сила (усилие) N соответствует теоретической прочности материала [14], т.е. на порядок больше по модулю значения $|\sigma_n|$. Это означает, что величина τ_s в (3) по существу совпадает с произведением

$$\tau_s \approx |Nk_{fr}|. \quad (4)$$

В этом выражении ни величина N неизвестна, ни коэффициент трения k_{fr} . Однако можно допустить, что эти величины в отдельности и тем более в совокупности зависят от сдвига материала вдоль направления AB на рис. 1. Эта зависимость от сдвига γ представлена схематично на рис. 3.

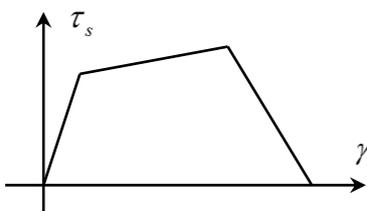


Рис. 3. Зависимость предельной силы (усилия) трения от сдвига γ на вдоль участка AB на рис. 1

Видна упругая (линейная) часть этой кривой, упругопластическая, ветвь запредельного деформирования. Всю эту кривую можно получить на испытательных установках с фиксированными смещениями захватов при условии $m\ddot{x} = F - R = 0$ [15].

Если плоскость AB на рис. 1 – плоскость скольжения, то тогда спрашивается: а как же проявляется величина σ_n , фигурирующая в (3)? В направлении \vec{n} за счет воздействия усилия N в самом первоизданном виде можно допустить образование деформации M по правилу

$$M = \frac{N}{K}, \quad (5)$$

где K – жесткость некоторой пружины, образованной на контактах одних частиц материала с другими, M – это деформация за счет сжатия пружин усилием N . Если учитывается действие σ_n , то вдоль направления \vec{n} будут уже действовать две силы N и σ_n , которые вызовут деформацию

$$\varepsilon_n + M = \frac{N + \sigma_n}{K}. \quad (6)$$

Вычитая из (6) выражение (5), получаем

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_n}{K}. \quad (7)$$

Влияние усилия N здесь исчезло, о чем говорится также в [14].

Из сказанного вытекают вопросы о предназначении величин σ_n , τ_n и N в формировании критериев прочности горных пород [16].

Выводы

1. Показано, что при сжатии образца образуется направление принудительного скольжения горной породы, на котором материал может находиться уже в разрушенном состоянии.

2. Показано, что на площадке скольжения имеются силы межатомного, молекулярного взаимодействия (силы притяжения), которые никоим образом не отражаются в формируемых критериях прочности горных пород.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А17-117121140065-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каркашадзе Г. Г. Механическое разрушение горных пород. – М.: МГГУ, 2004. – 222 с.
2. Соколовский В. В. Теория пластичности. – М.: Высш. шк., 1969. – 608 с.

3. Адушкин В. В., Кочарян Г. Г., Новиков В. А. Исследование режимов движения по разлому // Физика Земли. – 2016. – № 5. – С. 13–24.
4. Артюшков Е. В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.
5. Друкер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Механика: Новое в зарубежной науке. Вып. 2. Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир. – 1975. – С. 166–177.
6. Кондратьев С. В. Методика измерений относительных перемещений блоков горного массива // Сейсмические приборы. ОИФЗ РАН. – 1996. – вып. 25–26. – С. 151–156.
7. Костюченко В. Н., Кочарян Г. Г., Павлов Д. В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 23–42.
8. Кочарян Г. Г., Марков В. К., Остапчук А. А., Павлов Д. В. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – № 5. – С. 5–15.
9. Мухамедиев Ш. А. О дискретном строении геосреды и континуальном подходе к моделированию ее движения // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – Т. 7. – № 3. – С. 347–381.
10. Райс Дж. Механика очага землетрясений. – М.: Мир, 1982. – 217 с.
11. Кочарян Г. Г., Морозова К. Г., Остапчук А. А. Исследование акустической эмиссии слоя геоматериала при сдвиговом деформировании // ФТПРПИ. – 2019. – №3. – С. 15–22.
12. Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И. О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // ФТПРПИ. – 1974. – №3. – С. 130–133.
13. Ruppeneit K. V., Liberman Iu. M. Introduction to rock mechanics. – М.: Gosgortekhizdat, 1960.
14. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении // ПМТФ. – 1961. – Т. 2. – №. 4. – С. 3.
15. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – С.-П.: Наука, 2001. – 344 с.
16. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Две характеристические функции поведения образцов сульфидной руды при двухосном сжатии // ФТПРПИ. – 2018. – №6. – С. 30–36.

© А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, 2021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС МАССИВА ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТОК ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С ЗАДАННЫМИ НА КОНТУРЕ ВЕКТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ КОШИ И СМЕЩЕНИЙ

Анвар Исмагилович Чанышев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, a.i.chanyshev@gmail.com; Новосибирский Государственный Университет Экономики и Управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, Каменская, 52, профессор кафедры МиЕН

Ильгизар Маратович Абдулин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный просп., 54, научный сотрудник, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

Решается задача об определении НДС массива пород вокруг выработки цилиндрической формы с заданными на ней векторами напряжений Коши и смещений. Предполагается, что материал вокруг выработки находится в упругом состоянии. Вдоль цилиндрической выработки (свободной от напряжений) производятся измерения трех смещений как функций двух координат поверхности (полярного угла и длины вдоль оси симметрии выработки). По данным этих измерений определяются на ее границе все компоненты тензоров напряжений и деформаций, все координаты вектора поворота. Показывается как полученную информацию возможно использовать для оценки НДС массива пород, продвигаясь вглубь массива пород.

Ключевые слова: массив пород, выработка, цилиндрическая поверхность, напряжения, деформации, смещения, вектор поворота

STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF ROCK MASS AROUND CYLINDRICAL EXCAVATIONS WITH THE PRESET CAUCHY STRESS STRESSES AND DISPLACEMENTS AT THE BOUNDARIES

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Phys.-Math.), office: +7 (383) 205 30 30 (716); Novosibirsk State University of Economics and Management, 52 Kamenskaya street, Novosibirsk, 630099, Russia, Professor at the Mathematics and Natural Sciences Department, office: (383)243-94-75, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Igizar M. Abdulin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Researcher, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

The authors solve the problem on the stresses and strains of rock mass around a cylindrical excavation with the preset vectors of the Cauchy stresses and displacements at the boundary. It is assumed that the surrounding rock mass is elastic. Along the cylindrical excavation (free of stresses), displacements are measured as functions of two surface coordinates (polar angle and length along the symmetry axis of the excavation). These measurements are used to determine all components of ten-

sors of stresses and strains at the boundary, and all coordinates of rotation vector. It is shown how this information can be used in the stress–strain analysis of rock mass farther from the excavation.

Keywords: rock mass, underground excavation, cylindrical surface, stresses, strains, displacements, rotation vector

Введение

Существует множество работ, которые посвящены оценке напряженно-деформированного состояния материалов вокруг отверстий [1-4]. Если говорить о горном деле, то здесь уместно под отверстиями понимать выработки различных форм и конфигураций. Интересует то, как распределены напряжения, деформации вокруг выработок, где происходит концентрация напряжений, когда ожидать катастрофических событий типа горных ударов и выбросов [5-8].

В данной работе рассматривается круговая цилиндрическая выработка радиуса a , на свободной границе которой задаются три смещения как функции координат поверхности. Возникает вопрос: возможно ли по этим данным восстановить НДС цилиндрической поверхности. Отметим, что задачи подобного вида составляют основу экспериментально-аналитического метода исследования, развиваемого в ИГД СО РАН с 70-х годов прошлого столетия [9-13].

Основная часть

Рассматривается выработка цилиндрической формы, имеющая круговое сечение (рис. 1).

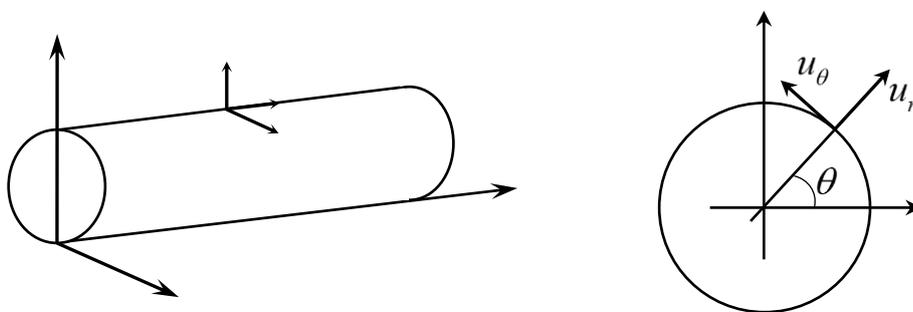


Рис. 1. Выработка в виде кругового цилиндра с заданными на границе вектором напряжений Коши и вектором смещений

Уравнение кругового сечения определим как

$$x^2 + y^2 = R^2 \text{ или } r = R,$$

где r, θ, z – цилиндрические координаты. Пусть на контуре этой выработки в какой-то момент времени t определены все три смещения как функции координат поверхности:

$$u_r = \varphi(\theta, z), u_\theta = \psi(\theta, z), u_z = \chi(\theta, z). \quad (1)$$

Отметим, что здесь никаких предположений о плоском деформированном состоянии массива пород вокруг выработки не делается. Возникает задача определения НДС массива пород как на самом контуре выработки, так и вблизи него.

Для решения поставленной задачи имеем тензоры напряжений T_σ , деформаций T_ε , записанные в виде

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_r & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{r\theta} & \sigma_\theta & \tau_{\theta z} \\ \tau_{rz} & \tau_{\theta z} & \sigma_z \end{pmatrix}, T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_r & \varepsilon_{r\theta} & \varepsilon_{rz} \\ \varepsilon_{r\theta} & \varepsilon_\theta & \varepsilon_{\theta z} \\ \varepsilon_{rz} & \varepsilon_{\theta z} & \varepsilon_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

соотношения Коши, связывающие деформации (2) со смещениями u_r, u_θ, u_z в виде [14]:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}, \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right), \\ \varepsilon_{\theta z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right), \\ \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right). \end{cases} \quad (3)$$

Кроме соотношений (3) имеем зависимости для определения компонент вектора поворота [14]:

$$\begin{cases} \omega_r = \frac{1}{2r} \left(\frac{\partial u_z}{\partial \theta} - r \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right), \\ \omega_\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right), \\ \omega_z = \frac{1}{2r} \left(\frac{\partial (ru_\theta)}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (4)$$

Задача состоит в том, чтобы по известным функциям (1) определить тензоры T_σ и T_ε в (2) и, кроме того, найти (4). Для решения задачи будем предполагать, что материал как на самом контуре выработки, так и в соседних с ним областях находится в упругом состоянии, т.е. выполняется закон Гука:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_r + \nu(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z)], \\ \sigma_\theta = \dots, \\ \sigma_z = \dots, \\ \tau_{r\theta} = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{r\theta}, \tau_{\theta z} = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{\theta z}, \tau_{rz} = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{rz}, \end{cases} \quad (5)$$

где E , ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно.

Запишем уравнения равновесия среды на контуре выработки:

$$\begin{cases} -\sigma_r \cos \theta - \tau_{r\theta} \sin \theta = p_r, \\ -\tau_{r\theta} \cos \theta - \sigma_\theta \sin \theta = p_\theta, \\ -\tau_{rz} \cos \theta - \tau_{z\theta} \sin \theta = p_z. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $\vec{n} = (-\cos \theta, -\sin \theta, 0)$ – вектор внешней нормали к цилиндрической поверхности выработки, p_r, p_θ, p_z – компоненты вектора напряжений Коши. Будем считать, что контур выработки свободен от напряжений. Это означает, что

$$p_r = p_\theta = p_z = 0. \quad (7)$$

Приведем решение поставленной задачи. Из (3) для деформации ε_θ получаем выражение

$$\varepsilon_\theta|_{r=R} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_r}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{1}{R} \frac{\partial \psi(\theta, z)}{\partial \theta} + \frac{\varphi(\theta, z)}{R}, \quad (8)$$

где ψ, φ – заданные функции (1). Таким же образом из (3) находим

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\partial \chi(\theta, z)}{\partial z}. \quad (9)$$

Чтобы найти ε_r и деформацию $\varepsilon_{r\theta}$ воспользуемся уравнениями равновесия (6), (7), законом Гука (5), который при подстановке в (6), (7) дает следующие два уравнения:

$$\begin{cases} (1-\nu)\varepsilon_r + \nu(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z) + (1-2\nu)\varepsilon_{r\theta} \operatorname{tg} \theta = 0, \\ \nu \operatorname{tg} \theta \varepsilon_r + (1-\nu) \operatorname{tg} \theta \varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_z \operatorname{tg} \theta + (1-2\nu)\varepsilon_{r\theta} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

В этой системе уравнений неизвестными являются величины $\varepsilon_r, \varepsilon_{r\theta}$. Из нее находим

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{\cos^2 \theta - \nu} [\varepsilon_\theta (\sin^2 \theta - \nu) - \varepsilon_z \nu \cos 2\theta], \\ \varepsilon_{r\theta} = -\frac{\sin 2\theta}{2(\cos^2 \theta - \nu)} [\varepsilon_\theta + \varepsilon_z \nu]. \end{cases} \quad (11)$$

Далее, из третьего уравнения равновесия (6) и при условиях (7) и законе Гука (5) следует, что

$$\varepsilon_{rz} + \varepsilon_{z\theta} \operatorname{tg} \theta = 0.$$

Отсюда с применением соотношений Коши (3) получаем зависимость

$$\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} + \operatorname{tg} \theta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right) = 0, \quad (12)$$

а из найденного выражения для $\varepsilon_{r\theta}$ (11) устанавливаем

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right). \quad (13)$$

Выражения (12), (13) составляют систему уравнений для отыскания неизвестных величин $\partial u_z / \partial r$, $\partial u_\theta / \partial r$. Из (13) следует, что

$$\left. \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right|_{r=R} = 2\varepsilon_{r\theta} - \frac{1}{R} \frac{\partial \varphi(\theta, z)}{\partial z} + \frac{\psi(\theta, z)}{R}. \quad (14)$$

Из (12) при условии (14) устанавливаем

$$\left. \frac{\partial u_z}{\partial r} \right|_{r=R} = -\frac{\partial \varphi(\theta, z)}{\partial z} - \operatorname{tg} \theta \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \varphi(\theta, z)}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{\psi(\theta, z)}{R} \right). \quad (15)$$

Рассматривая (4), видим, что все величины здесь находятся:

$$\begin{cases} \omega_r = \frac{1}{2R} \left(\frac{\partial \chi(\theta, z)}{\partial \theta} - r \frac{\partial \psi(\theta, z)}{\partial z} \right), \\ \omega_\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi(\theta, z)}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right), \\ \omega_z = \frac{1}{2r} \left(\psi(\theta, z) + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{\partial \varphi(\theta, z)}{\partial \theta} \right). \end{cases}$$

Таким образом задача восстановления всех деформаций и всех компонент вектора поворота решается до конца. Чтобы найти компоненты тензора T_σ используется закон Гука (5).

Выводы

В работе определены все компоненты тензоров деформации и напряжений на контуре цилиндрической выработки по заданным на ее границе векторам напряжений Коши и смещений. Кроме этого находятся также все компоненты вектора поворота.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А17-117121140065-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савин Г. Н. Распределение напряжений около отверстий. – Киев: Наукова думка, 1968. – 888 с.
2. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости: Основные уравнения: Плоская теория упругости: Кручение и изгиб. – М.: АН СССР, 1954. – 648 с.
3. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
4. Лурье А. И. Теория упругости. – М: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. – 940 с.
5. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
6. Еременко А. А., Федоренко А. И., Копытов А. И. Проведение и крепление горных выработок в удароопасных зонах железорудных месторождений. – М.: Наука, 2008. – 236 с.
7. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок Ленинград: Наука Ленинградское отделение, 1978. – 256 с.
8. Тарасов Б. Г., Дырдин В. В., Иванов В. В. Геоэлектрический контроль состояния массивов. – М.: Недра, 1983. – 216 с.
9. Грицко Г. И., Власенко Б. В., Мусалимов В. М. Экспериментально-аналитический метод определения напряжений в угольном пласте // ФТПРПИ. – 1971. – № 1. – С. 3–10.
10. Грицко Г. И., Власенко Б. В., Шемякин Е. И. Экспериментально-аналитический метод определения напряжений в массиве горных пород. – Новосибирск: Наука, 1976. – 190 с.
11. Грицко Г. И., Цыцаркин В. Н. Определение напряженно-деформированного состояния массива вокруг напряженных пластовых выработок экспериментально-аналитическим методом // ФТПРПИ. – 1995. – № 3. – С. 18–21.
12. Миренков В. Е., Шутов В. А., Полуэктов В. А. Экспериментально-аналитическое определение контактных условий // Изв. вузов “Строительство”. – 2010. – № 5 (617). – С. 10–15.
13. Акимов В. С., Цыцаркин В. Н. Определение границы области неупругих деформаций вокруг круговой выработки // Горное давление в капитальных и подготовительных выработках. – Новосибирск, 1979. – С. 84–87.
14. Рекач В. Г. Руководство к решению задач по теории упругости. – М.: Высшая школа, 1966. – 229 с.

© А. И. Чаньшев, И. М. Абдулин, 2021

О СОПРОТИВЛЕНИИ ТОЛСТОСТЕННОЙ ПРЕГРАДЫ ПРИ ПРОНИКАНИИ В НЕЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Анвар Исмагилович Чанышев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, тел. (383)205-30-30 доб. 716; Новосибирский Государственный Университет Экономики и Управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, Каменская, 52, профессор кафедры математики и естественных наук, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Ольга Евгеньевна Белоусова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный просп., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доб. 716, e-mail: o.e.belousova@mail.ru

Ольга Анваровна Лукьяшко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный просп., 54, инженер, тел. (383)205-30-30 доб. 716, e-mail: lykola@yandex.ru

Исследуется задача о пробитии преград твердым телом. Вводится функция сопротивления материала, изменяющаяся в виде одной арки синусоиды. Решается уравнение движения твердого тела. Определяется скорость, при которой пробойник достигнет тыльной стороны преграды. Рассматриваются другие варианты начальной скорости, при которой тело застревает в преграде или при которой вылетает за ее пределы. Обсуждается вопрос об определении силы, характеризующей сопротивление материала, по скорости вылета пробойника из преграды.

Ключевые слова: сопротивление материала, пробитие преграды, начальная скорость, характер движения пробойника в преграде

RESISTANCE OF THICK-WALLED BARRIER IN PENETRATION OF A SOLID BODY

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Phys.-Math.), office: +7 (383) 205 30 30 (716); Novosibirsk State University of Economics and Management, 52 Kamenskaya street, Novosibirsk, 630099, Russia, Professor at the Mathematics and Natural Sciences Department, office: (383)243-94-75, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Olga E. Belousova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, office: +7 (383)205-30-30 (716), e-mail: o.e.belousova@mail.ru

Olga A. Luk'yashko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54, Krasny prospect, Novosibirsk, 630091, Russia, Engineer, office: +7 (383) 205 30 30 (716), e-mail: lykola@yandex.ru

The authors discuss bursting of barriers by solid bodies. The resistance function changes along a single-arc sinusoid. The equation of motion of a solid body is solved. The velocity of the drift hammer to reach the back of the barrier is determined. The alternative initial velocities such that the solid body is jammed in the barrier or is shot outside the barrier are examined. Determination of the barrier resistance force versus the shoot-out velocity of the drift hammer is discussed.

Keywords: resistance, barrier bursting, initial velocity, drift hammer penetration in barrier

Введение

Отметим, что задачи проникания твердых тел в преграды интересовали многочисленных исследователей [1-19]. Есть работы, в которых преграда рассматривалась как абсолютно - упругое тело [6-8], в других работах преграда воспринималась как жестко - пластическая среда [9-11] в работах [12-14] задачи о проникании твердых тел решались в упругопластической постановке. В то же время при разрушении конструкций должна также учитываться ниспадающая ветвь кривой «напряжение – деформация», которая соответствует падению сопротивления материала деформирования с ростом деформаций. В этом направлении работ не так уж много и связано это прежде всего с тем, что для построения уравнений процесса запредельного деформирования необходимы данные, полученные на испытательных машинах жесткого типа, когда в процессе нагружения контролируются смещения захватов машины. Поскольку таких испытательных машин не так много, поэтому данных также недостаточно.

Математическая модель

Обратимся теперь к решению поставленной задачи. Пусть имеется абсолютно твердое тело массой m . Рассмотрим уравнение движения этого тела в виде в котором координаты тензоров T_σ, T_ε равны

$$m\ddot{x} = F - R \quad (1)$$

где F - это активная сила, приложенная к телу, R - сопротивление среды движению тела в ней.

Обратим внимание на (1). Возникает вопрос: когда $R = F$? Из (1) следует, что это возможно в двух случаях: когда $m = 0$ и когда $\ddot{x} = 0$. Первый случай соответствует первому закону Ньютона, когда на контакте двух тел сила действия равна силе противодействия ($m = 0$). Второй случай соответствует движению тела в среде с контролируемым смещением, когда $\ddot{x} = 0$, $\dot{x} = C_1$, $x = C_1t + C_2$ (C_1, C_2 - постоянные).

Представим теперь преграду для рассматриваемого движущегося тела с массой m . Пусть эта преграда имеет толщину H . Будем вдавливать в преграду данное тело с постоянной скоростью $\dot{x} = C_1$ до полного проникновения. В результате этого нагружения на каждом этапе изменения $x = C_1 t$ ($x|_{t=0} = 0$) измеряем прикладываемую силу F и, следовательно, находим зависимость $R(=F) = R(x)$. По вполне понятным причинам она будет иметь вид рис. 1.

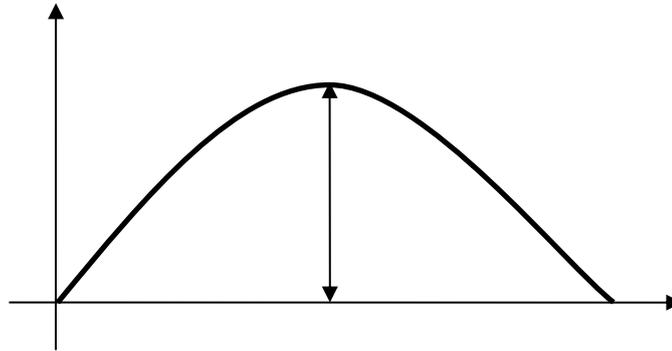


Рис. 1. Зависимость сопротивления среды продвижению в ней пробойника с массой m при постоянной скорости внедрения, полученной на испытательной машине жесткого типа

Аппроксимируем зависимость реактивной силы R на рис. 1. в виде одной арки синусоиды:

$$R = A \sin \alpha x, \quad (2)$$

где параметр α положим равным $\frac{\pi}{H}$:

$$\alpha = \frac{\pi}{H} \quad (3)$$

Понятно, что величина A в (2) может зависеть от скорости нагружения (скорости движения) пробойника. Это влияние здесь не учитывается. Величина A может зависеть от формы ударника, от физико-механических свойств преграды. В данном исследовании будем считать, что для данной формы ударника A есть константа.

Вернемся к решению задачи. Пусть ударник в результате какого-то воздействия перед встречей преградой получает некоторую начальную скорость V , при этом сила F в (1) отсутствует. Требуется проинтегрировать уравнения движения

$$m\ddot{x} = -A \sin \alpha x, \quad \alpha = \frac{\pi}{H} \quad (4)$$

при начальных условиях

$$x|_{t=0} = 0, \quad \dot{x}|_{t=0} = V. \quad (5)$$

Чтобы решить (4), следует понизить порядок дифференциального уравнения (4) с помощью подстановки [20]

$$\dot{x} = P(x). \quad (6)$$

Тогда $\ddot{x} = \frac{dP}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = P' \cdot P$, где $P' = \frac{dP}{dx}$.

С учетом (6) получаем следующее дифференциальное уравнение

$$m dP \cdot P = -A \sin(\alpha x) dx. \quad (7)$$

Интегрируя (7), находим

$$\frac{mP^2}{2} = \frac{A}{\alpha} \cos(\alpha x) + C_1. \quad (8)$$

Подставляя в (8) начальные условия (5), находим

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{A}{\alpha} + C_1.$$

Отсюда получаем выражение

$$p^2 = V^2 + \frac{2A}{\alpha m} [\cos(\alpha x) - 1] = V^2 - \frac{4A}{\alpha m} \sin^2 \frac{\alpha x}{2}$$

или

$$p = + \sqrt{V^2 - \frac{4A}{\alpha m} \sin^2 \frac{\alpha x}{2}} = \dot{x} \quad (9)$$

(знак "–" соответствует движения в обратном направлении). Из (9) следует, что \dot{x} обращается в ноль, когда

$$\sin \frac{\alpha x}{2} = V \sqrt{\frac{\alpha m}{4A}}. \quad (10)$$

Если $x = H$, а $\alpha = \frac{\pi}{H}$, то из (10) следует, что скорость при этом должна быть

$$V = \sqrt{\frac{4A}{\alpha m}} = 2\sqrt{\frac{AH}{\pi m}}. \quad (11)$$

В случае (11) тело выходит из преграды, но имеет нулевую скорость на выходе.

Если $V < \sqrt{\frac{4A}{\alpha m}}$, то есть правая часть (10) остается меньше единицы, то тогда

существуют вещественные значения x , при которых $\frac{\alpha x}{2} < \frac{\pi}{2}$ или $x < H$ и пробойник застревает в преграде. Координата точки, в которой происходит остановка, определяется из (10) следующим образом

$$x = \frac{2}{\alpha} \arcsin \left(V \sqrt{\frac{\alpha m}{4A}} \right). \quad (12)$$

Если V будет больше величины (11), то это означает, что тело вылетает из преграды со скоростью

$$\dot{x}_b = \sqrt{V^2 - \frac{4A}{\alpha m}}. \quad (13)$$

Из условия (13) с учетом знания скорости вылета тела находим величину

$$A = \frac{(V^2 - \dot{x}_b^2) \pi m}{4H}. \quad (14)$$

Из формулы (11) вытекают такие выводы: чем больше толщина пробиваемого слоя, тем больше требуется создать начальную скорость телу; чем меньше масса тела, тем большую скорость надо создать. Чем больше величина амплитуды A на рисунке 1, тем больше должна быть начальная скорость.

Далее, рассмотрим движение тела в пробиваемой преграде теле на основе дальнейшего интегрирования уравнения (9). Имеем следующие три случая интегрирования.

Первый случай. Пусть начальная скорость тела определяется формулой (14), то есть $V^2 = \frac{4A}{\alpha t}$. Тогда подкоренное выражение в (9) превращается в $V \cos(\alpha x / 2)$, где аргумент $\alpha x / 2$ изменяется в пределах от 0 ($x = 0$) до значения $\pi / 2$, ($x = H$). В этом случае величина косинуса положительная и имеем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dx}{V \cos\left(\frac{\alpha x}{2}\right)} = dt,$$

интегралом которого служит выражение

$$\frac{2}{\alpha V} \ln \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha x}{4}\right) = t + C_2.$$

Подставляя сюда начальные условия (5), находим $C_2 = 0$ и выражение для x в виде:

$$x = \frac{4}{\alpha} \operatorname{arctg} e^{\frac{\alpha V}{2} t} - \frac{\pi}{\alpha},$$

где V определяется (11), $\alpha = \pi / H$. График зависимости $x = x(t)$ представлен на рис. 2.

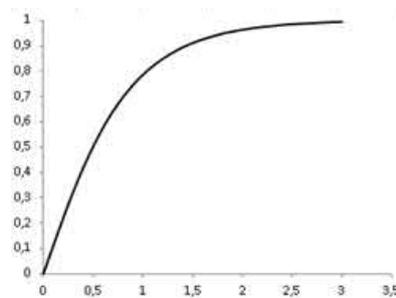


Рис. 2. Зависимость $x = x(t)$ для первого случая (когда пробойник останавливается на границе с нулевой скоростью)

Рассмотрим второй случай, когда

$$V^2 > \frac{4A}{\alpha t}, \tag{15}$$

то есть тело пролетает через преграду. Представим дифференциальное уравнение (9) в виде

$$\frac{dx}{\sqrt{V^2 - \frac{4A}{\alpha m} \sin^2 \frac{\alpha x}{2}}} = \frac{dx}{\sqrt{\frac{4A}{\alpha m} \cos^2 \frac{\alpha x}{2} + \left(V^2 - \frac{4A}{\alpha m}\right)}} = dt$$

или

$$\frac{dx}{\sqrt{V^2 - \frac{4A}{\alpha m}} \sqrt{1 + \frac{\frac{4A}{\alpha m}}{V^2 - \frac{4A}{\alpha m}} \cos^2 \frac{\alpha x}{2}}} = dt \quad . \quad (16)$$

Обозначим коэффициент при $\cos^2 \frac{\alpha x}{2}$ как p^2 :

$$p^2 = \frac{\frac{4A}{\alpha m}}{\left(V^2 - \frac{4A}{\alpha m}\right)}, \quad 1 + p^2 = \frac{V^2}{\left(V^2 - \frac{4A}{\alpha m}\right)},$$

тогда после интегрирования находим выражение

$$\frac{2}{\alpha V} F\left(\frac{\alpha x}{2}, \sqrt{\frac{4A}{\alpha m V^2}}\right) = t + C_3 \quad , \quad (17)$$

где $F(\varphi, k) = \int_0^\varphi \frac{dy}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 y}}$ - эллиптический интеграл первого рода [20].

Подставляя сюда начальные условия (5), находим $C_3 = 0$. График зависимости $x = x(t)$ определяется из (17) при условии $C_3 = 0$. Он представлен на рис. 3.

Третий случай, когда $V^2 < \frac{4A}{\alpha m}$, то есть тело застревает в преграде. В этом случае вместо уравнения (9) получаем уравнение

$$\frac{2d\left(\frac{\alpha x}{2}\right)}{\alpha V \sqrt{1 - q^2 \sin^2 \frac{\alpha x}{2}}} = dt, \quad (18)$$

где

$$q^2 = \frac{4A}{\alpha m V^2} > 1. \quad (19)$$

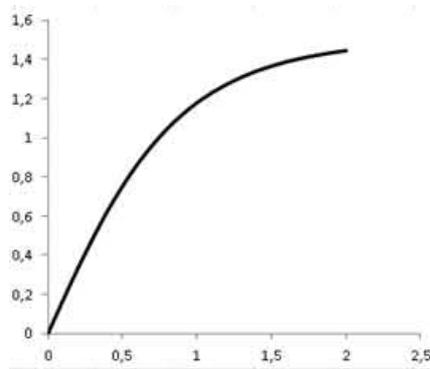


Рис. 3. Зависимость $x = x(t)$ для второго случая (когда пробойник выходит из тела с ненулевой скоростью)

Интегрируя (18), находим аналогичный предыдущему интеграл

$$\frac{2}{\alpha V} \frac{1}{q} F\left(\beta, \frac{1}{q}\right) = t + C_4, \quad (20)$$

где обозначено $\beta = \arcsin\left(q \sin \frac{\alpha x}{2}\right)$, F - эллиптический интеграл 1-го рода.

Подставляя начальные условия (5), находим $C_4 = 0$. (20) определяет зависимость $t = t(x)$. Эта зависимость аналогична рис. 2, только остановка происходит не на границе тела, а внутри него.

Заключение

В работе рассмотрены три случая проникания твердого тела через преграду: 1) когда тело застревает в преграде; 2) когда оно вылетает из преграды с ненулевой скоростью; 3) когда скорость в момент вылета равна 0.

Исследованы законы движения тела в зависимости от времени.

Показано, как возможно определить сопротивление среды прониканию через начальную скорость и скорость на вылете тела из преграды.

Благодарности

Работа выполняется в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации ААААА17-117121140065-7.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хилл Р. Математическая теория пластичности. – М.: ГИТТЛ. – 1956. – 529 с.
2. Соколовский В. В. Теория пластичности. – М.: Высш. шк., 1969. – 608 с.
3. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
4. Ивлев Д. Д., Максимова Л. А. О вдавливании индентора в идеальную жесткопластическую полосу // Изв. РАН. Механика тверд. те-ла, – 2000. – № 3. – С. 131 – 136.
5. Соловьев Ю. И. К задаче о пластическом состоянии материала под жестким шероховатым штампом при вне центральном нагружении // ПМТФ. – 1960. – № 1. – С. 110 – 116.
6. Hertz H. Uber die Berührung iester elastischer Korper, J. reine angeu. math. (Crelle), 92, 1881. – 155 pp.
7. Ляв А. Математическая теория упругости. – ОНТИ, 1935. – 674 с.
8. Daris R. M. The determination os static and dynamic yield stresses using a steel fall. Proc. Roy. Soc. Lon-don., A, 197. – 1949. – 416 pp.
9. Ивлев Д. Д. Вдавливание тонкого лезвия в пластическую среду // Изв. АН СССР. ОТН, 1957. – № 10. – С. 89 – 93.
10. Анисимов А. Н., Хромов А. И. Внедрение клина в полупространство при условии текучести Кулона – Мора // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия: Физ.-мат. науки, – 2007. – № 1 (14). – С. 44 – 49.
11. Давыдов Д. В., Мяснинкин Ю. М. О внедрении тел в жесткопластическую среду // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. – 2009. – № 1. – С. 94 – 100.
12. White M. P. and Griffis L. The propogation of plastieity in uniaxial compression. J. Appl.mech, 15. – 1998. – 256 pp.
13. Taylor G. I. The use flat-ended projectiles for determining Dynamic yield stress. I Theoretical considerations. Proc. Roy. Soc. Lond., A. 194. – 1948. – 289 pp.
14. Thomson W. T. An approximate theory of armor penetretion. J. Appl. Phys., 26. – 1955. – 80 pp.
15. Chanyshev A. I. and Abdulin I. M. The problem solution on wedge penetration in an initially anisotropy medium within the rigid-plastic scheme. In the conference proceedings IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, pp. 012011.
16. Чанышев А. И., Абдулин И. М., Гутарова И. В., Ефименко Л. Л., Фролова И. В., Лукьяшко О. А. Состояние полной и неполной пластичности для неравномерно анизотропных сред // Фундаментальные и при-кладные вопросы горных наук, – 2019. – Т. 6. –№ 1. – С. 244 – 249.
17. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Чанышев А.И., Чецин Д. О. Определение усилий для изменения траек-тории движения пневмопробойника в грунте // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 4. – С. 69–79.
18. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Чанышев А.И., Чецин Д. О. Определение радиуса поворота пневмопробойника при изменении траектории его движения в грунте // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 3. – С. 43–50.
19. Данилов Б. Б., Чанышев А. И., Чецин Д. О. Определение усилий для изменения траектории движения пневмопробойника в грунте // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т.2. – № 2. – С. 268 – 272.
20. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

© А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, О. А. Лукьяшко, 2021

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МОЛОТОВ ДЛЯ ЗАБИВАНИЯ СТАЛЬНЫХ СВАЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

Владимир Васильевич Червов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный просп., 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией механизации горных работ, тел. (383) 205-30-30 доб. 128, e-mail: chervov@misd.ru

Обоснована актуальность применения пневматических молотов при «закрытом способе» строительства подземных сооружений. Определены силы сопротивления, возникающие при забивании стальной трубы в грунт. На основе анализа опыта длительной эксплуатации пневматических молотов с переменной структурой мощности установлено соответствие величины энергии удара диаметру забиваемой трубы. Предложена зависимость энергии единичного удара пневматического молота от диаметра трубы, забиваемой открытым концом. Обоснован главный параметр пневматического молота, определяющий технические возможности данной машины и эксплуатационные требования. Даны характеристики типоразмерного ряда пневматических молотов с переменной структурой мощности. Приведены примеры вертикального погружения труб на строительных объектах страны. Показана технологическая возможность сооружения подпорных стен в грунте на основе использования стального проката: двутавров, швеллеров, шпунта и т.п. Описаны схемы размещения технологической оснастки для надежного крепления пневматического молота к забиваемому в грунт стержневому элементу.

Ключевые слова: пневматический молот, труба, масса, удар, частота ударов, сжатый воздух, расход воздуха, грунт, сила

EXPERIENCE OF STEEL PILE DRIVING BY PNEUMATIC HAMMERS IN UNDERGROUND CONSTRUCTION BY THE CUT-AND-COVER METHOD

Vladimir V. Chervov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Head of Mining Mechanization Laboratory, +7 (383) 205 30 30 ext. 128, e-mail: chervov@misd.ru

The timeliness of application of pneumatic hammers in the deep bore tunneling in underground construction is justified. The penetration resistance forces in steel pipe driving in soil are determined. The analysis of long-term operation of adjustable capacity pneumatic hammers shows the conformity of the blow energy and the driven pipe diameter. The relationship between the unit blow energy and the open-ended pipe diameter is proposed. The main pneumatic hammer parameter to govern the machine performance is substantiated. The standard pneumatic hammers of adjustable capacity are characterized. The cases of vertical pipe driving at construction sites in Russia are described. The technological capability of construction of retention wall in soil using rolled steel, namely, I-beams, U-sections, piling bars, etc. is illustrated. The production tooling arrangements to ensure secure mounting of the hammer on the axial element driven in soil are described.

Keywords: pneumatic hammer, pipe, mass, blow, blow frequency, compressed air, air flow rate, soil, force

При строительстве метрополитена используют как «закрытый способ» ведения работ, без вскрытия дневной поверхности, так и «открытый способ», при котором станции и тоннели сооружаются в котлованах или в траншеях с последующей засыпкой грунтом [1]. Закрытый способ применяется при строительстве линий глубокого заложения, когда этого требуют не только гидрогеологические условия или сохранность ценной застройки в городах, но и тогда, когда применение открытого способа строительства сопряжено с экономическими потерями, существенно превышающими затраты на закрытый способ строительства. Во всех остальных случаях станции и тоннели мелкого заложения делают открытым способом. В Новосибирске строительство всех подземных станций метрополитена было осуществлено открытым способом. Котлованы для сооружения таких станций имеют глубину более 30 метров. Для предотвращения обрушения грунта и обеспечения устойчивости стен котлованов применяется способ предварительного сооружения стены в грунте. После полного возведения стен в грунте на полную проектную глубину можно проводить безопасную выемку грунта из котлована. Кроме котлованов для строительства станций требуются специальные камеры для опускания проходческого щита на проектную глубину заложения тоннелей метрополитена или подъема на дневную поверхность. Стенки этих камер изготавливаются из предварительно забитых на проектную глубину вертикальных труб путем их жесткого соединения между собой по мере извлечения грунта. В результате образуется вертикальная выработка в грунте с надежно укрепленными стенами.

Энергия удара при забивании трубы расходуется на преодоление силы сопротивления со стороны грунта [2].

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 и сил трения F_3 и F_4 в результате действия веса грунтового керна.

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4. \quad (1)$$

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.

$$F_1 = f(d; \delta). \quad (2)$$

Силы трения F_2 по боковой поверхности пропорциональны площади боковой поверхности трубы, поэтому зависят от диаметра трубы линейно.

$$F_2 = f(d). \quad (3)$$

Силы трения наружной поверхности трубы о грунт F_3 от действия веса грунтового керна возрастают в квадратичной зависимости от диаметра трубы [3].

$$F_3 = f(d^2). \quad (4)$$

Силы трения внутренней поверхности трубы о грунтовый керн F_4 пропорциональны квадрату диаметра трубы.

$$F_4 = f(d^2). \quad (5)$$

Сопротивление от действия веса грунтового керна с увеличением диаметра забиваемой трубы становится значительным. Поэтому забивание трубы диаметром более 0,8 м необходимо производить с периодическим удалением грунтового керна из трубы. Это уменьшит 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. Снижение до минимума сил трения F_3 и F_4 , действующих от веса грунтового керна, дает возможность использовать линейную зависимость энергии удара от диаметра трубы при выборе пневматического молота для забивания трубы.

Диапазон диаметров забиваемых в грунт труб находится в пределах от 0,1 м до 1,2 м. Исходя из многолетнего опыта прокладки стальных труб-кожухов [4] подземных коммуникаций известно, что для забивания стальной трубы открытым концом диаметром 1,4 м требуется пневмомолот с энергией удара 12 кДж, а при диаметре 0,3 м – 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

$$L = f(d_{TP}) = 9,7 \cdot d_{TP} - 1,6. \quad (6)$$

где L – требуемая энергия удара, кДж;

d_{TP} – диаметр забиваемой трубы, м.

Сила сопротивления F при забивании трубы закрытым концом в грунт складывается из двух составляющих: силы лобового сопротивления F_1 и силы трения F_2 по боковой поверхности вследствие обжатия трубы окружающим грунтом.

$$F = F_1 + F_2. \quad (7)$$

Сила F_1 лобового сопротивления пропорциональна площади поперечного сечения трубы, которая увеличивается в квадратичной зависимости от диаметра d .

$$F_1 = f(d^2). \quad (8)$$

Сила трения F_2 по боковой поверхности пропорциональна площади боковой поверхности трубы, поэтому зависит от диаметра трубы линейно.

$$F_2 = f(d). \quad (9)$$

При малом диаметре трубы, забиваемой закрытым концом в грунт, сила трения F_2 по боковой поверхности во много раз больше силы F_1 лобового сопротивления. Именно сила трения F_2 по боковой поверхности является определяющей при прокладке трубной плети большой длины. Поэтому можно принять линейную зависимость энергии удара от диаметра трубы, забиваемой в грунт закрытым концом.

Для забивания стальной трубы с закрытым торцом диаметром 104 мм достаточно 0,3 кДж, а для трубы диаметром 325 мм требуется 0,9 кДж.

Если принять линейную зависимость требуемой для забивания трубы энергии удара от диаметра в диапазоне 0,1-0,3 м с закрытым концом, то

$$L = f(d_{TP}) = 3 \cdot d_{TP}. \quad (10)$$

где L – требуемая энергия удара, кДж;

d_{TP} – диаметр забиваемой трубы, м.

Для забивания труб малого диаметра, в принципе возможно использование пневмомолота с большой энергией удара 12 кДж. Но это нецелесообразно по экономическим соображениям:

- увеличенная стоимость оборудования;
- большие эксплуатационные расходы на аренду автокрана большой грузоподъемности для монтажа оборудования;
- компрессор увеличенной производительности;
- значительная сила отдачи не будет полностью уравновешена силой трения трубы о грунт, что потребует дополнительного оборудования для создания напорного усилия.

Кроме этого, большие габариты и вес пневмомолота требуют применения копровой установки. Поэтому, для каждого диаметра труб целесообразно использовать пневмомолот с определенной энергией удара.

Главным параметром пневматических молотов [5, 6] для забивания труб, имеющих общий принцип работы системы воздухораспределения [7, 8], была принята масса ударной части (см. таблицу). Этот параметр позволяет определить энергию удара исходя из заданной предударной скорости $v_y = (4,0...4,5) \text{ м/с}$ на номинальном избыточном давлении сжатого воздуха $p_m = 0,6 \text{ МПа}$.

$$L = 0,5 \cdot M_{y0} \cdot v_y^2 \quad (11)$$

Технические характеристики пневмомолотов серии Тайфун.

Машина	Масса ударника, кг	Энергия удара, Дж	Частота ударов, с ⁻¹	Расход, м ³ /с	Диаметр труб, мм	Диаметр (длина) машины, мм	Масса машины, кг
Тайфун-40	40	400	3-5	0,033-0,058	До 159	160 (1000)	80
Тайфун-70	70	700	2,5-3,7	0,050-0,075	До 273	160 (1400)	140
Тайфун-130	130	1300	2-4	0,063-0,125	До 325	240 (1330)	280
Тайфун-190	190	1800	2-3,2	0,083-0,133	До 530	240 (1700)	370
Тайфун-320	320	3000	1,5-2,5	0,100-0,150	До 630	270 (1920)	650
Тайфун-500	500	4300	1-1,7	0,100-0,167	До 820	400 (2000)	1350
Тайфун-740	740	6000	1-1,5	0,133-0,200	До 1020	400 (2650)	1750
Тайфун-1000	1000	8500	0,8-1,3	0,167-0,250	До 1220	460 (2670)	2500
Тайфун-1500	1500	12000	1-1,5	0,266-0,400	До 1420	600 (2700)	3500

В Казани работы по сооружению фундаментных оснований ведут десятки пневматических молотов Тайфун-190 и Тайфун-500. Объемы составляют многие сотни стальных труб-свай в год (рис. 1).



Рис. 1. Возведение подпорных стен при строительстве открытым способом станций метро в Казани при помощи пневматического молота Тайфун-500

Для опускания проходческого щита при строительстве метрополитена в Новосибирске при помощи пневматического молота Тайфун-190 были сооружены подпорные стены вертикальной камеры в грунте глубиной 28 м. Для этого были забиты около двухсот вертикальных труб диаметром 377 мм (рис. 2).

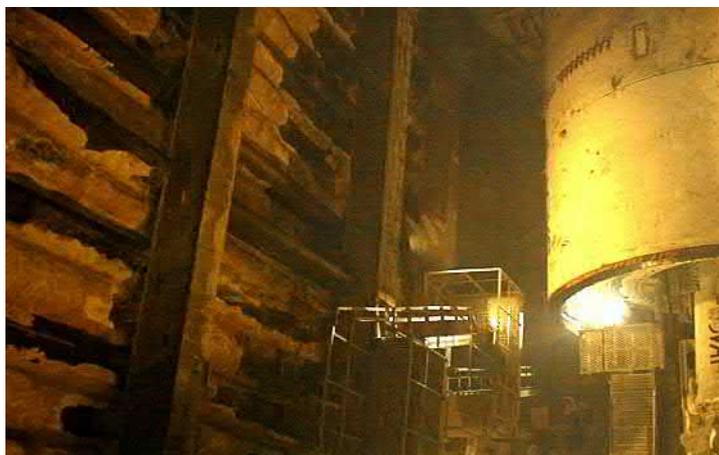


Рис. 2. Вид сверху внутри камеры на проходческий щит (он справа) и подпорную стену из забитых в грунт труб диаметром 377 мм при помощи пневматического молота Тайфун-190.

В Екатеринбурге пневматическим молотом Тайфун-500 за 2,5 часа была забита вертикальная обсадная труба диаметром 1420 мм на глубину 8 м.

Очень большой объем работ по забиванию двутавров с сечением №60 пневматическим молотом Тайфун-500 был выполнен при строительстве станции метро "Березовая роща" (рис. 3). Мягкая работа пневмомолота обеспечила выполнение работы по сооружению подпорных стен с погрешностью расположения верхнего торца двутавра относительно проектной отметки не более 10 мм.



Рис. 3. Сооружение подпорной стены в грунте при строительстве станции метро "Березовая роща" в Новосибирске открытым способом: пневматический молот Тайфун-500 забивает двутавр (слева) и ряд забитых в грунт двутавров

Для забивания вертикального шпунта 1 (рис. 4) или двутавра необходимо на его задний конец присоединить при помощи продольных сварных швов отрезок трубы 3 длиной около 0,4 м. Отрезок трубы предназначен для закрепления машины при помощи насадки и стяжного устройства и для наилучшей передачи ударного импульса забиваемому элементу [9–11].

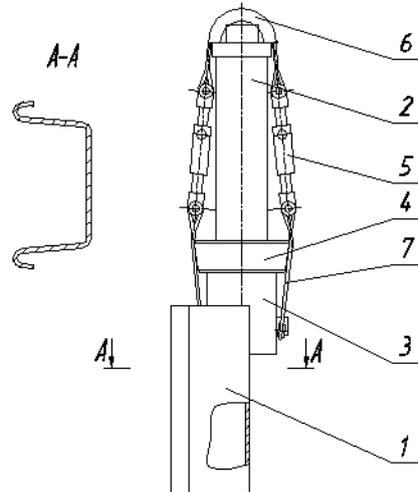


Рис. 4. Соединение машины с забиваемым шпунтом

1 – шпунт; 2 – пневматический молот; 3- труба; 4 – насадка; 5 – талреп; 6 - прижим; 7 – канат сдвоенный; 8 – канат задний

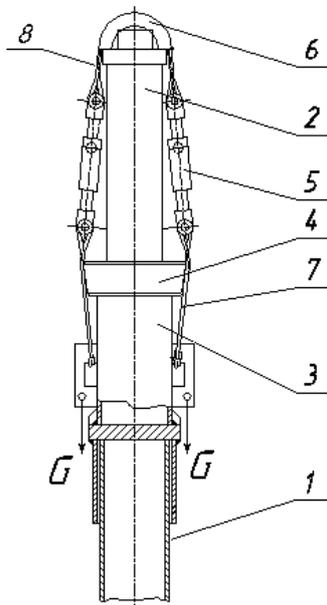


Рис. 5. Соединение машины с вертикальной трубой

1 – труба; 2 – пневматический молот; 3 – переходник; 4 – насадка; 5 – талреп; 6 - прижим; 7 – канат сдвоенный; 8 – канат задний; G – усилие от тяговой лебёдки, веса пригруза или дополнительного стяжного устройства.

Для забивания одиночной вертикальной трубы пневматический молот необходимо закрепить при помощи стяжного устройства, приварив к трубе два ребра. Для забивания большого количества вертикальных труб следует изготовить переходник 3 (рис. 5). Это позволит сократить время подготовительных операций.

Выводы

1. Для каждого диаметра труб рекомендуется использование пневматического молота с определенной энергией удара.

2. При наличии нескольких пневмомолотов с разной энергией удара целесообразно забивание первой секции трубной плети начинать пневмомолотом с меньшей силой отдачи и энергией удара.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории механизации горных работ ИГД СО РАН за активное участие в изготовлении и в стендовых испытаниях опытных образцов пневматических молотов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по проекту № 0256-2021-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власов С.Н., Торгалов В.В., Виноградов Б.Н. Строительство метрополитенов. – М.: Транспорт, 1987. – 278 с.
2. Григоращенко В. А. Прокладка металлических труб пневмопробойниками. – Новосибирск: Изд. ИГД СО АН СССР. Препринт №38, 1990. – 32 с.
3. 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.
4. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Новый типоразмерный ряд пневмопробойников // ФТПРПИ. – 1989. – № 4. – С. 61–65.
5. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Пневмопробойники. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 1990. – 217 с.
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. 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.
8. Патент РФ № 2400350. Устройство ударного действия. / Червов В.В., Смоляницкий Б.Н., Трубицын В.В. – опубл. в Б. И. 2010, № 27.
9. Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Тупицын К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1985. – 134 с.
10. Тищенко И.В. Модели пневматических импульсных генераторов с переменной структурой ударной мощности // Известия вузов. Строительство. – 2014. – № 3. – С.79–87.
11. 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.

© В. В. Червов, 2021

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В УДАРНЫХ МАШИНАХ

Дмитрий Олегович Чещин

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. +79231988181, e-mail: dimixch@mail.ru

Вадим Валерьевич Плохих

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. +79133890174, e-mail: vadim.plohih@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 лаборатории бурения и технологических импульсных машин, тел. +79139386506.

В статье рассматривается возможность применения накопителей энергии в виде пневматической и механической пружины для гидравлических ударных машин в составе роботизированных буровых комплексов. Предложены новые конструктивные схемы, которые позволяют изменять энергетические параметры машины в соответствии с внешними условиями работы для реализации адаптивных технологических процессов. Имитационное моделирование предложенных схем в программном комплексе ITI SimulationX позволило определить динамические параметры и исследовать рабочий цикл гидроударника. Анализ полученных результатов показал возможность создания данных типов машин с учетом их достоинств и недостатков.

Ключевые слова: проходка скважин, породный массив, гидроударник, пневмоударник, пружина, пневмопружина, рабочий цикл, адаптивные технологии

ABOUT THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF ENERGY STORAGE IN IMPACT MACHINES

Dmitriy O.Cheshchin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, candidate of technical sciences, Senior researcher of Mining and Construction GeoEquipment Department, tel. +79231988181, e-mail: dimixch@mail.ru

Vadim V. Plokhikh

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher of Mining and Construction GeoEquipment Department, tel. +79133890174, e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

Andrey K. Tkachuk

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, candidate of technical sciences, Senior researcher of laboratory of drilling and technological impulse machines, tel. +79139386506

The article discusses the possibility of using energy storage devices in the form of pneumatic and mechanical springs for hydraulic percussion machines as part of robotic drilling systems. New design schemes are proposed that allow changing the energy parameters of the machine in accordance with the external operating conditions for the implementation of adaptive technological processes. Simulation modeling of the proposed schemes in the ITI SimulationX software package made it possible to determine the dynamic parameters and study the working cycle of the hydraulic hammer. The analysis of the results obtained showed the possibility of creating these types of machines, taking into account their advantages and disadvantages.

Key words: well drilling, rock mass, hydraulic hammer, pneumatic hammer, spring, pneumatic spring, working cycle, adaptive technologies

Введение

Гидроударные машины находят широкое применение в области горно-добывающей промышленности, в строительстве объектов промышленного и гражданского назначения. В России и за рубежом распространены навесные ударные рабочие органы, которые устанавливаются на базовых машинах, таких, как гидравлические экскаваторы или специальные ходовые и стационарные устройства с манипуляторами для разрушения различных крепких материалов, строительных конструкций, мерзлых грунтов, дорожных одежд, забивки шпунта, свай и других операций. В горной промышленности гидравлические ударные машины применяются в установках для дробления негабаритов, в качестве отбойных рабочих органов проходческих машин, а также в бурильных машинах погружного и выносного типа [1-4].

Методы и материалы

В ИГД СО РАН разработана принципиальная конструктивная схема гидроударного механизма объемного типа для реализации виброударной технологии проходки горизонтальных скважин в породных массивах. Отличительным признаком данной схемы, по сравнению с классическими, является наличие двух энергоносителей: воздуха, подающегося в камеру рабочего хода и рабочей жидкости, поступающей в камеру холостого хода в зависимости от положения ударника [5-7].

Предлагаемая конструктивная схема ударной машины основывается на возможности удешевления производства, эксплуатации и ремонта машин за счет снижения точности изготовления сопряженных деталей «корпус-ударник» без ухудшения эксплуатационных характеристик машины. Это достигается за счет использования уплотнительных элементов для обеспечения герметичности камер, что позволяет снизить точность сопрягаемых деталей «корпус-ударник», тем самым уменьшая как трудоемкость изготовления и ремонта машины, так и ее стоимость.

Наличие уплотнительных элементов, однако, не позволяет применять традиционные конструктивные решения механизма распределения потока энергоносителя с использованием каналов и отверстий в корпусе, которые открываются

или перекрываются движущимся ударником [8-9]. Необходимо в таком случае реализовать функции обратной связи между положением ударника и направлением движения энергоносителя другими техническими средствами. Наиболее перспективно использовать для этого внешний распределитель и бесконтактные датчики [10].

Принципиальная схема такого гидроударника с накопителем энергии в виде пневмопружины (далее пневмо-гидроударник) показана на рис.1.

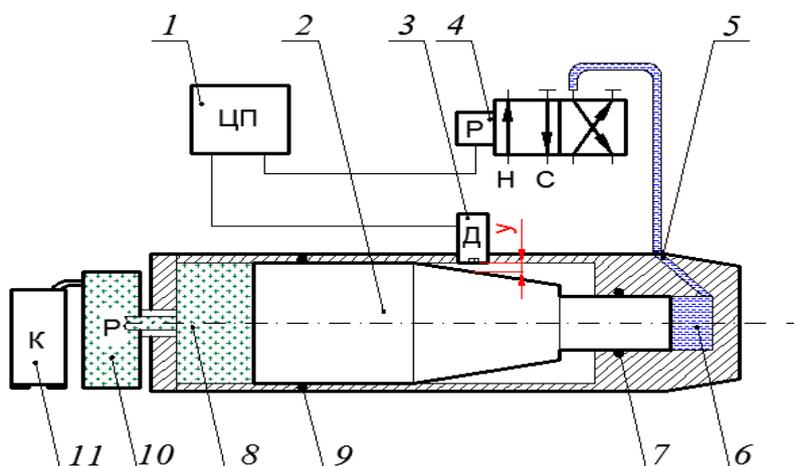


Рис. 1. Принципиальная схема пневмо-гидроударника:

1 – центральный процессор; 2 – ударник; 3 – датчик расстояния; 4 – электрозолотник; 5 – входной канал; 6 – камера холостого хода; 7,9 – уплотнительные элементы; 8 – камера рабочего хода; 10 – вход магистрального давления; 11 – источник магистрального давления

Принцип действия механизма следующий. Камера рабочего хода 8 соединена с ресивером 10, в который закачивается сжимаемый энергоноситель (воздух), тем самым создается усилие на ударник 2 для осуществления рабочего хода. После достижения рабочего давления в ресивере компрессор отключается. Положение ударника отслеживается благодаря организованному на его поверхности конусу. Зная параметры конуса, и определяя с помощью датчика 3 изменяющийся при работе машины зазор «у», можно отслеживать положение ударника. Данные с датчика обрабатываются центральным процессором 1, который в зависимости от положения ударника переключает электрозолотник 4, попеременно подключая камеру холостого хода 6 к напору Н или сливу С. Таким образом, создается периодически действующее усилие на ударник со стороны камеры холостого хода, приводящее его в движение.

Основным преимуществом приведенной схемы является возможность плавного, бесступенчатого регулирования величины рабочего хода ударника за счет управления временем переключения потока энергоносителя, что позволяет регулировать энергию и частоту ударов. Использование логических контроллеров позволяет не только наиболее гибко осуществлять настройку машины, но также

и автоматизировать этот процесс в соответствии с внешними условиями работы. К тому же при взводе ударника давление в пневматической камере и ресивере возрастает за счет сжатия, что производит положительный эффект на работу машины, так как при взводе сила со стороны рабочего хода увеличивается (в отличие от стандартных схем), уменьшая тем самым время разгона.

Однако, известно, что при адиабатном сжатии газа повышаются его давление и его температура [11–12]. С учетом данного фактора и использования смазывающих компонентов, появляется вероятность их воспламенения в работающей машине, что недопустимо. Таким образом, следует провести оценку риска достижения критической температуры в пневматической камере предлагаемой ударной машины.

Для исследования динамики рабочего цикла пневмогидроударной системы построена имитационная модель в программе ITI SimulationX [13]. Расчетная схема, составленная в программе, представлена на рисунке 2.

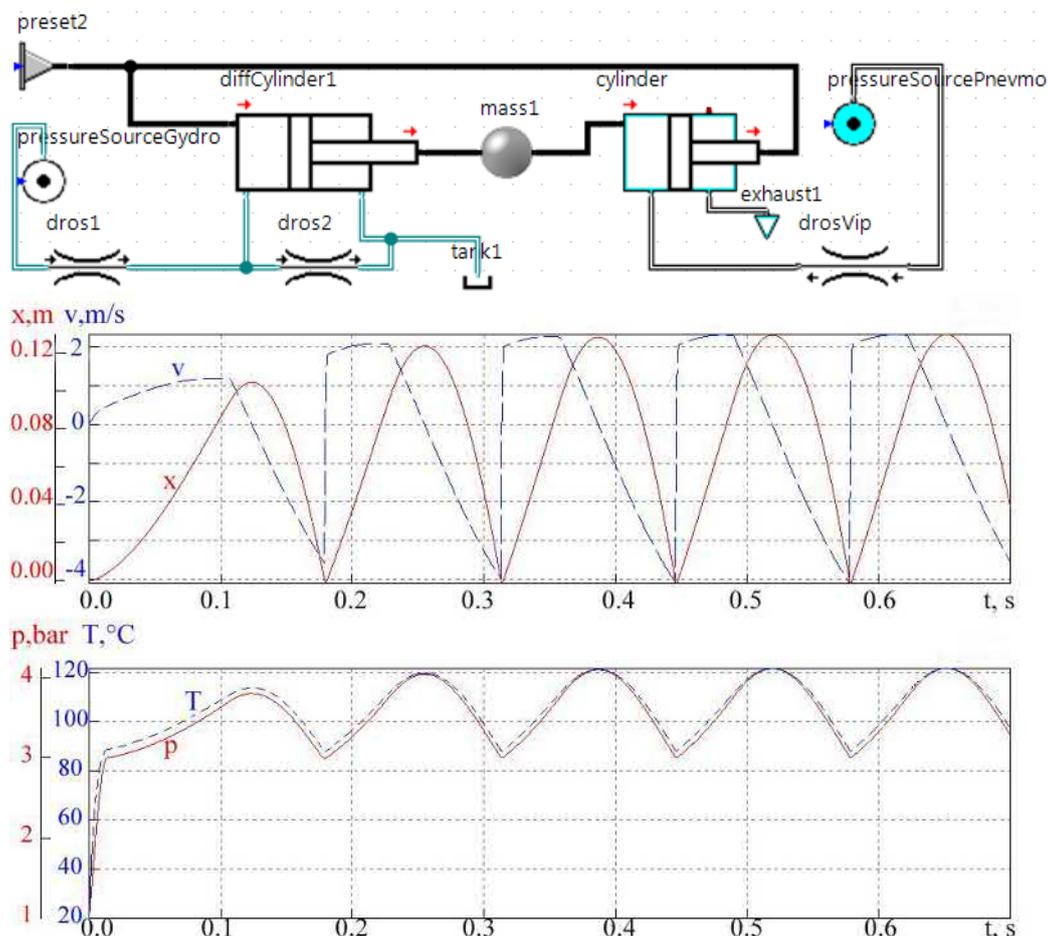


Рис.2. Расчетная схема и результаты имитационного моделирования пневмо-гидроударника

x – перемещение ударника; v – скорость ударника; p – давление в пневмокамере; T – температура в пневмокамере

Все объекты, введенные в расчетную схему на рисунке 2, соответствуют конструктивным элементам, изображенным на рисунке 1.

Исходные данные: площадь сечения камеры холостого хода $S_x=201 \text{ мм}^2$; диаметр проходного сечения электрозолотника $d_z=10 \text{ мм}$; габаритный ход ударника $X_m=140 \text{ мм}$; давление гидравлического энергоносителя $p_g=10 \text{ МПа}$; масса ударника $M=30 \text{ кг}$; площадь сечения камеры рабочего хода (пневмокамеры) $S_p=7850 \text{ мм}^2$; первоначальное давление в пневмокамере $p=3 \text{ бара}$; объем ресивера $V_p=4 \text{ л}$.

В качестве граничного условия при моделировании выступал рабочий ход ударника, не позволяющий наносить удар по задней части машины, который имел значение $127 \div 129 \text{ мм}$. В результате были получены временные диаграммы хода ударника «х» (значение 0 соответствует его положению во время удара о наковальню) и его скорости «v», а также давления «р» и температуры «Т» в пневматической камере.

Из полученных диаграмм видно, что температура в пневматической камере не поднимается выше 122 градусов при повышении давления на 38%. Если рассматривать случай попадания гидравлического масла в пневматическую камеру, то согласно ГОСТ 17479.3-85 «Масла гидравлические. Классификация и обозначение», в целом соответствующий международному стандарту ISO 3448, температура вспышки гидравлического масла МГЕ-46В составляет 190 градусов. [14,15] Наиболее часто в рабочих условиях в качестве смазывающего компонента используется моторное масло, которое добавляется непосредственно в пневмомагистраль вместе с энергоносителем. У современных моторных масел температура вспышки превышает $+200^\circ\text{C}$, обычно она равна $+210 \dots 230^\circ\text{C}$ и выше [16,17].

Основываясь на вышесказанном можно сделать вывод, что температура в пневматической камере ударной машины, не превышает температуру вспышки масла и имеет температурный запас около 55%, что позволяет машине работать в штатном режиме без риска воспламенения.

По предлагаемой схеме был сконструирован макет пневмо-гидроударной машины и проведена экспериментальная проверка на специальном стенде.



Рис. 3. Стенд с гидроударной машиной.

В результате экспериментов была подтверждена работоспособность данной схемы и выявлены некоторые недочеты. Достигнутая частота ударов машины оказалась существенно ниже ожидаемой и имела значение 3.3 Гц. Как оказалось максимально возможную частоту ограничивал применяемый электрозолотник VE10, у которого частота переключений составляет $3.5 \div 4$ Гц [18,19].

Также, низкая частота ударов вызвана дополнительным сопротивлением при движении ударника возникающем в применяемых манжетных уплотнениях. Особенно остро это ощущается при низких рабочих давлениях. В результате под действием пневматического энергоносителя при рабочем ходе ударник двигался с меньшей скоростью, чем ожидалось.

Избавится от уплотнения, тем самым снизить сопротивление на ударнике при его рабочем ходе, представляется возможным с применением механической пружины сжатия для разгона ударника машины (рис.4а). В этом случае исключается необходимость использования дополнительного источника энергии в виде компрессора и ресивера.

Для сравнительного анализа энергетических параметров предлагаемого гидроударника с пневмо-гидроударником (рис.1) были проведены исследования на имитационной модели гидроударника с накопителем энергии в виде механической пружины. На рис.4 представлена его принципиальная схема (рис.4а) и расчетная схема имитационной модели (рис.4б).

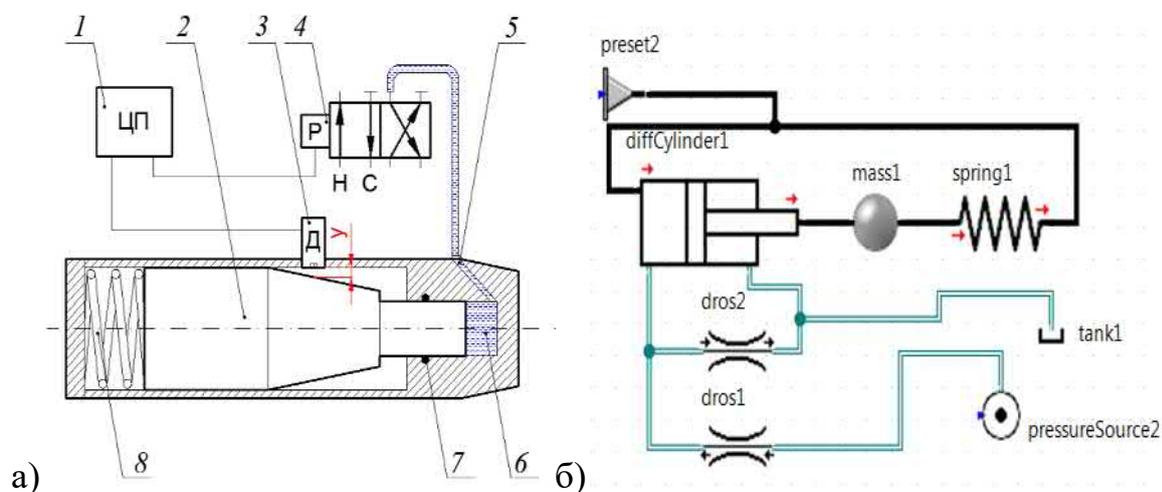


Рис. 4. Схема гидроударника с механической пружиной:

а - принципиальная схема; б – расчетная схема имитационной модели. 1 – центральный процессор; 2 – ударник; 3 – датчик расстояния; 4 – электрозолотник; 5 – входной канал; 6 – камера холостого хода; 7 – уплотнительный элемент; 8 – пружина.

Результаты

Исходные данные и граничное условие соответствовали модели пневмо-гидроударника. Для модели с пневматической пружиной изменяемым параметром служило значение давления в камере рабочего хода «р», в модели с механической пружиной – жесткость пружины «k».

Результаты имитационного моделирования схем гидроударника

Пневматическая пружина				Механическая пружина		
p, бар	V, м/с	v, Гц	t, °C	k, Н/мм	V, м/с	v, Гц
1.0	1.05	2.67	47	10	2.36	5.64
1.5	2.20	4.70	79	15	2.85	6.92
2.0	2.93	6.04	98	20	3.30	7.88
3.0	4.11	7.55	122	25	3.71	8.68
3.5	4.52	7.90	127	30	4.04	9.38
4.0	3.87	8.41	120	35	4.37	10.00

Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что механическая пружина, как и пневматическая, способна обеспечить необходимую предупредную скорость ударника. Опыт ранее проводившихся исследований в ИГД СО РАН с классическими пневмоударными машинами установил, что это значение ограничивается величиной 4 м/с [20]. Превышение этого значения вызывает разрушение ударника в наиболее ослабленных местах, а именно в районе выхлопных отверстий. В предлагаемой конструкции гидроударной машины такие места отсутствуют, таким образом появляется возможность обеспечивать предупредную скорость более 4 м/с без риска поломки машины.

Как видно из таблицы при давлении $p=4$ в пневмо-гидроударнике возникает снижение предупредной скорости. Это обстоятельство вызвано малой площадью поперечного сечения и, как следствие недостаточным усилием на ударнике, со стороны камеры холостого хода, неспособным обеспечить полный рабочий ход ударника. С учетом повышающегося давления в пневмокамере при взводе, рабочий ход ударника составил 84 мм, то есть всего 65% от требуемого значения. Увеличение площади поперечного сечения камеры холостого хода до 254 мм², позволяет обеспечить требуемый рабочий ход и максимальную предупредную скорость равную 4.96 м/с, однако увеличивает расход гидравлического энергоносителя почти 2 раза.

Обсуждение

Схемы гидроударной машины и с пневматической, и с механической пружиной позволяют не только удешевить производство, эксплуатацию и ремонт машин за счет снижения точности изготовления сопряженных деталей «корпус-ударник» без ухудшения эксплуатационных характеристик машины, но и позволяют проводить плавное, бесступенчатое регулирование величины рабочего хода ударника за счет управления временем переключения потока энергоносителя, что дает возможность регулировать энергию и частоту ударов.

Несомненно эти схемы имеют и ряд своих достоинств и недостатков. Так, пневматическая пружина, как было отмечено ранее, требует дополнительного оборудования в виде компрессора и ресивера, а дополнительное уплотнение на ударнике снижает его предупредную скорость и максимальную частоту. Повы-

шенная температура в пневмокамере увеличивает риск выхода из строя уплотнения с последующим появлением утечек и падением энергетических параметров.

Механическая пружина исключает эти недостатки, однако ресурс стандартных пружин ограничивается значением 10^7 циклов, что составляет около 555 часов, а на практике эта цифра имеет меньшее значение [21,22]. Также в конструкции необходимо предусмотреть ограничитель, исключающий соударение витков пружины, вызывающее снижение ее ресурса в разы.

Заключение

Таким образом метод имитационного моделирования в программе ITI SimulationX позволил провести исследование и обоснование возможности применения в гидравлической ударной машине накопителей энергии в виде пневматической и механической пружины. Дальнейшее исследование и более детальная проработка приведенных схем гидроударников позволит создать новый ряд ударных устройств с автоматизированным процессом их регулировки в соответствии с внешними условиями работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галдин Н. С., Бедрина Е. А. Ковши активного действия на основе гидроударников для экскаваторов: учеб. пособие. — Омск: Изд-во СибАДИ, 2003.
2. Архипенко А. П., Федулов А.И. Гидравлические ударные машины. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1991. – 106 с.
3. Гурков К.С., Муталов Ф.М., Смоляницкий Б.Н. Дальнейшее развитие применения пневмопробойников в строительстве // Механизация строительства. – 1993. – № 1
4. 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.
5. Плохих В.В., Данилов Б.Б., Чецин Д.О. Обоснование принципиальной схемы и анализ динамики рабочего цикла гидравлического ударного механизма объемного типа // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2020. – Т. 7. – № 2. – С. 157 – 162.
6. Плохих В.В., Чецин Д.О. Обоснование схемы ударного механизма с гидравлическим взводом // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М: ИПКОН РАН, 2019. – С. 177 – 180.
7. Плохих В. В., Чецин Д. О. Обоснование принципиальной схемы и определение конструктивных и энергетических параметров гидроударной машины // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. — Омск: СибАДИ, 2020. — С. 15 – 19.
8. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Пневмопробойники. - Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 1990.
9. Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Надеин А.А., Серохвостов С.А. Пневмопробойники для проходки лидерных скважин в грунтах // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 1998. Т. 1. № 1. С. 78-89.
10. Данилов Б.Б., Чецин Д.О. Обоснование схемы управления гидроударной системой одностороннего обратного действия // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2019. Т. 6. №3. С. 33-38.
11. Сивухин Д. В. Общий курс физики. — М.: Наука, 1975. — Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. — 519 с.

12. Савельев И. В. Курс общей физики: Молекулярная физика и термодинамика. — М.: Астрель, 2001. — Т. 3. — 208 с.
13. Официальный сайт SimulationX [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.simulationx.com/>, свободный. — Загл. с экрана (дата обращения: 14.02.2021).
14. Багдасаров Л.Н. Надежной гидравлике - надежное масло // Строительная техника и технологии. сентябрь-октябрь 2002 г. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://for-estspb.ru/directories/maslo_mashin.php (дата обращения: 19.04.2021).
15. МГЕ-46В (ТУ 38.001347-83 изм.1-8) Официальный сайт ЗАО «ВолгаНефтеХим» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://vnhim.ru/b8.php> (дата обращения: 19.04.2021).
16. ГОСТ 4333-87. Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле. — М.: Стандартиформ, 2008. — 8 с.
17. Разбираемся в терминологии моторных масел. Официальный сайт ООО «ПЛ-ТЕХНО» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://компрессоры.рф/news/termin_motor_maslo/ (дата обращения: 20.04.2021).
18. ГОСТ 4333-87. Гидрораспределители золотниковые четырехлинейные на Рном до 32 МПа. — М.: Издательство стандартов, 1991. — 57 с.
19. ЭМ 25-72412-54-УХЛ4 Официальный сайт ООО ПКФ «Электромагнит» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://electromagnit.ru/catalog/em-25/em-25-72412-54-ukhl4/> (дата обращения: 21.04.2021).
20. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Пневмопробойники. - Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 1990.
21. Винтовые цилиндрические пружины сжатия и растяжения. Сайт информационно-технического портала «Развитие» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://razvitie-ri.ru/?page_id=4602 (дата обращения: 21.04.2021).
22. ГОСТ 13764-86 Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Классификация. — М.: Стандартиформ, 2007. — 7 с.

© Д. О. Чецин, В. В. Плохих, А. К. Ткачук, 2021

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА В СЛОИСТОМ ПОРОДНОМ МАССИВЕ

Евгений Николаевич Шер

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела; им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, e-mail: ensher@gmail.com

При гидроразрыве горных пород, широко применяемом в горном деле, важное значение имеет определение формы и размеров образующихся трещин. Большое значение при этом имеет структура породного массива, часто имеющего слоистое строение. В настоящей работе исследуется влияние разной прочности слоев и их напряженного состояния на формы развивающихся трещин. На примерах, с использованием численного моделирования, показано, что в условиях проведения гидроразрыва маловязкими жидкостями трещина преимущественно развивается в слое с меньшими значениями прочности на разрыв или величинами внешнего сжатия. Расчетами в рассмотренных случаях определены значения превышения прочности и внешнего сжатия, при которых происходит развитие трещин гидроразрыва только в одном слое. Показано, что увеличение вязкости жидкости разрыва уменьшает этот эффект.

Ключевые слова: слоистый породный массив, гидроразрыв, форма трещин, прочностные свойства слоев, напряженное состояние слоев

FEATURES OF PROPAGATION OF HYDRAULIC FRACTURES IN STRATIFIED ROCK MASS

Evgeny N. Sher

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Principal Researcher, +7 (383) 205 30 30, e-mail: ensher@gmail.com

In hydraulic fracturing commonly used in mining, it is important to determine the shapes and sizes of created fractures. The governing factor in this case is the structure of rock mass which is often stratified. This study analyzes the influence of strengths of the layers and their stress states on the shapes of the growing fractures. Numerical modeling shows that in hydraulic fracturing with low-viscous fluids, fractures grow mostly in a layer having lower tension or compression strengths. The calculations carried out for the analyzed cases provide the values of tension strength and external compression for hydraulic fractures to grow only in one layer. It is shown that the increase in the breakdown fluid viscosity weakens this effect.

Keywords: stratified rock mass, hydraulic fracturing, fracture shape, strength properties of layers, stress state of layers

Введение

Технология гидроразрыва широко применяется в горном деле, как при интенсификации добычи нефти и газа на нефтяных и газовых месторождениях [1], так и при дегазации угольных пластов [2], при добыче блочного камня, при со-

здании экранов в технологии выщелачивания, при разупрочнении труднообрушаемой кровли на угольных месторождениях [3]. Важной при использовании гидроразрыва является задача определения формы и размеров возникающей трещины. В настоящее время существуют программы расчета процесса развития трещин гидроразрыва на нефтяных и газовых месторождениях, учитывающие геомеханические данные пород месторождения, напряженное их состояние, технологические вопросы проведения гидроразрывов [4, 5]. Но при этом важна наработка понимания качественного влияния различных факторов, определяющих форму трещин гидроразрыва. Среди таких факторов важное значение имеет слоистое строение породного массива, характерное для нефтяных, газовых и угольных месторождений. При этом существенным является, как отличие физико-механических свойств пластов, так и напряженного их состояния [6]. В настоящей работе анализируется влияние различия прочностных характеристик слоев породы и поперечного к плоскости трещин сжатия на форму развивающихся трещин гидроразрыва.

Для расчетов использовалась разработанная раньше программа [7, 8], в которой для расчетов трехмерного напряженного состояния среды в упругом пространстве с плоской трещиной, нагруженных внутренним давлением в условиях внешнего сжатия, использовался метод разрывных смещений [9,10]. Поверхность трещин разбивается на квадратные элементы с шагом a , в пределах которых раскрытие и сдвиги берегов трещины считаются постоянными. Трещины представляются набором дислокационных элементов, описываемых векторами Бюргерса, компоненты которых заранее неизвестны. Находятся они из требования выполнения граничных условий в напряжениях в центрах дислокационных элементов трещины в результате решения соответствующей системы линейных уравнений относительно неизвестных компонент векторов Бюргерса. Коэффициенты такой системы уравнений находятся согласно методу суперпозиции через коэффициенты влияния элементов друг на друга. Для вычисления коэффициентов влияния используются формулы Пича – Келлера, позволяющие рассчитать компоненты тензора напряжений в произвольной точке упругого пространства рядом с дислокационным элементом через контурные интегралы от значений компонент соответствующего вектора Бюргерса вдоль его границы [11].

Эти же формулы применяются для расчета напряжений вблизи кромок трещин для определения возможного разрушения и их развития. За критерий разрушения принимается критерий Новожилова, согласно которому разрушение происходит, если среднее напряжение на характерном элементе среды a превосходит прочность на растяжение σ_t , [12]. Критерий Новожилова применительно к развитию трещин тесно связан с критерием Ирвина. Между критическим коэффициентом интенсивности напряжений на кромке трещины, определяющим трещиностойкость среды, и параметрами критерия Новожилова существует связь:

$$K_{IC} = \sigma_t \sqrt{\pi a / 2}$$

В разработанной программе напряжения, которые сравниваются с σ_t , определяются в центрах дислокационных элементов, примыкающих к кромке трещины.

Расчет развития трещины проводится по шагам, начиная с начальной трещины. На каждом шаге решается в дополнительных к внешнему сжатию напряжениях задача о нагружении берегов трещины давлением. Считается, что давление, создаваемое жидкостью разрыва, по площади трещины распределяется равномерно, при этом учитывается, что на каждом слое может быть свое напряжение внешнего сжатия. В результате решения для каждого элемента ближайшего окружения трещины определяется критическое давление p_c в ней, при котором на этом элементе напряжение превышает значение прочности σ_t среды в месте расположения элемента. После ранжирования элементов окружения, по значению рассчитанного для них значения критического давления p_c n_m элементов с минимальными значениями p_c считаются разрушенными и присоединяются к трещине. Величина n_m выбирается из условий повторяемости результатов при его варьировании и рационального сокращения времени расчёта.

Влияние различия прочностных характеристик слоев породы и поперечного к плоскости трещин сжатия на форму развивающихся трещин гидроразрыва исследовано в задачах о развитии начальной дисковидной трещины, образованной в пласте из горизонтальной скважины, на границе двух слоев (рис.1а) и в пласте ограниченном более прочными породами почвы и кровли (рис.1б).

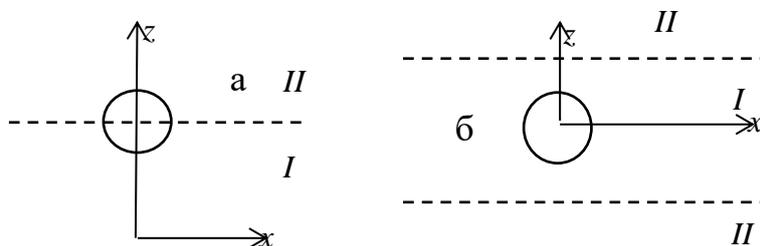


Рис. 1. Схемы расположения начальной дисковой трещины относительно слоев породного массива: а- на границе двух слоев I и II , б - в пласте I , граничащем с породами II

На рис.2 приведены в безразмерном виде, отнесенном к размеру расчетной ячейки a , примеры расчета форм трещин при гидроразрыве, соответствующем схеме рис.1а. Расчеты проведены при следующих параметрах сред: модуль Юнга $E = 3 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, прочность на растяжение среды I (при $z/a < 80$) $\sigma_p = 10^7$ Па. Значения прочности среды II (при $z/a > 80$) принималось в α раз большим. В расчетах, представленных на рис.1 а, б $\alpha = 1.005, 1.02$ соответственно. Значение напряжения внешнего сжатия в обеих средах принималось равным $p_{yy} = 5 \cdot 10^7$ Па

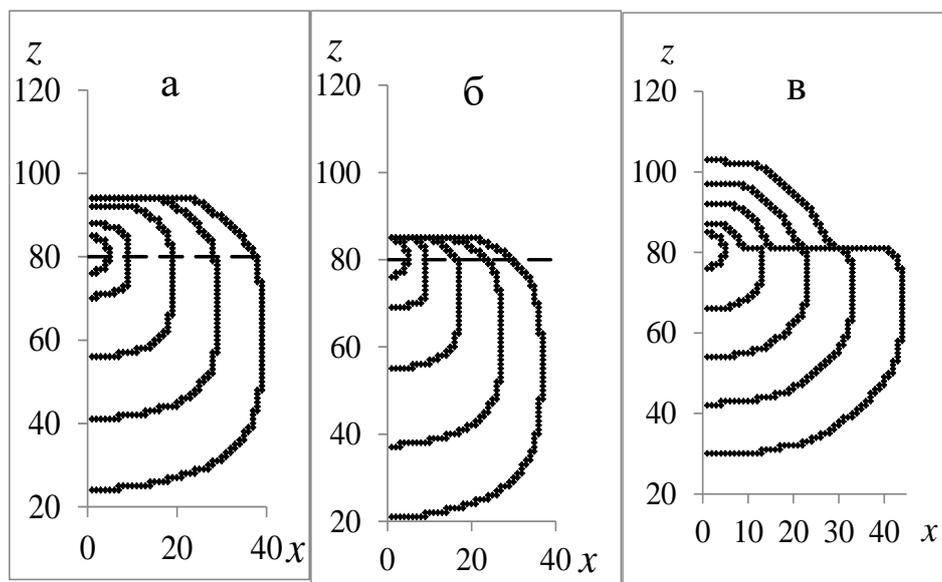


Рис. 2. Расчетные формы плоских трещин гидроразрыва, развивающихся последовательно из начальной круговой на границе пластов разной прочности

На приведенном примере видно, что даже при небольшом контрасте прочности на разрыв или трещиностойкости слоев развитие трещины существенно меняется. Трещина преимущественно развивается в среде с меньшей прочностью и при этом попрежнему стремится сохранять форму близкую к круговой, центр которой смещается. Развитие трещины гидроразрыва, показанное в расчетах, в значительной степени определяется принятым предположением о равномерном распределении давления, оказываемого на берега трещины жидкостью разрыва. Такое предположение оправдывается при использовании для гидроразрыва маловязких жидкостей, например, воды. В тоже время при гидроразрыве, часто используют более вязкие жидкости, гели и даже вязкопластические вещества типа пластилина [13]. В этом случае нагрузка на берега трещины максимальна в месте закачки флюида разрыва. Качественно эффект такого нагружения можно смоделировать в предположении, что вновь образованные берега трещины свободны от нагружения. Были проведены расчеты развития трещины, начиная с начальной, в таком предположении при разных значениях α от $\alpha=1,1$ до $\alpha=5$. Оказалось, что заметное влияние увеличенной прочности верхнего пространства II рис.1а на форму трещин начинается с $\alpha=2$. Характерная картина такого влияния приведена на рис.2в. для случая $\alpha=5$. Видно, что даже при таком большом упрочнении верхнего пространства развитие трещины в нем значительно. Отсюда можно сделать вывод, что использование вязких флюидов разрыва снижает влияния разнопрочности слоев породного массива.

Аналогичное исследование по схеме рис.1а было сделано для случая разного внешнего сжатия слоев породного массива. Расчеты были проведены с теми же параметрами сред, что и в предыдущем случае, за исключением, того что

прочность слоев породы принималась одинаковой ($\alpha=1$), но различным было внешнее их сжатие: в нижнем слое I $p_{yy} = 5 \cdot 10^7$ Па, в верхнем в β раз больше. Результаты расчетов для $\beta=1,005$ и $\beta=1.02$ приведены на рис.3а, б соответственно. На этих рисунках видна аналогичная рис.2а, б картина развития трещины гидроразрыва в слоистом массиве. Увеличение поджатия верхнего слоя на $2.5 \cdot 10^5$ Па по отношению к уровню $p_{yy} = 5 \cdot 10^7$ Па приводит к заметному развитию трещины преимущественно в нижнем слое. При $\beta=1.02$ трещина развивается только в менее сжатом слое I.

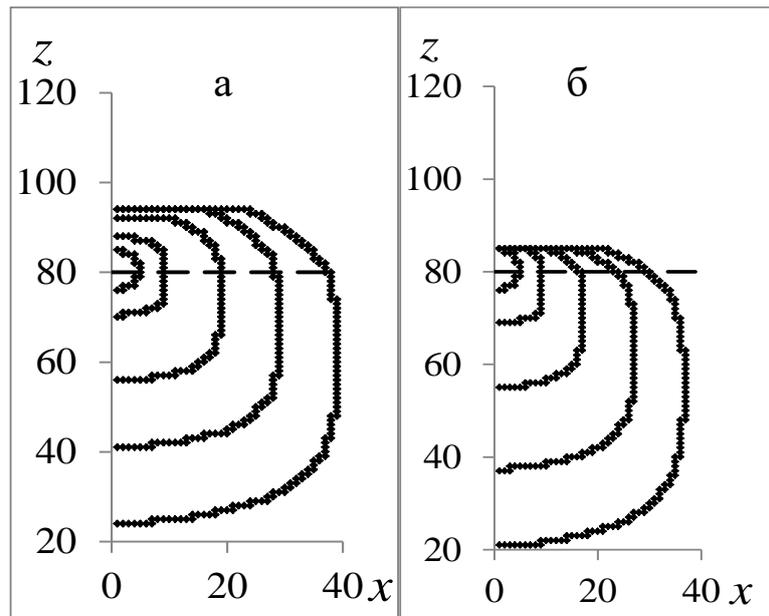


Рис. 3. Расчетные формы плоских трещин гидроразрыва, развивающихся последовательно из начальной круговой на границе пластов с разным внешним сжатием: а – $\beta=1,005$, б – $\beta=1.02$

Практически важным является вариант развития дисковой трещины по схеме рис.1б. По такой схеме с использованием горизонтального бурения производятся гидроразрывы продуктивного пласта при добыче сланцевого газа. На первом этапе дисковая трещина развивается в плоскости, перпендикулярной скважине, которая бурится в направлении минимального внешнего сжатия. При ограниченной толщине продуктивного пласта, граничащего с более прочными породами, трещина начинает развиваться преимущественно вдоль пласта. Влияние контраста прочности слоев на такой процесс показан на рис 4 а, б, где в безразмерных координатах показаны в первом квадранте формы развивающихся трещин при пошаговом увеличении объема закаченной в них жидкости.

Отметим здесь, что пороговое значение α , при котором происходит проникание трещины в более прочную породу в случае развития трещины гидроразрыва по схеме рис1а, оказалось меньше, чем в случае схемы рис.1б. Возможно, это связано с тем, что в последнем случае трещина, развивающаяся в среде с по-

ниженной прочностью, оказывается в стесненных условиях из-за границ продуктивного пласта.

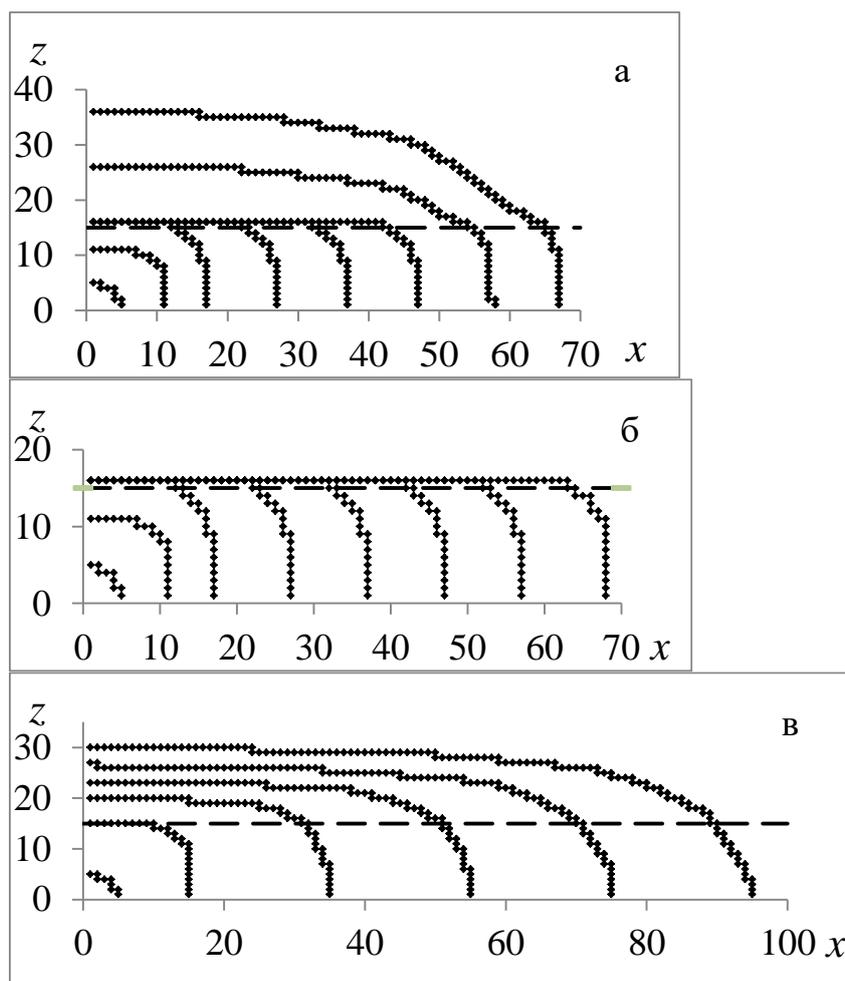


Рис. 4. Расчетные формы плоских трещин гидроразрыва, развивающихся последовательно из начальной круговой в пласте, ограниченном более прочными в α раз породами при $|z > 15|$: а – $\alpha=1.3$, б – $\alpha=1.4$ и более сжатыми в β раз: в – $\alpha=1$, $\beta=1.05$

Аналогичная ситуация по данным расчетов оказалась при развитии дисковой трещины в пласте, ограниченном породами с повышенным в β раз внешним сжатием. Пример таких расчетов приведен на рис.4в для случая $\alpha=1$, $\beta=1.05$. Предельным значением превышения внешнего сжатия пород, окружающих продуктивный пласт, оказалась величина $\beta=1.2$, что заметно больше предельного значения превышения сжатия в случае развития дисковой трещины на границе: $\beta=1.02$ (рис.3б).

Заключение

В работе с использованием численного моделирования исследуются особенности процесса развития трещин гидроразрыва в слоистом породном массиве,

сжатом горным давлением. Рассматривается влияние прочностных свойств слоев и их напряженного состояния на формы развивающихся трещин.

Были исследованы две схемы развития начальной дисковой трещины гидроразрыва, расположенной в вертикальной плоскости, перпендикулярной горизонтальным слоям породного массива: на границе двух сред и в пласте ограниченном более прочными породами, которым соответствуют большие значения внешнего сжатия.

На примере обеих схем было показано, что при своем развитии трещина гидроразрыва стремится развиваться в слое с меньшей трещиностойкостью и значениями напряжений внешнего сжатия. В наибольшей степени это, как отмечалось ранее в экспериментальных работах, характерно при использовании маловязких жидкостей разрыва. Расчеты настоящей работы подтвердили этот результат.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и образования Российской Федерации проект № АААА-А17-117121140065-7

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудряшов С. И., Бачин С. И., Никитин А. И. [и др.] Гидроразрыв пласта как способ разработки низкопроницаемых коллекторов // Нефтяное хозяйство – 2006. – № 7. – С. 80-83.
2. Сердюков С.В., Патутин А.В., Шилова Т.В., Азаров А.В., Рыбалкин Л.А. Технологии повышения эффективности разработки твердых полезных ископаемых с использованием гидроразрыва горных пород // ФТПРПИ. – 2019. – № 4. – С. 90-97
3. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. – 2014. – № 5. – С.137 – 142.
4. Афанасьев, И. С. Никитин А. И., Латыпов И. Д. [и др.] Прогноз геометрии трещины гидроразрыва пласта // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 11. – С. 62–66.
5. Тимонов А. В., Судеев И. В., Пестриков А. В., Ситдииков С. С., Надеев А. Н., Юдин А. В., Никитин А. Н. Новая методология моделирования гидравлического разрыва пласта при разработке Приобского месторождения // Нефтяное хозяйство. - 2012. - № 3. - С. 58-61.
6. Н. В. Дубиня, А. Н. Галыбин О распределении напряжений в слоистом массиве горных пород // Физика земли. – 2018. – № 6.– С. 106–116
7. Шер Е. Н., Черников А. Г. Расчет параметров радиальной системы трещин, образующихся при взрыве удлиненного заряда в хрупких горных породах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2015. – № 2. – С. 299 – 303.
8. Е. Н. Шер Моделирование развития трещин в слоистом породном массиве при взрыве скважинных зарядов и гидроразрыве // ФТПРПИ. – 2020. – № 6. – С.137 – 142.
9. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 326 с.
10. K. Venerjee, R. Butterfield. Djunday element method in engineering science, McGraw-Hill, London, 1981.

11. Peach M. and Koehler J. S. The forces exerted on dislocations and the stress fields produced by them, *Phys. Rev.*, 1950, Vol. 80, No. 3. – P. 436–440.

12. Новожилов В. В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности // *ПММ.* – 1969. – Т. 33. – Вып. 2.

13. Кю Н.Г. Особенности разрушения горных пород при флюидоразрыве пластичным веществом. – *ФТПРПИ*, 2011, № 4, с. 39 – 50.

© *Е. Н. Шер*, 2021

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЫХЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД, УКРЕПЛЕННЫХ ДВУХКОМПОНЕНТНЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ СОСТАВАМИ

Татьяна Викторовна Шилова

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, к.т.н., старший 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 проспект, 54, к.т.н., научный сотрудник, тел. (983)323-33-62, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

Андрей Николаевич Дробчик

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, инженер, тел. (953)797-32-29, e-mail: valker.tiamant@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы повышения физико-механических свойств рыхлых осадочных пород путем химического укрепления двухкомпонентными полимерными смолами. Приведены результаты лабораторных экспериментов по укреплению мелкозернистого кварцевого песка двухкомпонентными органоминеральными и полиуретановыми составами. В экспериментах нагнетание смол выполнялось двумя способами. Первый способ заключается в последовательной закачке отдельных компонент полимерных составов в образцы горной породы. Второй способ состоит в нагнетании готовых полимерных смесей. Получено, что использование двухкомпонентных органоминеральных композиций обеспечивает более эффективное укрепление рыхлых осадочных пород по сравнению с пенополиуретановыми композициями. Прочность на одноосное сжатие укрепленного мелкозернистого песка в среднем в 2,5 - 3 раза больше при последовательной закачке отдельных компонентов по сравнению с закачкой готовых композиций. Модуль упругости полученных образцов в 5,5-6 раз больше при последовательной закачке отдельных компонентов по сравнению с закачкой полностью приготовленных составов. Полученные данные могут быть использованы для выбора и оптимизации способа нагнетания двухкомпонентных полимерных композиций для стабилизации нарушенных пород и гидроизоляции подземных горных выработок.

Ключевые слова: двухкомпонентный полимерный состав, рыхлая горная порода, химическое укрепление, прочностные и деформационные свойства

LAB-SCALE TESTS OF INCOHERENT ROCK REINFORCEMENT USING TWO-COMPONENT POLYMER BLENDS

Tatyana V. Shilova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, +7 923 7089729, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Leonid A. Rybalkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, +7 983 323 3362, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

Andrei N. Drobchik

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Engineer, +7 953 797 3229, e-mail: valker.tiamant@mail.ru

The study addresses improvement of physical and mechanical properties of incoherent sediments by means of their chemical reinforcement using two-component resins. The lab-scale testing data on reinforcement of fine-grained quartz sand using two-component activated mineral and polyurethane resin blends are presented. Resins were injected by two ways on the tests. The first method was sequential injection of the polymer blend components in rock samples. The second method was injection of finished polymer blends. The two-component activated mineral and polyurethane resin blends ensure more effective reinforcement of incoherent sediment rocks as against foamed polyurethane blends. The uniaxial compression strength of reinforced fine-grained sand is 2.5–3 times higher in case of sequential injection of the components than in injection of finished mixtures. The elasticity modulus of the reinforced samples is 5.5–6 times higher in sequential injection than in injection of finished blends. The test results are useful for selection and optimization of injection method for two-component polymer blends in stabilization of broken rocks and in water-proofing of underground excavations.

Keywords: two-component polymer blend, incoherent rock, chemical reinforcement, strength and deformation characteristics

Введение

В настоящее время способы, применяемые для стабилизации горных пород и гидроизоляции выработок, включают упрочнение и уплотнение массива нагнетанием полимерных смол, заполнение куполов и пустот путем тампонажа вспенивающимися составами и др. В технологиях химического воздействия на массив горных пород используются полимерные, полимерцементные составы, включающие смолы, пены, гели, материалы для нанесения слоевых покрытий на поверхность выработок и др. [1-6]. Преимущества и недостатки основных типов композиций рассмотрены в работах [7-11]. Известные методы физико-химического воздействия на горные породы основаны на нагнетании либо однокомпонентных, либо двухкомпонентных составов, компоненты которых смешиваются заранее. В результате в массив подается уже готовый полимеризующийся состав, глубина проникновения которого зависит от времени его отверждения, а также от изменения вязкости и адгезии в процессе полимеризации. Это ограничивает зону воздействия, особенно в низкопроницаемых породах, а также в породах с развитой поверхностью микроструктурных дефектов – берегов трещин, обломочного материала и т.п. [12-15]. В настоящем исследовании для увеличения времени пропитки и зоны воздействия предлагается использовать двухкомпонентные составы на полиуретановой и органоминеральной основах, но с покомпонентной закачкой, при которой сначала закачивается один компонент, затем – другой, а их взаимодействие между собой происходит не при объемном смешивании, а непосредственно в горной породе [16]. В статье приведены результаты экспериментальных исследований укрепления мелкозернистого песка двухкомпонентными органоминеральными и полиуретановыми составами в условиях нагнетания готовых композиций и последовательной закачки отдельных компонент.

Методы и материалы

Эксперименты проводили с мелкозернистым кварцевым песком, который подвергался предварительной обработке. Предварительная обработка включала промывание, высушивание в лабораторном сушильном шкафу при 105-110°C до постоянной массы, определение гранулометрического состава. Пробы песка после высушивания взвешивали 3 раза, при этом приемлемой считалась погрешность не более 0,01г, затем определяли гранулометрический состав. Основная фракция (размер частиц 0,150-0,210мм) составила более 60 масс. % [17].

В экспериментах использовали два двухкомпонентных полимерных состава: органоминеральная смола, предназначенная для инъекционного заполнения пустот в массиве; вспенивающаяся полиуретановая смола, предназначенная для укрепления неустойчивых и нарушенных горных пород. Обе композиции готовятся смешиванием компонентов А и Б в объёмном соотношении 1:1 непосредственно перед вводом в горную породу, их технические характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства двухкомпонентных органоминерального и полиуретанового составов

	Вязкость при 25°C, мПас	Плотность при 25°C, г/см ³	Фактор вспенива- ния	Время начала реакции/пол- ного отверде- вания, с	Темпера- тура (макс.) ре- акции, °С
Двухкомпонентный органоминеральный состав					
Компонент А	137+/-2	1,4	-	-	-
Компонент Б	131+/-5	1,2	-	-	-
Готовый со- став (А+Б в объемном соотноше- нии 1:1)	-	-	1	210-240	45
Двухкомпонентный полиуретановый состав					
Компонент А	180+/-5	1,1	-	-	-
Компонент Б	230+/-20	1,2	-	-	-
Готовый со- став (А+Б в объемном соотноше- нии 1:1)	-	-	6	150/480-600	140

Тестовый образец мелкозернистого песка объемом 400см³ размещали в цилиндрической емкости, в которую в дальнейшем закачивали составы. Эксперименты проводили для двух различных способов нагнетания полимерных композиций: по-

компонентная закачка (последовательная подача компонентов А и Б, начало полимеризации происходит внутри образца горной породы) и нагнетание готовых составов (подача сразу после смешивания компонентов А и Б, начало реакции происходит вне образца породы). Объем каждого компонента в экспериментах составлял 100мл. Нагнетание проводили при импульсной и ступенчатой подаче давления. В первом случае подача полимерных составов в образце горной породы осуществлялась при ступенчатом повышении давления от 0 до 0,5 МПа с шагом 0,02 МПа. Время выдерживания на каждом шаге составляло 60 секунд. Импульсная закачка осуществлялась при резком повышении давления от 0 до 1,5 МПа. После нагнетания полимерных составов выдерживали время их полного отверждения, затем извлекали образец, оценивали объем укрепленной части породы, изготавливали цилиндрические керны и проводили испытания для определения деформационных и прочностных характеристик песка. Объем консолидированной части определяли, как разницу между начальным объемом пробы и объемом рыхлого (сыпучего) материала, оставшегося после нагнетания полимерных смол. Деформационно-прочностные испытания укрепленного мелкозернистого песка проводили в соответствии со стандартами ГОСТ 21153.2-84, ГОСТ 28985-91, ГОСТ 28985-9 и др. [18-20].

Результаты

В результате нагнетания полиуретанового и органоминерального составов в режиме покомпонентной закачки и ступенчатой подачи давления, объем укрепленной породы составил 35-45%. Отмечается неравномерное распределение отвержденных полимерных композиций в образцах (рис. 1). При покомпонентной закачке и импульсной подаче давления объем составил 20-35%. Отвержденная композиция равномерно распределена в полученном образце. В режиме нагнетания готового органоминерального состава и ступенчатой подачи давления объем укрепленной породы составил 10-15% от начального образца. Результаты прочностных и деформационных испытаний образцов укрепленного мелкозернистого песка приведены в табл. 2.

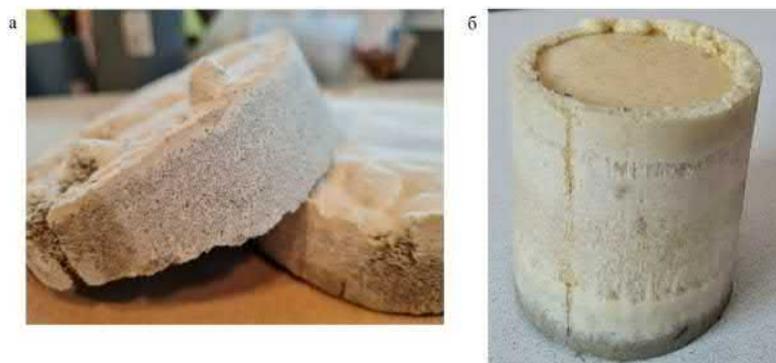


Рис. 1. Укрепленный мелкозернистый песок, полученный в результате нагнетания: готового органоминерального состава при резком повышении давления от 0 до 1,5МПа (а) и готового вспенивающегося полиуретанового состава при ступенчатом повышении давления (б)

Таблица 2

Деформационно-прочностные характеристики образцов мелкозернистого песка, укрепленного двухкомпонентными полимерными составами

Способ закачки двухкомпонентного состава в образец горной породы	Давление закачки, МПа	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	Модуль упругости, МПа
Двухкомпонентный органоминеральный состав			
Покомпонентная	0-0,5МПа	12	883,2
		7,6	953,9
		16,9	1450,5
Готовый состав	0-0,5МПа	9,8	214,7
		7,7	157,8
		7,5	153,0
Двухкомпонентный полиуретановый состав			
Покомпонентная	0-0,5МПа	0,5	4,5
		0,9	-
		1,5	45,4
Готовый состав	0-0,5МПа	0,9	28,0
		0,8	13,8
		0,6	8,2

Обсуждение

Экспериментально исследовано укрепление рыхлых осадочных пород двухкомпонентными полимерными составами, включающее покомпонентную закачку и нагнетание готовых композиций в образцы. Методы апробированы на образцах мелкозернистого песка (основная фракция - размер частиц 0,150-0,210мм более 60 мас. %.), двухкомпонентных органоминеральных и вспенивающихся полимерных смолах. Установлено, что предпочтительным является последовательное покомпонентное нагнетание композиций при плавном ступенчатом повышении давления с выдерживанием временного интервала на каждом шаге. При этом обеспечивается более обширная зона пропитки вмещающих пород (на 15-25 % больше по сравнению с нагнетанием готовых композиций) и высокие деформационно-прочностные характеристики укрепленных горных пород. Проведенные деформационные испытания образцов мелкозернистого песка показали, что при покомпонентной закачке составов предел прочности на одноосное сжатие в среднем в 2,5 – 3 раза, модуль деформации в 5,5 - 6 выше по сравнению с нагнетанием готовых композиций. Физико-механические свойства образцов укрепленного песка, полученных при импульсной и ступенчатой подаче составов близки. Использование двухкомпонентных органоминеральных составов обеспечивает более эффективное упрочнение рыхлой породы, по сравнению с вспенивающимися полиуретановыми композициями. Предел прочности на од-

ноосное сжатие и модуль деформации образцов укрепленного мелкозернистого песка в среднем в 8 раз и 11 раз выше при упрочнении органоминеральным составом, чем при использовании полиуретанового. Существенные различия прочностных свойств связаны с различием реологических свойств композиций в процессе отверждения, фактором вспенивания, которые определяют распределение составов в объеме рыхлой породы в процессе нагнетания.

Заключение

Результаты исследований эксплуатационных свойств двухкомпонентных полимерных составов и укрепленного мелкозернистого песка показали, что предпочтительным является последовательное покомпонентное нагнетание композиций при плавном ступенчатом повышении давления с выдерживанием временного интервала на каждом шаге. При этом обеспечивается более обширная зона пропитки вмещающих пород (на 15-25 % больше по сравнению с нагнетанием готовых композиций) и высокие деформационно-прочностные характеристики укрепленных горных пород. Полученные результаты могут быть использованы для выбора и оптимизации способа нагнетания двухкомпонентных полиуретановых и органоминеральных композиций с целью стабилизации нарушенных пород и гидроизоляции подземных горных выработок.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 20-45-543009.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев В. В. Полимерные композиции в горном деле. – Наука, 1986.
2. Климчук, И.В. Опыт применения полимерных технологий на горнодобывающих предприятиях России / И.В. Климчук, В.М. Маланченко // Горная промышленность. – 2007. – № 4. – С. 22–25.
3. Hu X., Cheng W., Wang D. Properties and applications of novel composite foam for blocking air leakage in coal mine //Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Т. 87. – №. 8. – С. 1099-1108.
4. Cornely W. Elastified silicate resins and polyurethane foam resins for the stabilisation of strata - a comparison // Proceedings of the 6th International Seminary Reinforcement and sealing of rock and construction at the beginning of 21st century. - Ostrava, 2001.
5. Holter K. G. et al. Testing of sprayed waterproofing membranes for single-shell sprayed concrete tunnel linings in hard rock //Proceedings of the world tunnel congress. – 2014.
6. Šňupárek R. Laboratory testing of chemical grouts / R. Šňupárek, K. Souček // Tunnelling and Underground Space Technology. - 2000. - т. 15. - №. 2. - С. 175-185.
7. Hu X. M., Wang D. M. Enhanced fire behavior of rigid polyurethane foam by intumescent flame retardants //Journal of applied polymer science. – 2013. – Т. 129. – №. 1. – С. 238-246.
8. Hu X., Cheng W., Wang D. Properties and applications of novel composite foam for blocking air leakage in coal mine //Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Т. 87. – №. 8. – С. 1099-1108.
9. Shen H., Nutt S. Mechanical characterization of short fiber reinforced phenolic foam //Composites Part A: Applied science and manufacturing. – 2003. – Т. 34. – №. 9. – С. 899-906.

10. Rangari V. K. et al. Cloisite clay-infused phenolic foam nanocomposites //Journal of applied polymer science. – 2007. – Т. 103. – №. 1. – С. 308-314.
11. Чубриков А. В., Марков А. С., Хрипков В. В. Технология упрочнения зон нарушения полимерной смолой для сохранения высоких нагрузок на очистной забой //Уголь. – 2005. – №. 5. – С. 69-71.
12. Serdyukov S. V., Shilova T. V., Drobchik A. N. Polymeric insulating compositions for impervious screening in rock masses //Journal of Mining Science. – 2016. – Т. 52. – №. 4. – С. 826-833.
13. Shilova T. et al. Development of the impermeable membranes using directional hydraulic fracturing //Procedia engineering. – 2017. – Т. 191. – С. 520-524.
14. Шилова Т. В., Сердюков С. В. Формирование химически активного реагента в породном массиве для укрепления, изоляции и гидроразрыва горных пород //Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2017. – №. 3. – С. 36-41.
15. Anagnostopoulos C. A. et al. Physical and mechanical properties of chemically grouted sand //Tunnelling and underground space technology. – 2011. – Т. 26. – №. 6. – С. 718-724.
16. Anagnostopoulos C. A. Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2005. – Т. 20. – №. 6. – С. 525-533.
17. ГОСТ 12536-79 Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Стандартиформ, 2008. – 17с.
1. 18. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. - М.: Издательство стандартов, 2001. – 7с.
2. 19. ГОСТ 28985–91 Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 10с.
3. 20. ГОСТ 21153.8-88 Породы горные. Методы определения предела прочности при объёмном сжатии. - М.: Издательство стандартов, 1988. – 16с.

© Т. В. Шилова, Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик, 2021

ОТРАБОТКА ПОДКАРЬЕРНЫХ ЗАПАСОВ ПОДЭТАЖНО-КАМЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ С ФОРМИРОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ ЦЕЛИКОВ И ПОРОДНОЙ ЗАКЛАДКИ

Сергей Анатольевич Шукин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории подземной разработки рудных месторождений, тел. (913)372-82-63, e-mail: s.shukin@ngs.ru

Александр Алексеевич Неверов

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

Сергей Алексеевич Неверов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, заведующий лабораторией подземной разработки рудных месторождений, тел. (923)224-15-79, e-mail: nsa_nsk@mail.ru

Для маломощной крутопадающей рудной залежи при переходе от открытых горных работ к подземной выемке предложен вариант камерной системы разработки с отработкой по временно целиковой схеме и последующей комбинированной закладкой очистного пространства. Геотехнология предусматривает восходящую очередность отработки запасов в этажах и нисходящий общий порядок выемки залежи. В качестве комбинированной закладки приняты пустая порода и бутобетон. Рассмотрена многовариантная задача по оценке устойчивости конструктивных элементов системы разработки при ранжировании основных параметров в тектоническом природном поле напряжений. Обоснование безопасного освоения технологии выполнено на базе численного моделирования напряженно-деформированного состояния рудопородного массива методом конечных элементов в объемной постановке. Рассматривался предельный случай погашения запасов в условиях развитого фронта очистных работ и формируемого пролета отработки. Установлены основные закономерности распределения напряжений в конструктивных элементах технологии с определением участков потерь устойчивости. Использование бутобетонных целиков является действенной мерой, способствующей повышению безопасности ведения горных работ по рассматриваемой технологии. Отмечено, что применение комбинированной закладки по сравнению с породной является более надежным способом управления горным давлением, особенно при увеличении мощности рудной залежи.

Ключевые слова: подкарьерные запасы, система разработки, бутобетон, моделирование, конструктивные элементы, напряженно-деформированное состояние (НДС), параметры, устойчивость, безопасность.

EXTRACTION OF OPEN PIT BOTTOM RESERVES BY ROOM-AND-PILLAR METHOD USING HYBRID BACKFILL

Sergei A. Shchukin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher at the Underground Ore Mining Laboratory, cell. +7 913 372 8263, e-mail: s.shukin@ngs.ru

Aleksandr A. Neverov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Underground Ore Mining Laboratory, cell.: +7 923 220 0279, e-mail: nnn_aa@mail.ru

Sergei A. Neverov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Underground Ore Mining Laboratory, cell.: +7 923 224 1579, e-mail: nsa_nsk@mail.ru

For the transition from open pit to underground mining in thin and steeply dipping ore bodies, it is proposed to use the room-and-pillar method with hybrid backfill. The geotechnology assumes bottom-up mining within levels which are generally sequenced top downward. The hybrid backfill is waste rock and rubble concrete. The authors discuss the multivariate problem on the stability of structural elements of the geotechnology with ranking of basic parameters in the field of natural tectonic stresses. The geotechnology safety is proved by the 3D FEM-based stress–strain analysis of the limiting case of mine roof spans. The stress patterns in the structural elements of the technology are determined, and the areas of instability are identified. The rubble concrete pillars effectively ensure mining safety with the discussed technology. The hybrid backfill as against rock fill is a more reliable method of ground control, especially in case of increasing thickness of ore bodies.

Keywords: pit bottom reserves, mining system, rubble concrete, modeling, structural elements, stress–strain behavior, parameters, stability, safety

Введение

В настоящее время при открытых разработках рудных ископаемых, в том числе высокоценного сырья наблюдается повсеместная тенденция решения вопросов воспроизводства запасов переходом от карьерной выемки к подземной [1-6]. Потребность данного приема обуславливается значительным сокращением затрат на вскрышные работы, и как следствие повышение рентабельности добычи. Однако такой переход требует обоснований технических решений и способов выемки, обеспечивающих безопасность и эффективность погашение подкарьерных запасов между открытыми и подземными работами [1-7]. В настоящей статье дается обоснование технологии отработки маломощной крутой залежи ниже дна карьера, применительно к одному из эксплуатируемых золоторудных месторождений.

Технология погашения подкарьерных запасов

Для выемки подкарьерных запасов месторождения в целях обеспечения как полноты их извлечения, так безопасности ведения горных работ был рассмотрен вариант поэтажно-камерной системы разработки с формированием искусственных целиков и породной закладки (рис. 1).

Суть технологии состоит в следующем. Этаж разделяется на подэтажи высотой 12-20 м. Выемка подэтажей в пределах этажа осуществляется в восходящем порядке. Отработка запасов подэтажа производится в две очереди. Сначала отрабатываются и закладываются бетоном камеры I очереди. При возведении бетонобетонных целиков в рудном штреке на этих участках возводится крепь.

После набора закладочным массивом нормативной прочности и создания необходимого опережения фронта горных работ, приступают к отработке камер II очереди. По мере их погашения с рудного штрека вышележащего подэтажа производится закладка выработанного пространства пустой породой. При этом на вышележащем подэтаже формируется комбинированная почва из чередующихся участков бутобетона и пустых пород. При этом породная закладка не является элементом несущей конструкции, основное ее назначение – боковой подпор открытым обнажениям и как платформа для рабочих и оборудования, занятых на очистных работах при погашении вышележащих подэтажей. Очистные работы включают послойную отбойку и доставку руды с использованием самоходных буровых и погрузочно-доставочных машин (ПДМ).

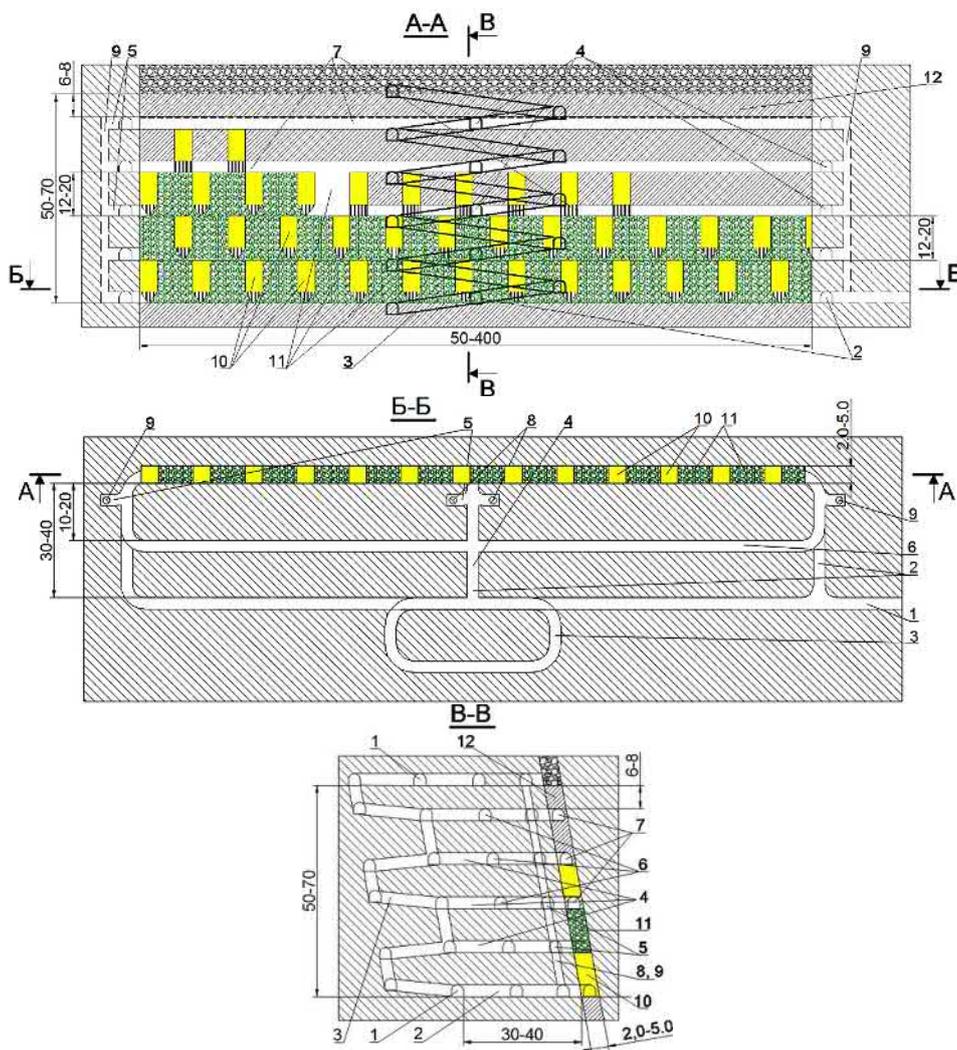


Рис. 1. Подэтажно-камерная система разработки с бутобетонными целиками и породной закладкой:

1 - полевой откаточный штрек; 2 - полевой вент.доставочный орт; 3 - спиральный съезд; 4 - заезд на подэтаж; 5 - ниша под рудоспуск и вен.восстающий; 6 - полевые подэтажные штреки; 7 - буро-доставочные подэтажные рудные штреки; 8 – рудоспуски; 9 - вент.восстающие; 10 - камера I очереди (бутобетонные целики); 11 - камера II очереди (породная закладка); 12 - междуэтажный целик

Особенности геомеханического моделирования системы разработки

Согласно геолого-структурного строения породного массива, а также натуральных измерений природного поля напряжений, район рассматриваемого месторождения относится к тектонически активным, в котором максимальными по величине являются горизонтально ориентированные силы [8-9]:

$$\sigma_y = \gamma g H; \sigma_{\max} = 2,0 \gamma H; \sigma_{\min} = 1,66 \gamma H \quad (1)$$

где σ_y , σ_{\max} и σ_{\min} — соответственно вертикальная, максимальные и минимальные горизонтальные нормальные компоненты тензора напряжений; H — глубина разработки; γ — плотность пород; g — ускорение свободного падения; 2,0 и 1,66 — соответственно коэффициенты бокового давления q_z и q_x .

Моделирование и решение задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) горного массива было получено в рамках линейной модели теории упругости в объемной постановке методом МКЭ [10-15]. Расчеты выполнялись по усредненным деформационным и прочностным свойствам пород трещиноватого массива месторождения.

На рис. 2 представлена схема расчетной области R — параллелепипед и постановка задачи. В центральной ее части реализованы конструктивные особенности системы разработки с существующей горнотехнической обстановкой на руднике (рис. 3).

Напряженно-деформированное состояние массива пород в расчетной области R описывается системой уравнений:

$$\text{— равновесия: } \sigma_{ij,j} + pF_i = 0, \quad (2)$$

$$\text{— Коши: } \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

$$\text{— закона Гука: } \sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\theta\delta_{ij} \quad (4)$$

— и заданием граничных условий (см. рис. 2).

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений (σ_y , σ_x , σ_z , и τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} — соответственно вертикальная и горизонтальные нормальные и касательные компоненты тензора напряжений); $pF_i = \gamma g \delta_{ij}$ — объемные силы; γ — плотность пород; g — ускорение свободного падения; ε_{ij} — компоненты тензора деформаций (ε_y , ε_x , ε_z и ε_{xy} , ε_{yz} , ε_{zx} — соответственно вертикальная и горизонтальные главные линейные и угловые компоненты тензора деформаций); u_i — компоненты вектора перемещений (u_y , u_x , u_z — вертикальная и горизонтальные компоненты вектора перемещений); $\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ — относительная объемная деформация; G и λ — параметры Ламе $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$, $\lambda = \frac{E\mu}{(1-2\mu)(1+\mu)}$; δ_{ij} — символ Кронекера; q_x , q_z — коэффициенты бокового давления ($q_z = 2,0$ и $q_x = 1,66$); μ — коэффициент Пуассона; H — глубина разработки.

При оценке устойчивости пород использовался коэффициент K_y по критерию Кулона-Мора [16-18]:

$$K_y = [\sin \phi(\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \times C \times \text{ctg} \phi)] > \sigma_1 - \sigma_3 \quad (5)$$

где σ_1 и σ_3 – соответственно максимальные и минимальные главные напряжения, действующие в массиве, МПа; C – сцепление пород, МПа; ϕ – угол внутреннего трения пород, град.

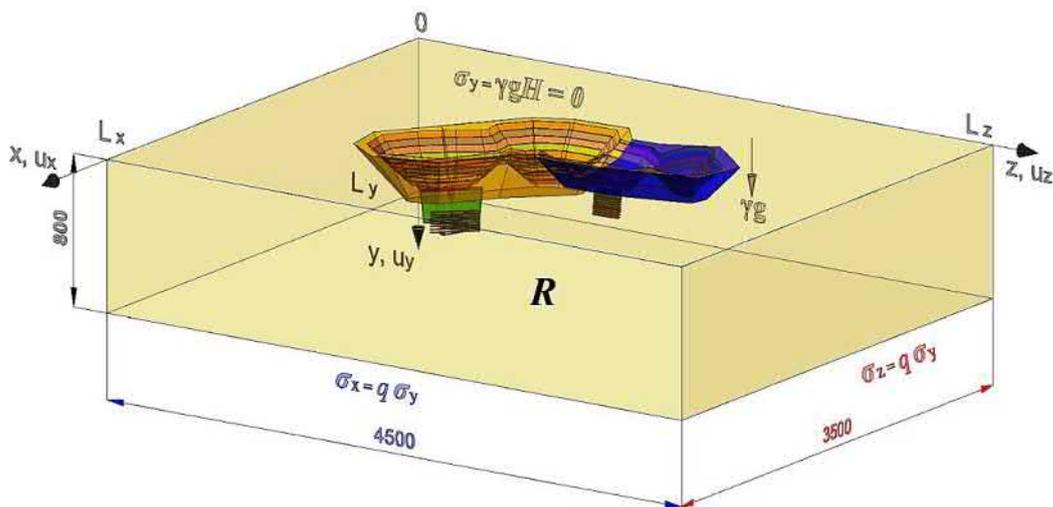


Рис. 2. Расчетная схема к определению НДС массива пород

Анализ расчетов осуществлялся в виде картин изолиний главных напряжений (σ_1 и σ_3) и прогнозируемых зон вероятных разрушений пород в зависимости от степени нарушенности горного массива (использовался коэффициент структурного ослабления $K_c = 0,25-0,6$) [16-20].

При выполнении геомеханического обоснования в целях минимизации рисков в категории безопасности ведения горных работ была рассмотрена предельная горнотехническая ситуация при выемке рудных тел мощностью (m) – 2,0, 5,0 и 10,0 м. Оценивалась область массива с полностью погашенными от дна карьера двумя верхними этажами и развитием фронта выемки на подэтажах 3-го нижнего этажа (рис. 3). При этом первый и второй этаж от дна карьера представляет собой искусственный массив с чередующимися участками бутобетона и породной закладки. Последнее позволяет с высокой степенью надежности проанализировать устойчивость бутобетонных опор, а также МЭЦ и предохранительного подкарьерного целиков в условиях максимальной их подработки и наработки. Моделирование отработки камер на подэтажах нижнего этажа (3 этаж от дна карьера) позволяет рассмотреть влияние параметров бутобетонных целиков и камер II очереди, а также глубины работ и наработки от погашения вышележащих запасов на безопасность выемки.

В табл. приведена характеристика моделируемой горнотехнической ситуации при использовании камерной системы разработки с бутобетонными целиками и породной закладкой.

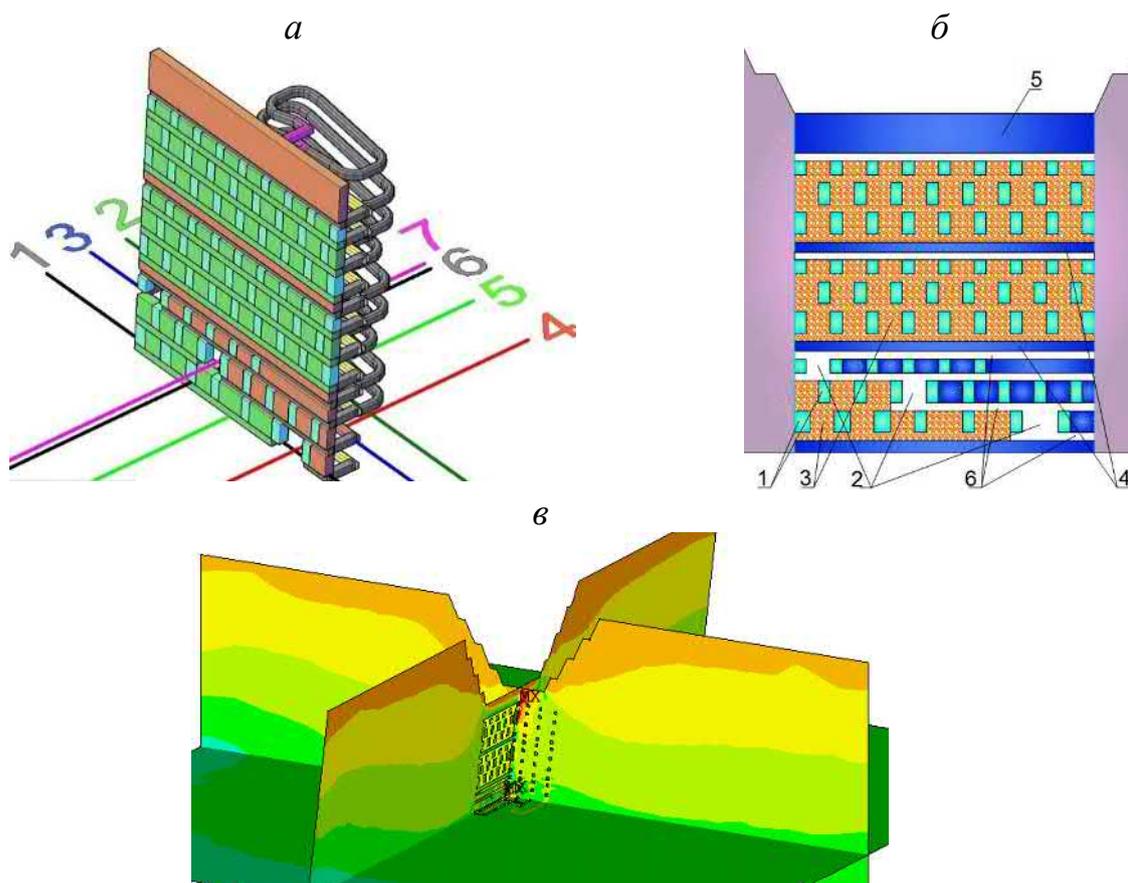


Рис. 3. Моделируемая горнотехническая ситуация при отработке подкарьерных запасов крутой маломощной залежи:
 а – объемное представление системы разработки; б – пример разреза № 1 в вертикальной плоскости; в – общий вид разрезов и планов в границах геомеханической модели

Параметры принятой к расчету горнотехнической ситуации при использовании камерной системы разработки с бутобетонными целиками и породной закладкой

Параметры	Значение		
Мощность залежи (m), м	2	5	10
Глубина разработки (H), м	0-170 м		
Мощность предохранительного подкарьерного целика между открытыми и подземными работами (ППЦ) ($h_{ппц}$), м	20		
Высота этажа по вертикале ($H_э$), м	50		
Высота подэтажа по вертикале ($h_п$), м	15		
Длина бутобетонного целика (камеры первой очереди) ($L_{ц.бут}$), м	6	8	
Длина камеры второй очереди ($L_{к.пз}$), м	12	18	
Общая длина пролета отработки по простиранию ($L_{об}$), м	150		
Высота междуэтажного целика (МЭЦ) ($H_{мэц}$), м	5		
Расстояние от полевых выработок до рудной залежи ($L_{пв.з}$), м	10	30	

Результаты численных оценок

Анализ картин распределения напряжений и зон возможных разрушений пород в конструктивных элементах подэтажно-камерной выемки с бутобетонной и породной закладкой (рис. 4-6) позволил установить следующее.

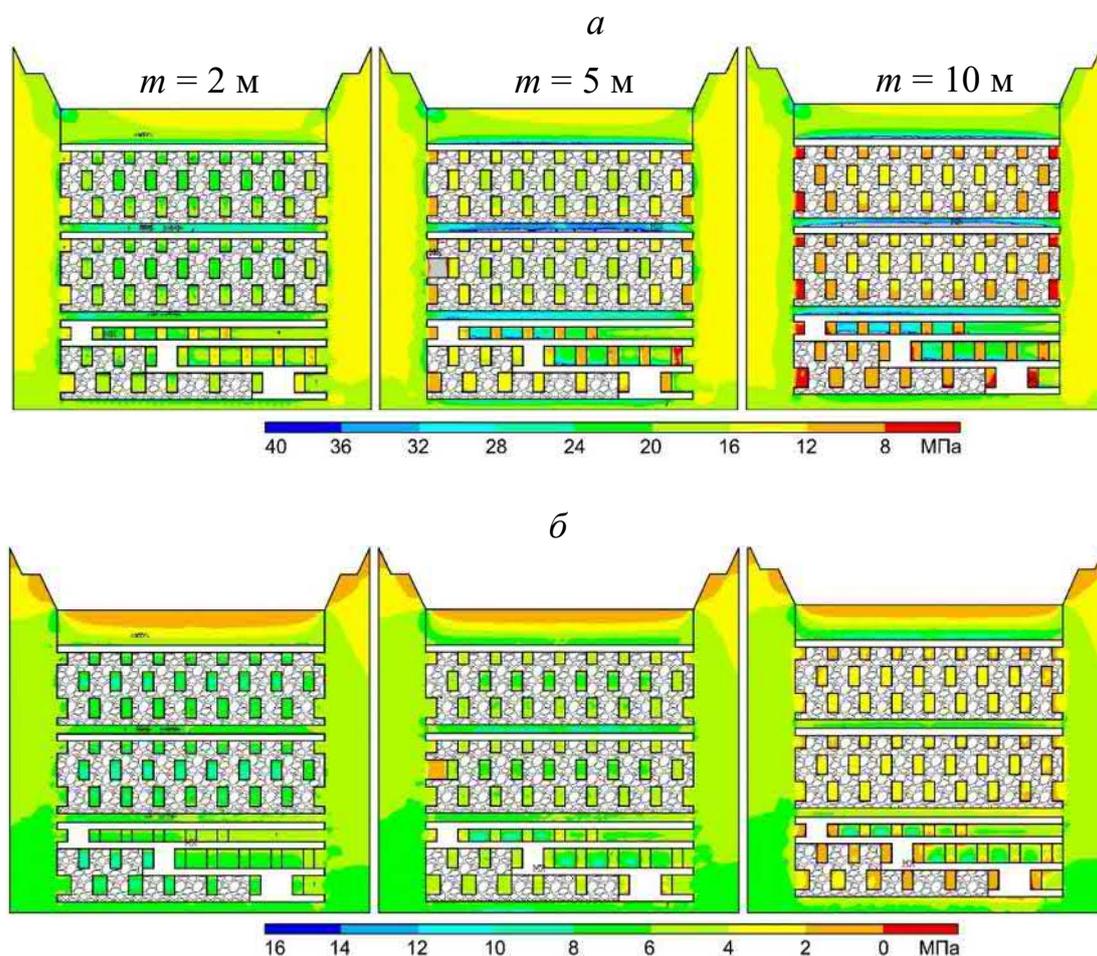


Рис. 4. Характер распределения максимальных (σ_1) и минимальных (σ_3) напряжений в конструктивных элементах системы разработки разреза № 1

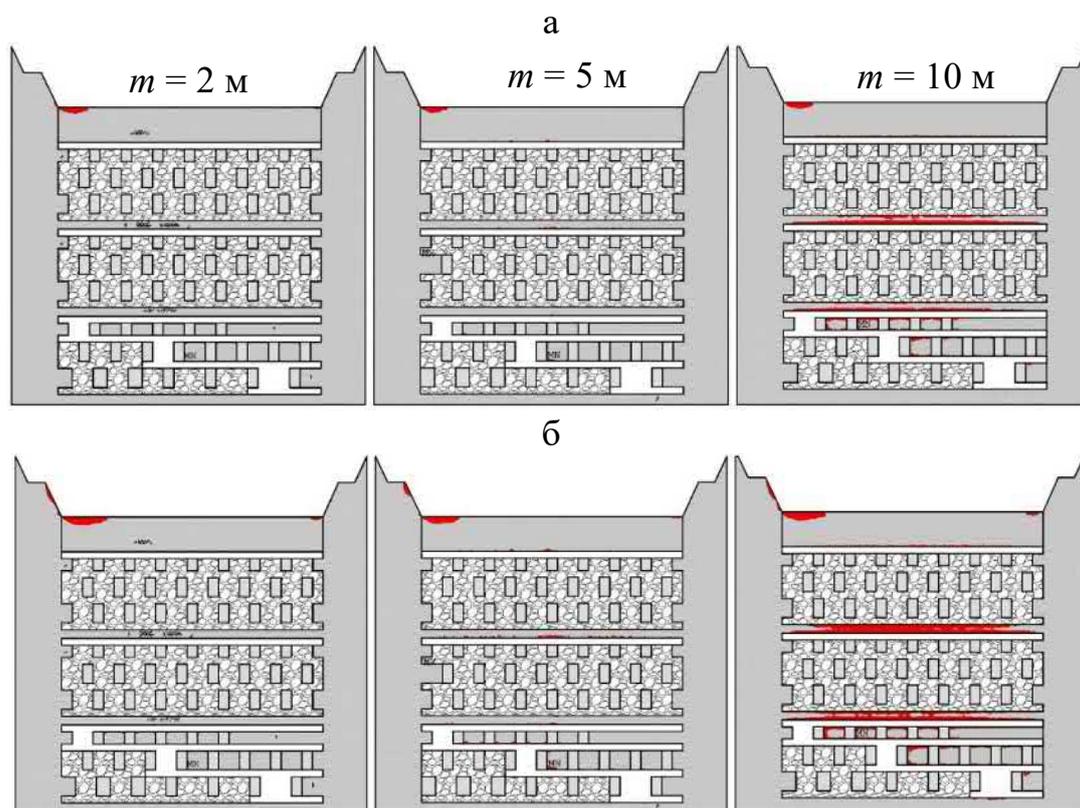


Рис. 5. Прогнозируемые участки потери устойчивости массива пород по разрезу № 1 при коэффициенте структурного ослабления $K_c = 0.3$ (а) и $K_c < 0.25$ (б)

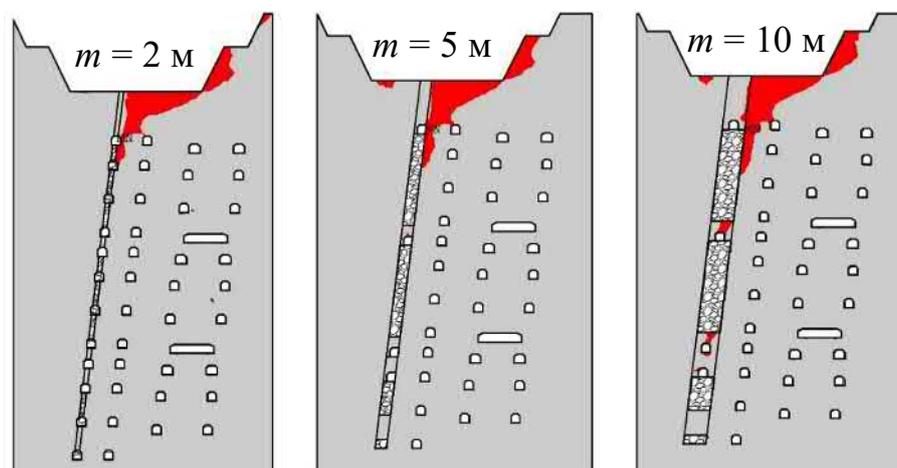


Рис. 6. Прогнозируемые участки потери устойчивости массива пород в конструктивных элементах системы разработки по разрезу № 7 при $K_c < 0.25$

1. Величина максимальных главных напряжений σ_1 , возникаемых в подкарьерном предохранительном рудо-породном целике от дна карьера по его глубине, изменяется от 10,0 до 20,0, от 12,0 до 24,0 и от 12,0 до 30,0 МПа соответственно при мощности обрабатываемого рудного тела 2,0, 5,0 и 10,0 м. Минимальные главные усилия

находятся в диапазонах соответственно $2,0 \div 6,0$, $2,0 \div 8,0$ и $2,0 \div 10,0$ МПа. Отсутствие зон растяжения благоприятно сказывается на устойчивости охранного целика.

2. Массив горных пород вокруг полевых подэтажных штреков находится в объемном сжатии, где максимальные главные напряжения в кровле и бортах выработок сопоставимы между собой и составляют $\sigma_1 = 12,0-20,0$ МПа. Характер изменения минимальной компоненты σ_3 соответствует σ_1 с точки зрения их равенства для кровли и бортов полевых штреков. В условиях сильной нарушенности горные породы, вокруг этих выработок, подвержены разрушению с выходом на дневную поверхность. Следует отметить, что с ростом мощности залежи происходит увеличение размеров зон разрушений.

3. В целом, напряжения, возникаемые в массиве вокруг выработок не превышают предельные характеристики пород, что свидетельствует о удовлетворяющей требованиям безопасности их устойчивости. Однако, учитывая нарушенность пород, которая на месторождении изменяется от слабо- до сильнотрещиноватых массивов, следует ожидать возникновения локальных участков возможных разрушений пород.

4. Для междуэтажных рудных целиков (МЭЦ) характерно повышение σ_1 с ростом мощности залежи, которые достигают $20,0$, $30,0$ и $40,0$ МПа соответственно при m $2,0$, $5,0$ и $10,0$ м. С увеличением толщины МЭЦ с $5,0$ до $8,0$ величины напряжений снижаются на $15-20\%$, что существенно повышает сохранность целиков. Тем не менее устойчивость МЭЦ при мощности рудных тел $2,0-5,0$ м является достаточной, при мощности залежи $10,0$ м – состояние МЭЦ приближается к предельному. В связи с этим, при отработке участков залежей мощностью более 10 м высота целиков МЭЦ должна составлять $8-10$ м.

5. НДС бутобетонных целиков соответствует объемному сжатию. Согласно расчетам интенсивность главных напряжений, возникающая в бутобетонных целиках, находящихся в области выемки, достигает $8,0-10,0$ МПа. При всестороннем сжатии, а также учитывая тот факт, что в условиях объемного НДС предел прочности геоматериалов возрастает в среднем в $2,0-2,3$ раза, можно спрогнозировать прочность бутобетонной закладки, которая должна составлять при $m = 2,0$, $5,0$ и $10,0$ м, соответственно не менее $3,0$, $4,0$ и $5,0$ МПа.

Таким образом, установлено, что для ненарушенных ($K_c \geq 0,6$), слабо- ($K_c > 0,45$) и среднетрещиноватых ($K_c = 0,3-0,45$) массивов, полученные решения, свидетельствует об отсутствии явных зон возможных разрушений пород вокруг выработок, в том числе различного рода целиках (подкарьерного, МЭЦ, бутобетонных). Однако в лежащем боку залежи в пределах подкарьерного целика прослеживается зарождение областей возможных обрушений пород в массивах с $K_c = 0,3-0,4$. С ростом мощности залежи устойчивость выработок, а также МЭЦ снижается, предвзяя предельную ситуацию.

Выводы

1. Формирование бутобетонных целиков в этаже близко к шахматной схеме способствует увеличению жесткости всей горнотехнической конструкции отработанного этажа за счет уменьшения вертикального пролета погашенного очист-

ного пространства, что в целом ведет к повышению устойчивости массива пород в элементах выемки.

2. Значения полученных напряжений в элементах системы разработки с точки зрения пределов прочности массива пород на сжатие, растяжение и сдвиг не являются критическими, что относит технологию в разряд безопасных.

3. За счет действия в рудо-породном массиве месторождения тектонического природного поля напряжений, максимальные сжимающие усилия наблюдаются в кровле выработок, а также в междуэтажных целиках.

4. Для массивов пород с изменяющейся нарушенностью от средней до ниже средней ($K_c = 0,25-0,3$) с ростом мощности залижи (m) от 2 до 10 м для обеспечения безопасности горных работ следует:

- длину камеры II очереди уменьшить на верхних горизонтах с 18 до 12 м, на нижних – с 12-14 до 8-10 м;
- высоту целиков МЭЦ увеличить с 5,0 до 8,0 м на верхних горизонтах, и до 10-12 м – на нижних;
- длину камеры I очереди (ширину бутобетонных целиков) увеличить с 6 до 8 м на верхних этажах, и до 10 м на нижних горизонтах;
- нормативную прочность бутобетона увеличить с 3,0 до 5,0 МПа;

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каплунов Д.Р., Юков В.А. Геотехнология перехода от открытых к подземным горным работам: Учебное пособие. - М.: Издательство "Горная книга", 2007 – 267 с.

2. Лобанов Е.А., Чайкин Д.А., Меньшиков П.Ю. Разработка технологических решений вскрытия и отработки прибортовых и подкарьерных запасов апатито-нефелиновых руд // Фундаментальные и прикладные науки в горном деле. – 2018 – Т. 5 – № 1 – С. 88–93.

3. Козырев А.А., Мальцев В.А., Енютин А.Н., Рыбин В.В., Семенова И.Э. Геомеханическое обеспечение безопасности отработки переходных зон между подземными и открытыми горными работами. Тр.8-го между. симпозиума "Горное дело в Арктике". Санкт-Петербург, с.35-40, 2005.

4. Калмыков В.Н., Григорьев В.В., Волков П.В. Изыскание вариантов систем разработки для выемки прибортовых запасов при комбинированной геотехнологии // Вестник Магнитогорского гос. тех. универ. им. Г.И. Носова. – 2010 – № 1 – С. 17–20.

5. Неверов С. А., Неверов А. А., Щукин С. А., Шапошник Ю. Н., Никольский А. М. Обоснование отработки подкарьерных запасов золотосодержащего месторождения восходящей выемкой с породной закладкой / ФТПРПИ. – №4. – 2020, с. 79-93.

6. Конурин А. И., Щукин С. А., Неверов С. А., Неверов А. А. Подэтажное обрушение под защитой рудо-породной подушки при переходе от открытых работ к подземной выемке / Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – №2, Т. 5. – 2018, с. 67-74.

7. Макаров А.Б. Оценка влияния карьера на законтурный массив и условия совмещения открытой и подземной повторной разработки пологих залежей // В кн.: Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу / Сборник X Международной конференции, 2019: – Магнитогорск: МГТУ, 2019, с. 122-127.

8. Верниковский В.А. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа / В.А. Верниковский, А.Е. Верниковская // Геология и геофизика. - 2006. - Т. 47. - № 1. - С. 35 – 52.

9. Козырев А.А. Закономерности распределения тектонических напряжений в верхней части земной коры / А.А. Козырев, С.Н. Савченко // Физика Земли. - 2009. - № 11. - С. 34 – 43.

10. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. & Zhu, J.Z. (2005). The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Butterworth-Heinemann, 6th edn.
11. Debasis Deb, Kamal C. Das. Extended Finite Element Method for the Analysis of Discontinuities in Rock Masses / Geotechnical and Geological Engineering. — September 2010, Vol. 28, Issue 5.
12. Li X., He S., Luo Y. & Wu, Y. (2012). Simulation of the sliding process of Donghekou landslide triggered by the Wenchuan earthquake using a distinct element method. Environmental Earth Sciences, 65, 1049–1054.
13. Xue Zhang, BEng, MEng. Particle Finite Element Method in Geomechanics / Faculty of Engineering and Built Environment. The University of Newcastle, September 2014. Australia <https://www.researchgate.net/publication/301351333>.
14. Makarov A.B. Comparison of limit equilibrium and finite element methods to slope stability estimation A.B. Makarov, I.S. Livinsky, V.I. Spirin, A.A. Pavlovich / сборнике: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Set of 2 V. 2018. С. 845-850.
15. В. Пыасов. Prediction of rock movements using a finite-discrete element method / В. Пыасов, А. Makarov I. Biryuchiov // EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium – London: CRC Press, 2018. – Vol. I, p. 805.
16. Неверов С.А. Геомеханическая оценка устойчивости выработок выпуска руды при системах с обрушением / С.А. Неверов, А.А. Неверов // ФТПРПИ. – 2013. – № 2.
17. А. Makarov. Rock mechanics of pillars extraction / А. Makarov, D. Mosyakin // EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium – London: CRC Press, 2018. – Vol. I, p. 1046.
18. Фрейдин А. М., Неверов С. А., Неверов А. А., Конурин А. И. Геомеханическая оценка геотехнологий подземной добычи руд на стадии проектных решений // Горный журнал. – 2016. – № 2. – С.39-45.
19. Feng D.-K., Zhang J.-M., Hou W.-J. Three-dimensional direct-shear behaviors of a gravel-structure interface, 2018, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144(12), 04018095.
20. Савич И.Н. Геомеханическое обоснование параметров камерной системы разработки с закладкой на корбалихинском месторождении // И.Н. Савич, А.А. Лифарь-Лаптев, А.М. Яковлев, М.О. Сыренов, Г.А. Карасев // Горный информационно-аналитический бюллетень ГИАБ (научно-технический журнал). – 2020. – № S25. – С. 3-14.

© С. А. Шукин, А. А. Неверов, С. А. Неверов, 2021

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСЫПНЫХ ПОРОД КАРЬЕРНОГО ОТВАЛА ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Владимир Федорович Юшкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН (ИГД СО РАН), 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)205-30-30 доп. 313, e-mail: L14@ngs.ru

Рассматриваются особенности изменения упругих параметров насыпных пород в краевой части борта карьерного отвала при естественном уплотнении под воздействием природно-климатических факторов. По записям сейсмометрических сигналов на профиле уступа определены пределы сезонного изменения динамического модуля упругости при промерзании верхнего слоя насыпных пород отвала. Показано, что динамический модуль Юнга повышается практически в 1.5 раза. Представленные результаты свидетельствуют об активизации естественной самоорганизации разрушенных пород краевой части борта карьерного отвала под влиянием изменения сезонных природно-климатических факторов за счет повышения прочности приповерхностных слоев грунта.

Ключевые слова: геомониторинг, борт отвала в карьере, механо-эрозионный процесс, оседание пород отвала

STRENGTH CHANGE OF ROCKFILL DUMPS AT OPEN PIT MINES UNDER THE NATURAL CLIMATE IMPACT

Vladimir F. Yushkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Principal Researcher, Mining Geophysics Laboratory, office: +7 (383) 205-30-30, ext. 313, e-mail: L14@ngs.ru

The article discusses the change in the elastic properties of rockfill in the rims of an open pit dump during natural compaction under the climate impacts. Seismic survey records allowed determining limits of seasonal change in the dynamic elasticity modulus in freeze of the upper layer of dump rockfill. It is shown that dynamic Young's modulus is exceeded 1.5 times. The results are reflective of activation of natural self-organization in rocks in the rims of an open pit dump under the natural climate impact as the strength increases in the surface layers of the dump.

Keywords: open pit dump, mechanical erosion, dump slump, geomonitoring

Введение

Промерзание в зимний период грунтов и пород четвертичных отложений, складированных в отвалах карьеров и угольных разрезов на юге Западной Сибири, может составлять 2 — 2.5 м, что естественным образом влияет на образование расслоений и развитие механо-эрозионных процессов в уступах и откосах бортов. В результате изменений температуры, накопления осадков, дренажа дожде-

вых и талых вод активизируется переформирование грунтов и пород отвального массива, пронизанного системами протяженных по площади и глубине древо-видных трещин, наиболее существенно проявляющихся в краевой части бортов и уступов. При этом наблюдаются «циркообразные» оседания грунтово-породных масс, развивающихся с определенной скоростью, что, безусловно, связано с изменениями упруго-прочностных параметров насыпных грунтов и пород при увлажнении атмосферными осадками и в результате сезонного промерзания. Инструментальный мониторинг таких процессов на горизонтах и в бортах отвального массива по аналогии с [1] позволит контролировать устойчивость уступов, прогнозировать образование эрозионно-опасных участков.

Методы и материалы

Условия складирования пород в отвалах, формируемых при вскрытии месторождений твердых полезных ископаемых на юге Западной Сибири, в частности в Кузбассе, обусловлены необходимостью совместной отсыпки как четвертичных отложений, покрывающих добычные горизонты с поверхности, так и полускальных и скальных пород, в основном песчаников и алевролитов с примесью аргиллитов, которые на горизонтах добычи приходится вскрывать для обеспечения доступа к продуктивным пластам. Объемы работ по подготовке добычных полей иллюстрируют соотношения литологических разностей вмещающих пород и угля по свитам полей каменноугольных разрезов Кузбасса, приведенные в [2, 3]. Из представленных в [3] литологических соотношений следует, что на участках добычи угля в отвал подлежат эвакуации более 70% непродуктивных пород.

Природно-климатические условия Кузбасса, представленные в [3, 4], оказывают влияние на развитие механо-эрозионных процессов в бортах и уступах при формировании отвалов. Глубины сезонного промерзания послойно укладываемых геоматериалов на горизонтах отвала местами могут превышать $2 \div 2.5$ м, в среднем составляя 1.8 м. Коэффициенты фильтрации осадочных грунтов и пород, довольно низкие в условиях добычных горизонтов, могут существенно возрасти в результате разуплотнения грунтов и фракционного разрушения скальных и полускальных пород при отбойке и перемещении в отвал.

Изменение прочностных параметров насыпных пород отвала под воздействием природно-климатических факторов можно проконтролировать с помощью мониторинга сейсмометрическим методом [3, 5, 6]. Это позволяет установить взаимосвязи между отдельными физико-механическими свойствами складированных геоматериалов, осуществить интерпретацию участков их упрочнения и разупрочнения с помощью вычисления динамического модуля Юнга E_d и коэффициента Пуассона μ_d , значения которых определяются скоростью распространения упругих продольных v_p и поперечных v_s волн с учетом плотности ρ грунтов [5].

Следует отметить, что если коэффициенты фильтрации осадочных грунтов в естественном состоянии варьируют от 0.017 до 2.5 м/сут. при изменении среднегодовых значений в пределах 0.2—0.4 м/сут. [2, 3], то в результате разуплотнения при перемещении в отвал эти величины могут существенно возрасти, снижая прочностные параметры отсыпаемых слоев на горизонтах складирования.

Для измерений скорости продольных и поперечных волн на горизонте складирования насыпных пород отвала шириной порядка 100 м была оборудована сейсмоизмерительная трасса, ориентированная перпендикулярно кромке борта. Записи сейсмических сигналов были получены возбуждением колебаний в насыпном слое грунтов и раздробленных полускальных пород при помощи ударов бойка с заданной энергией. Прием сигналов осуществлялся с помощью геофонов GS20-DX вертикальной и горизонтальной ориентации.

Результаты

Результаты обработки сеймосигналов, измеренных на верхнем горизонте отвала 6, 7, 26 ноября, 18 декабря и 18 февраля, приведены в табл. Расстояние по трассе измерений составило 27.5 м. Скорость продольной волны определялась по годографу первых вступлений волны, поперечной — по годографу максимальных амплитуд. Плотность складированных геоматериалов (суглинки, супеси, песчаники, алевролиты в виде щебня с примесью аргиллитов) с учетом увлажнения к началу промерзания принята равной 1.7 т/м^3 .

Результаты измерения скорости распространения упругих волн в грунтах верхнего слоя отвала и определения динамических модулей упругости

Наименование параметра	7 ноября	26 ноября	18 декабря	18 февраля
Скорость продольной волны, м/с	527	415	485	522
Скорость поперечной волны, м/с	213	222	244	270
Динамический модуль Юнга, МПа/м ²	2.16	2.18	2.7	3.27
Коэффициент Пуассона, о.е.	0.4	0.3	0.33	0.32

Обсуждение

Оценка прочностных параметров складированных геоматериалов верхнего горизонта отвала угольного разреза в период промерзания показывает, что сезонные колебания температуры естественным образом приводят к изменениям несущих свойств отсыпных слоев, инициируя увеличение динамических модулей упругости грунтов и пород при промерзании, и возможного образования и развития трещин при оттаивании в результате сжатия-расширения минеральных частиц. Этот факт подтверждают данные табл., показывающие практически полуторное изменение динамического модуля упругости на участке измерения и снижение на 20% коэффициента Пуассона. Такие изменения параметров динамической упругости по

глубине в период промерзания, при оттаивании могут приводить к снижению сил сцепления складированных геоматериалов и естественным образом вызывать структурные изменения в результате образования и развития трещин в прибортовой части формируемого отвала.

Заключение

Анализ деформационно-волновых процессов в приповерхностных слоях на горизонтах складирования геоматериалов в отвалах на месторождениях твердых полезных ископаемых, а также оценка связанных с ними эрозионных изменений поверхности отсыпки под влиянием сезонных природно-климатических факторов, позволяют определить подходы для разработки методов и реализации комплексного мониторинга формирования отвалов при ведении открытых горных работ по добыче твердых полезных ископаемых. По записям сейсмических колебаний, возбуждаемых на профиле уступа протяженностью 27.5 м, определены пределы сезонного изменения динамических модулей упругости при промерзании приповерхностных слоев насыпных геоматериалов, при этом установлено увеличение практически в 1.5 раза динамического модуля Юнга и снижение коэффициента Пуассона приблизительно на 20%. Представленные результаты свидетельствуют о возможной активизации естественной самоорганизации насыпных пород краевой части борта карьерного отвала под влиянием изменения сезонных природно-климатических факторов за счет повышения прочности приповерхностных слоев грунта при промерзании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юшкин В. Ф. О прогнозе оседаний грунтов в бортах карьера / Сб. материалов XV Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019». Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск: СГУГиГ, 2019. – Т. 2, № 5. – С. 132-137. [Электронное издание]. – 2019. Режим доступа: <http://geosib.sgugit.ru/wp-content/uploads/2019/sborniki/T2-5.pdf>
2. Геологическое строение и горно-геологическая характеристика угольного месторождения (Кузбасс). [Электронное издание]. – 2012. Режим доступа: [http://www.allbest.ru/\(https://knowledge.allbest.ru/geology/3c0a65635b2ad68b5c53b89521306d36_0.html\)](http://www.allbest.ru/(https://knowledge.allbest.ru/geology/3c0a65635b2ad68b5c53b89521306d36_0.html)).
3. Архив погоды, город Киселевск, Кемеровская обл. [Электронное издание]. – 2019. Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru>
4. Юшкин В. Ф. Об изменении упругих параметров грунтов в бортах угольных разрезов под влиянием природно-климатических факторов / Сб. материалов XVI Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020». Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология». — Новосибирск: СГУГиГ, 2020. — Т. 2. — С. 234-238. [Электронное издание]. — 2020. Режим доступа: <http://geosib.sgugit.ru/wp-content/uploads/2020/sborniki/tom2/234-238.pdf>
5. Геофизические методы исследования земной коры. [Электронное издание]. – 1997. Режим доступа: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1161636&uri=index.html>

6. Юшкин В. Ф. Особенности распространения сейсмической волны взрыва по склону борта угольного разреза / Сб. трудов «Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2019. – Т. 6, № 1. – С. 271-276.

REFERENCES

1. Jushkin V. F. O prognoze osedaniy gruntov v bortah kar'era / Sb. materialov XV Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa «Interjekspo GEO-Sibir'-2019». Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija «Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravlenija i tehnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Jekonomika. Geojekologija». – Novosibirsk: SGUGiG, 2019. – Т. 2, № 5. – С. 132-137. [Jelektronnoe izdanie]. – 2019. Rezhim dostupa: <http://geosib.sgugit.ru/wp-content/uploads/2019/sborniki/T2-5.pdf>

2. Geologicheskoe stroenie i gorno-geologicheskaja charakteristika ugol'nogo mestorozhdenija (Kuzbass). [Jelektronnoe izdanie]. – 2012. Rezhim dostupa: <http://www.allbest.ru/> (https://knowledge.allbest.ru/geology/3c0a65635b2ad68b5c53b89521306d36_0.html).

3. Arhiv pogody, gorod Kiselevsk, Kemerovskaja obl. [Jelektronnoe izdanie]. – 2019. Rezhim dostupa: <http://www.pogodaiklimat.ru>

4. Jushkin V. F. Ob izmenenii uprugih parametrov gruntov v bortah ugol'nyh razrezov pod vlijaem prirodno-klimaticeskikh faktorov / Sb. materialov XVI Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa «Interjekspo GEO-Sibir'-2020». Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija «Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravlenija i tehnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Geojekologija». – Novosibirsk: SGUGiG, 2020. – Т. 2, № 5. – С. 234-238. [Jelektronnoe izdanie]. – 2019. Rezhim dostupa: <http://geosib.sgugit.ru/wp-content/uploads/2020/sborniki/tom2/234-238.pdf>

5. Geofizicheskie metody issledovanija zemnoj kory. [Jelektronnoe izdanie]. – 1997. Rezhim dostupa: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1161636&uri=index.html>

6. Jushkin V. F. Osobennosti rasprostraneniya sejsmicheskoy volny vzryva po sklonu borta ugol'nogo razreza / Sb. trudov «Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk». – Novosibirsk: IGD SO RAN, 2019. – Т. 6, № 1. – С. 271-276.

© В. Ф. Юшкин, 2020

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕФТЕГАЗОВЫХ КОМПАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА DEA

Аде Елизавета Витальевна

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студентка экономического факультета, e-mail: e.ade@g.nsu.ru

Ирина Викторовна Филимонова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, д.э.н., профессор, заведующая Центром экономики недропользования нефти и газа, e-mail: FilimonovaIV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, заведующая кафедрой политэкономии экономического факультета

В статье описан метод DEA, который используется для оценки эффективности функционирования социально-экономических систем. Особенности применения его для нефтегазовых компаний. Показаны преимущества и недостатки данного метода, а также особенности при выборе параметров модели.

Ключевые слова: эффективность, DEA, нефтегазовый сектор

COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF OIL AND GAS COMPANIES USING THE DEA METHOD

Elizaveta V. Ade

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, student, e-mail: e.ade@g.nsu.ru

Irina V. Filimonova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Dr. Sc., Professor, Head of the Center for Economics of Subsoil Use of Oil and Gas, tel.: +7 (913) 900-41-70, e-mail: FilimonovaIV@list.ru

The article presents the DEA method. This method is used to assess the efficiency of socio-economic systems. The features of its application for oil and gas companies are considered. The advantages and disadvantages of this method are described. The features of selecting the model parameters are described.

Keywords: efficiency, DEA, oil and gas sector

В основе анализа свертки данных (DEA) лежит применение линейного программирования. Первое описание метода было представлено в 1978 году исследователями Р. Д. Банкером, А. Чарнесом и В.В. Купером. Применение метода предназначалось для измерения производительности конкретного предприятия, позже его стали использовать для сравнения эффективности компаний, которые используют большое количество схожих входных параметров для производства.

Метод DEA – один из существующих методов оценки эффективности, который представляет собой построение выпуклой «кривой» эффективности – аналог производственной функции, когда выпуск является векторной величиной, а не скалярной [1]. Это характерно для случая, когда производство включает несколько продуктов. Граница эффективности строится на основе двух переменных – переменные входа (input) и выхода (output). Она имеет форму выпуклой оболочки, которая располагается на плоскости значений двух переменных, а каждое значение характеризует отдельный объект исследуемой совокупности в многомерном пространстве. Для сравниваемых объектов граница эффективности – эталон, или Парето-эффективное множество значений. Степень эффективности каждого объекта соответствует тому, насколько близко он находится к построенной кривой эффективности. Построение границы эффективности реализуется путем многократного решения оптимизационной задачи линейного программирования.

В методологии DEA используется термин «эффективность функционирования». Этот термин отражает эффективность, с которой исследуемые объекты преобразуют входы в выходы.

Рассмотрим суть метода DEA. Пусть имеются данные для K входных параметров и M выходных параметров для каждого из N объектов (под термином «объект» могут подразумеваться регионы, отрасли хозяйства, предприятия, учебные заведения и т.д.). Для i -го объекта они представлены вектор-столбцами x_i и y_i соответственно. Тогда матрица X размерности $K \times N$ представляет матрицу входных параметров для всех N объектов, а матрица Y размерности $M \times N$ представляет матрицу выходных параметров для всех N объектов. Можно прийти к задаче математического программирования и, используя теорию двойственности, сформулировать ее в такой форме [2]:

$$\begin{aligned} & \min_{\theta, \lambda} (\theta) \\ & -y_i + Y\lambda \geq 0 \\ & \theta x_i - X\lambda \geq 0 \\ & \lambda \geq 0, \end{aligned}$$

где θ – скаляр, а λ является вектором констант размерности $N \times 1$. Значение θ , полученное в результате решения задачи, является мерой эффективности i -го объекта. Эффективность всегда будет меньше или равна единице. Аналогичная задача решается N раз, т.е. для каждого объекта. Объекты с эффективностью равной единице находятся на границе эффективности. В результате может быть сформирована кусочно-линейная граница эффективности. Точки, соответствующие тем объектам, у которых показатель эффективности оказался меньше единицы, можно спроецировать на границу эффективности таким образом, что каждая из этих точек будет равна линейной комбинации $(X\lambda, Y\lambda)$. Часть элементов вектора λ имеют ненулевые значения. Эти элементы соответствуют тем объектам, которые являются эталонными для оцениваемого объекта. Линейная комби-

нация эталонных объектов и образует гипотетический объект, находящийся на границе эффективности. Гипотетический объект был бы эффективным, если бы существовал в действительности. Значения его переменных являются целью для реального – неэффективного – объекта. Таким образом для неэффективных объектов могут быть установлены целевые значения входных и выходных параметров, которые позволят повысить эффективность их деятельности до единицы. Чем ближе точка, соответствующая данному объекту, к границе эффективности, тем выше эффективность этого объекта. [3].

Описанная модель называется моделью, ориентированной на вход. Она характеризуется постоянным эффектом масштаба. Чтобы получить модель, которая будет учитывать переменный эффект масштаба, необходимо в данную модель добавить ограничение на сумму весовых коэффициентов λ [4]:

$$\sum \lambda_i = 1.$$

Дополнение такого ограничения формирует выпуклую линейную комбинацию эффективных объектов.

Преимущества метода DEA [5]:

- позволяет вычислить один агрегированный показатель для каждого объекта в терминах использования входных факторов (независимые переменные) для производства желаемых выходных продуктов (зависимые переменные);
- позволяет обрабатывать большое число входов и выходов, которые могут иметь различные единицы измерения;
- позволяет учитывать внешние факторы (факторы окружающей среды);
- не требует указания весовых коэффициентов для параметров входа и выхода;
- не требует функциональной зависимости между входными и выходными переменными (в отличие от регрессионного анализа);
- позволяет учесть предпочтения менеджеров, касающиеся важности определенных показателей входа и выхода;
- дает возможность оценить необходимые изменения в входах и выходах, которые способствовали бы перемещению неэффективных DMU на границу эффективности;
- сосредоточен на нахождении примеров так называемой лучшей практики (best practice) в отличие от регрессионного анализа, который сосредоточен на усредненных тенденциях [6].

Недостатки метода DEA:

- достаточно сложно обосновать выбор параметров входа и выхода;
- возникают трудности с выбором модели DEA;
- оценки эффективности имеют достаточно сильную зависимость от состава исследуемых объектов (при добавлении нового DMU результаты модели могут значительно поменяться);

- при маленьком количестве DMU и большом количестве переменных можно получить некорректные результаты.

Метод DEA корректно использовать при сравнении компаний, которые осуществляют свою деятельность в одной отрасли и на идентичных рынках сбыта. Нефтегазовые компании однозначно подходят для такой оценки.

Анализ свертки данных предполагает, что нужно выбрать входные и выходные параметры модели. Как уже было сказано ранее, иногда с выбором и распределением показателей возникают трудности. Причиной этого может являться то, что метод не требует технологической взаимосвязи между параметрами. Для решения этой проблемы может быть применен следующий подход: если уменьшение показателя положительно влияет на деятельность компании, то его следует относить к входным параметрам. А если увеличение показателя оказывает положительный эффект на деятельность объекта исследования, то такой показатель следует отнести к параметрам выхода. Обычно входные параметры являются ресурсами, которые компания затрачивает в процессе своей деятельности и условиями, при которых эта деятельность осуществляется. А параметры выходы – это результаты деятельности компании. Это наиболее часто используемая схема определения параметров в исследованиях, но возможны и другие подходы к определению и распределению показателей [7].

Для определения входных и выходных параметров модели были рассмотрены различные исследования, в которых проводился сравнительный анализ эффективности нефтегазовых компаний с помощью метода DEA. Исследования, авторы работ и выбранные параметры представлены в таблице.

Из таблицы видно, что метод DEA может быть использован для решения различных задач. Выбор параметров зависит от цели исследования. Один и тот же показатель может выступать как в качестве входного параметра, так и в качестве выходного. Так, например, для оценки производственной эффективности добычу нефти следует отнести к параметрам выхода, а при оценке эффективности реализации и переработки компании данный параметр будет выступать в качестве входа [8].

Это далеко не весь перечень исследований по оценке эффективности нефтегазовых компаний с помощью метода DEA. Существует множество способов сравнения эффективности компаний по различным группам критериев: рентабельность, надежность, устойчивость, ликвидность, стратегия развития, производственная эффективность, инвестиционная привлекательность, экологичность и т.д.

В исследовании нефтегазовые компании будут сравниваться по уровню производственной эффективности. Будут рассмотрены несколько моделей с разными вариациями входных и выходных параметров.

Таким образом, исходя из рассмотренных исследований и цели работы, были выбраны следующие показатели выходов: добыча нефти и добыча газа. Это основные результаты производственной деятельности нефтегазовых предприятий. Такие показатели полностью удовлетворяют классическому выбору параметров для модели DEA. Увеличение добычи нефти и газа положительно влияет на деятельность компании [7].

Определение входных и выходных параметров в задачах, решаемых методом DEA

Авторы	Исследование	Входы	Выходы
Капустина Л.М, Крылов Д.С., 2008	Сравнительный анализ эфф-ти частных и гос. нефтяных компаний	1. Запасы 2. Персонал	1. Выручка
Abdullah Al-Obaidan, Gerald Scully, 1991	Сравнительная эффективность государственных нефтяных компаний	1. Активы 2. Количество сотрудников	1. Выручка 2. Объем добычи и переработки нефти
О.Б. Уткин, 2000	Оценка рентабельности нефтяных компаний по производственным показателям	1. Затраты на бурение разведочное и эксплуатационное 2. Затраты на промышленное строительство 3. Затраты на закупку оборудования	1.1. Добыча нефти с газовым конденсатом или 1.2. Прибыль отчетного периода
		1. Затраты на бурение разведочное и эксплуатационное 2. Затраты на строительство и оборудование 3. Эксплуатационный фонд скважин	1. Добыча нефти с газовым конденсатом
	Оценка стратегии развития	1. Затраты на бурение 2. Затраты на промышленное строительство 3. Затраты на непромышленное строительство	1. Прирост промышленных запасов 2. Добыча нефти с газовым конденсатом
	Оценка эффективности реализации и переработки	1. Добыча нефти с газовым конденсатом 2. Нефть на переработку 3. Нефть на экспорт	1. Прибыль отчетного периода
	Оценка надежности компании	1. Затраты на бурение 2. Затраты на промышленное строительство 3. Эксплуатационный фонд скважин	1. Обеспеченность запасами категории А+В+С1 2. Добыча нефти с газовым конденсатом
	Оценка эфф-ти компаний по фин. показателям (Оценка рентабельности по текущим показателям)	1. Прямые затраты по основной деятельности 2. Расходы от неосновной деятельности и прочие расходы	1. Выручка от реализации 2. Доходы от неосновной деятельности
	Оценка эфф-ти компаний по фин. показателям (Оценка рентаб-ти с учетом долгосрочных характеристик)	1. Суммарные расходы 2. Основные средства	1. Суммарная выручка
Оценка ликвидности компаний	1. Краткосрочные пассивы 2. Внеоборотные активы	1. Ден. сред-ва предприятия и цен. бумаги 2. Деб. задолженность и оценка товарных запасов	
Е.Н. Акерман и др., 2020	Расчет технической эффективности	1. Основные средства 2. Фонд оплаты труда	1. Выручка
Lei Li, Mingyue Li, Chunlin Wu, 2012	Production efficiency evaluation of energy companies based on the improved super-efficiency data envelopment analysis considering undesirable outputs (Оценка производной эффективности)	1. Капитальные расходы 2. Операционные расходы 3. Амортизация основных средств	1. Добыча нефти 2. Добыча газа
Вирабян С.Н., 2017	Измерение эффективности сделок по слиянию и поглощению	1. Активы 2. Расходы	1. Выручка от реализации 2. Чистая прибыль
Vikas, Rohit Bansal, 2018	Efficiency evaluation of Indian oil and gas sector	1. Капитальные вложения 2. Фонд оплаты труда 3. Производственные расходы	1. Операционная прибыль 2. Чистая прибыль

Для выбора параметров входа нужно рассмотреть ресурсы, которые компании нефтегазового сектора затрачивают в процессе своей деятельности. Так как в работе анализируется именно производственная эффективность, то показатели входа должны характеризовать производственные ресурсы предприятий. К таким показателям можно отнести численность персонала и активы.

Во второй модели параметры выхода останутся прежними, а в качестве входных параметров выбраны следующие показатели: операционные затраты и капитальные вложения. Такие входные параметры выбраны не случайно. Капитальные вложения и операционные затраты – это основные виды затрат в бизнес-цикле предприятия. Капитальные вложения играют важную роль в деятельности нефтегазовых компаний, так как нефтегазовая отрасль является очень капиталоемкой. Нефтегазовые компании инвестируют большие средства в такие сектора как разведка, добыча, переработка нефти и газа. Операционные расходы тоже играют не менее важную роль в процессе деятельности предприятия [8]. Они отражают текущие затраты производства, реализации сырья и продуктов его переработки и оказывают сильное влияние на уровень эффективности работы компаний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта № 0331-2019-0028 в рамках государственной программы «Выполнение фундаментальных научных исследований»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карасева М. В., Новожилов А. А., Рукавицына Т. А. К вопросу оценки эффективности функционирования организационно-технических систем // Сибирский журнал науки и технологий. – 2011. – №4. – С. 40-42.
2. Mosbah Ez., Zaibet L., Dharmapala P. S. A new methodology to measure efficiencies of inputs (outputs) of decision making units in Data Envelopment Analysis with application to agriculture // Socio-Economic Planning Sciences. – 2020. – Vol. 72. P. – 345-352.
3. Vásquez-Ibarra L., Rebolledo-Leiva R., Angulo-Meza L., González-Araya M. C., Iriarte A. The joint use of life cycle assessment and data envelopment analysis methodologies for eco-efficiency assessment: A critical review, taxonomy and future research // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 738. – P. 189-195.
4. Ghimire S., Hassanzadeh S. A., Wardley L. J. Developing new data envelopment analysis models to evaluate the efficiency in Ontario Universities // Journal of Informetrics. – 2021. – Vol. 15. – P. 81-86.
5. Капустина Л.М, Крылов Д.С. Сравнительный анализ эффективности частных и государственных нефтяных компаний // Journal of new economy. – 2008. – №3 – (22). – С. 25-31.
6. Toloo M., Keshavarz E., Hatami-Marbini A. Selecting data envelopment analysis models: A data-driven application to EU countries // Omega. – 2021. – Vol. – 101. – P. 361-368.
7. Уткин О.Б. Технология анализа Среды функционирования и оценка деятельности нефтяных компаний // Вестник РУДН. Серия: Экономика. – 2002. – №1. – С. 148-152.
8. Акерман Е.Н., Михальчук А.А., Спицын В.В., Чистякова Н.О. Инновационное развитие и оценка DEA-динамической эффективности высокотехнологичных отраслей экономики России // Вестник Томского государственного университета. – 2020. – №51. – С. 173-193.

REFERENCES

1. Karaseva M. V., Novozhilov A. A., Rukavitsyna T. A. K voprosu otsenki effektivnosti funktsionirovaniya organizatsionno-tekhnicheskikh sistem // *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. – 2011. – №4. – S. 40-42.
2. Mosbah Ez., Zaibet L., Dharmapala P. S. A new methodology to measure efficiencies of inputs (outputs) of decision making units in Data Envelopment Analysis with application to agriculture // *Socio-Economic Planning Sciences*. – 2020. – Vol. 72. P. – 345-352.
3. Vásquez-Ibarra L., Rebolledo-Leiva R., Angulo-Meza L., González-Araya M. C., Iriarte A. The joint use of life cycle assessment and data envelopment analysis methodologies for eco-efficiency assessment: A critical review, taxonomy and future research // *Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 738. – P. 189-195.
4. Ghimire S., Hassanzadeh S. A., Wardley L. J. Developing new data envelopment analysis models to evaluate the efficiency in Ontario Universities // *Journal of Informetrics*. – 2021. – Vol. 15. – P. 81-86.
5. Kapustina L.M, Krylov D.S. Sravnitel'nyy analiz effektivnosti chastnykh i gosudarstvennykh neftyanykh kompaniy // *Journal of new economy*. – 2008. – №3 – (22). – С. 25-31.
6. Toloo M., Keshavarz E., Hatami-Marbini A. Selecting data envelopment analysis models: A data-driven application to EU countries // *Omega*. – 2021. – Vol. – 101. – P. 361-368.
7. Utkin O.B. Tekhnologiya analiza Sredy funktsionirovaniya i otsenka deyatelnosti neftyanykh kompaniy // *Vestnik RUDN. Seriya: Ekonomika*. – 2002. – №1. – S. 148-152.
8. Akerman Ye.N., Mikhail'chuk A.A., Spitsyn V.V., Chistyakova N.O. Innovatsionnoye razvitiye i otsenka DEA-dinamicheskoy effektivnosti vysokotekhnologichnykh otrasley ekonomiki Rossii // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. – 2020. – №51. – S. 173-193.

© *Е. В. Аде, И. В. Филимонова, 2021*

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ РЕЗКОГО СПАДА ЦЕН НА НЕФТЬ И САНКЦИЙ НА ДИНАМИКУ КЛЮЧЕВЫХ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РОССИИ

Юрий Алексеевич Дзюба

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник; Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 17, аспирант, e-mail: Dzyuba_YA@mail.ru

Дмитрий Васильевич Колужнов

Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 17, PhD in economics, научный сотрудник; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, PhD In economics, доцент каф. экономической теории, e-mail: dima.kolyuzhnov@mail.ru

В настоящей статье проводится анализ степени влияния различных макроэкономических шоков, вызванных санкционным режимом и резким спадом цен на нефть в период с 2014 по 2018 гг. При помощи построенной DSGE-модели российской экономики и посредством полученных исторических декомпозиций для поквартальных темпов роста исследуемых макропоказателей авторами были определены шоки, которые в большей мере спровоцировали спад ВВП и рост инфляции на рассматриваемом отрезке времени. Согласно проведенным расчетам, рост уровня инфляции с 2014 по 2015 гг. можно интерпретировать как сумму негативных эффектов от смены предпочтений домашних хозяйств и шока цен на нефть. Наблюдаемый спад реального ВВП со второго квартала 2014 по третий квартал 2015 гг. объясняется синергетическим эффектом от шоков монетарной политики и резкого падения цен на нефть.

Ключевые слова: экономика Российской Федерации, цены на нефть, санкции, DSGE-моделирование, нефтегазовый сектор

THE ESTIMATION OF INFLUENCE OF THE SHARP OIL PRICES REDUCTION AND SANCTIONS ON THE DYNAMICS OF RUSSIAN CRUCIAL MACROECONOMIC INDICATORS

Yuriy A. Dzyuba

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher; Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS, 17, Akademika Lavrentyev Ave. 17, Novosibirsk, 630090, Russia, Graduate Student, e-mail: Dzyuba_YA@mail.ru

Dmitriy V. Kolyuzhnov

Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS, 17, Akademika Lavrentyev Ave. 17, Novosibirsk, 630090, Russia, PhD. in economics, Searcher; Novosibirsk State University, Pirogova st. 2, Novosibirsk, 630090, Russia, PhD in economics, Associate Professor at Department of Economic Theory, e-mail: dima.kolyuzhnov@mail.ru

This article provides a brief analysis of the impact of various macroeconomic shocks caused by the sanctions regime and the sharp drop in oil prices from 2014 to 2018. The authors identified shocks that greater extent provoked a GDP decline and inflation increase using the constructed DSGE-model

of the Russian economy and the obtained historical decomposition for the quarterly growth rates of the investigated macro-indicators. According to calculations, the inflation growth from 2014 to 2015 can be interpreted as the sum of the adverse effects from the change in household preferences, the shock in oil prices, and the negative contribution of the stabilizing monetary policy. The observed GDP decline from the second quarter of 2014 to the third quarter of 2015 is explained by the synergistic effect of monetary policy shocks and a sharp drop in oil prices.

Keywords: Russian economy, oil prices, sanctions, DSGE-models, oil and gas sector

Введение

В середине прошлого десятилетия в российской экономике произошло два серьезных кризиса. К первому можно отнести резкое изменение условий внешней торговли и стоимости углеводородного сырья. Ко второму – введение в отношении России экономических санкций. Состояние усугублялось отсутствием импульса к росту, а также незначительными показателями развития экономики (темпы роста реального ВВП в 2013 г. составили всего 1,8%) и последствиями структурного кризиса, наступившего еще в 2012 г. [1].

Вопросы определения степени влияния различных макроэкономических шоков и разработки грамотных стратегий для минимизации их последствий при помощи стандартных инструментов фискальной и монетарной политики являются крайне сложными в связи с возможностью возникновения существенных рисков, особенно в условиях нестабильных цен на нефть, жестких бюджетных ограничений и негативных ожиданий.

Актуальность исследования обусловлена реалиями российской экономики в период с 2014 по 2018 гг., находящимися в тесной взаимосвязи с важностью выбора оптимального сочетания инструментов фискальной и монетарной политики для минимизации последствий экономических шоков, возникших по причине антироссийских санкций и низких цен на нефть. Именно влияние подобных потрясений на экономику будет рассмотрено в рамках данного исследования. Однако для определения наиболее точного эффекта от обозначенных кризисов необходимо использовать современный аппарат, который наиболее полно сможет отражать реакцию всех субъектов экономической деятельности, демонстрировать ключевые взаимосвязи и позволит смоделировать траекторию движения основных макропоказателей в зависимости от различных шоков. Поэтому было решено обратиться к динамическим стохастическим моделям общего экономического равновесия (англ. dynamic stochastic general equilibrium model, далее –DSGE).

Цель настоящего исследования состоит в построении собственной версии DSGE-модели, в которой будут учитываться поведенческие и экономические реалии российской экономики с 2014 по 2018 гг. для дальнейшей оценки степени влияния различных макроэкономических шоков, произошедших в указанный период времени.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи, включающие как теоретические, так и практические аспекты проработки проблемы:

1. построение новой версии модели общего экономического равновесия, отражающей ряд ранее неучтенных особенностей экономики РФ и включающей поведенческую реакцию агентов на различные шоки;

2. оценка параметров моделей и анализ их поведения на российских статистических данных;

3. оценка влияния шоков посредством построенных DSGE-моделей, интерпретация полученных результатов.

Объект исследования: экономика Российской Федерации и динамика ее макроэкономических показателей в период с 2014 по 2018 гг.

Предмет исследования: влияние внешних и внутренних экономических шоков, вызванных санкционным режимом и спадом цен на нефть, на динамику ключевых макроэкономических показателей России (в рамках настоящего исследования – на ВВП и на инфляцию).

Методы и материалы

За основу построения модели были взяты: классическое исследование Ф. Сметса и Р. Ваутерса «Оценочная динамическая стохастическая модель общего равновесия для Еврозоны» [2]; статья А. Алгожиной «Правило денежно-кредитной политики, режим валютного курса и фискальная политика в развивающейся нефтяной экономике» [3]; а также работы в рамках серии докладов об экономических исследованиях Банка России за авторством Д. А. Крепцева и С. М. Селезнева [4, 5].

Поскольку в используемой версии модели планируется включение нефтегазовой отрасли (в частности, добывающий сектор) и дифференциация домашних хозяйств на несколько типов, было необходимо провести анализ современных исследований, где моделируются соответствующие дополнения. Так, проблемами включения в модель типа DSGE фирм нефтегазового сектора и добавления нефти в качестве отдельного вида товара, экспортируемого и используемого как фактор производства в обрабатывающей отрасли, занимались следующие исследователи: А. Ферреро, М. Сенека, А. В. Полбин, С. М. Дорбышевский, В. Акурио-Васконес и др. [6 – 10]. Вопрос дифференциации домашних хозяйств по видам и классам рассматривается в работах у Н. Манкиа, Р. Марто, Дж. Гали, Д. Лопес-Салидо, Дж. Валлеси др. [11 – 14].

Как и у большинства авторов, в данной работе будет рассматриваться малая открытая экономика, в которой существуют следующие агенты: три типа домашних хозяйств (богатые, средний класс и бедные), фирмы-производители (обрабатывающее производство), ритейлеры-импортеры, нефтегазовые компании, упаковщики отечественных и импортных товаров, предприятия розничной и оптовой торговли, Центральный банк. В рамках модели происходит распределение таких факторов, как труд, капитал и энергоресурсы в виде потребляемой внутри страны нефтегазовой продукции. Для упрощения было предложено считать весь экспорт нефтегазовым и экзогенным.

В качестве «эффекта санкций» был введен ряд шоков, которые должны повлиять на динамику ключевых макроэкономических показателей. В основу решения по их включению в модель лег проведенный ранее аналитический и статистический анализ [15].

В исследовании использовались временные статистические ряды периода с первого квартала 2000 по четвертый квартал 2018 г. Данные были приведены к реальным показателям (ценам 2011 г.) посредством дефлятора ВВП и индекса потребительских цен.

Мы объединили предварительное распределение по параметрам модели с функцией правдоподобия и применили алгоритм Метрополиса – Гастингса для получения апостериорного распределения по параметрам модели $f(\theta|Y)$:

$$f(\theta|Y) = \frac{f(\theta)L(\theta, Y)}{f(Y)}$$

где $f(\theta)$ – априорная плотность распределения параметров, $L(\theta, Y)$ – функция правдоподобия, рассчитанная на основе доступной статистической информации, $f(Y) = \int f(\theta)L(\theta, Y) d\theta$ – безусловная плотность вероятности.

На основе апостериорной плотности распределения параметров модели $f(\theta|Y)$ были рассчитаны средние значения и доверительные интервалы некоторых статистических характеристик используемых модельных параметров. Коэффициенты, которые не удалось рассчитать самостоятельно из-за отсутствия необходимых данных, были или откалиброваны, или взяты из соответствующих статей [3 – 5]. Полученная система была реализована на языке MatLab и при помощи расширения Dynare.

Результаты и обсуждения

В исследовании была проведена эмпирическая верификация полученной модели посредством построения исторических декомпозиций для поквартальных темпов роста ВВП и инфляции. С помощью этих декомпозиций была дана численная оценка вклада внешних и внутренних шоков в изменение динамики основных макроэкономических переменных, а затем проведена интерпретация полученных результатов.

В рамках настоящей работы не предполагалось комплексное описание динамики анализируемых макропоказателей во времени и допускалось наличие ошибок измерения между модельными и фактическими данными. Акцент делался на релевантных шоках (шок изменения предпочтений, шок возникновения финансовых ограничений, шок нефтяных цен, шок снижения прямых иностранных инвестиций в нефтегазовый комплекс, технологический шок и шок монетарной политики), возникших в экономической системе в период с 2013 по 2018 г. включительно. Были исследованы два наблюдаемых макроэкономических показателя и пять влияющих на них шоков.

На рисунках 1, 2 показана историческая декомпозиция анализируемых макроэкономических переменных для исследуемой модели. Сплошная линия здесь обозначает фактическую динамику анализируемых показателей в процентном отклонении, а столбчатая диаграмма, в свою очередь, демонстрирует долевой вклад шоков в колебание временных рядов. Согласно полученным декомпозициям, модель способна хорошо генерировать динамику инфляции и ВВП, а также наглядно демонстрировать вклад определенных шоков.

Например, рост уровня инфляции с третьего квартала 2014 по второй квартал 2015 г. (Рис. 1) можно интерпретировать как сумму негативных эффектов от отрицательных шоков смены предпочтений (около 19,1 % в четвертом квартале 2014 г.), шока нефтяных цен (более 25,7 % в 2015 г.), а также положительного вклада стабилизирующей денежно-кредитной политики (около 17,8 % за обозначенный период). Из положительных моментов можно отметить и влияние монетарного шока на постепенное сокращение инфляции со второго квартала 2015 по первый квартал 2016 г. (42,2 %).

Наблюдаемый спад динамики реального ВВП со второго квартала 2014 по третий квартал 2015 г. (Рис. 2) можно объяснить синергетическим эффектом от шока монетарной политики (12,3 %) и шока падения цен на нефть (34,7 %). Эффекты изменения предпочтений и сокращение прямых иностранных инвестиций в нефтегазовый комплекс России оказали меньшее влияние на экономический спад в анализируемом периоде (7,3 % и 3,3 % соответственно).

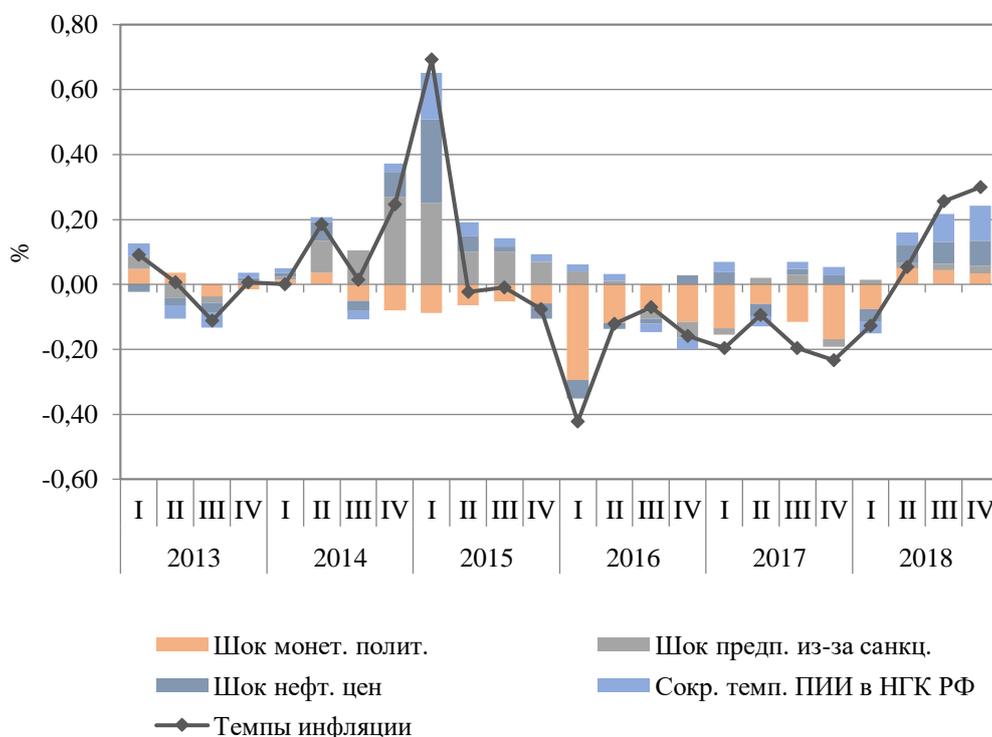


Рис. 1. Историческая декомпозиция для темпов инфляции, %

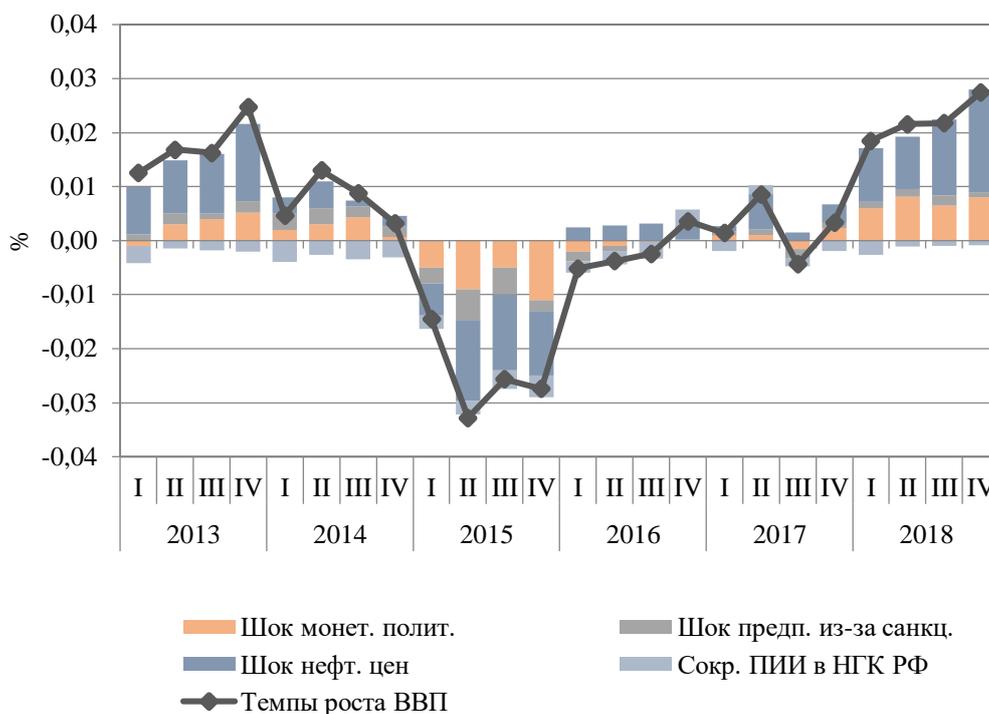


Рис.2. Историческая декомпозиция для темпов роста реального ВВП, %

Данный факт позволяет сделать вывод о том, что снижение мирового уровня цен на нефть и проводимая монетарная политика оказали гораздо большее влияние на экономический спад и последующую стагнацию, чем антироссийские санкции. Таким образом, кумулятивный эффект от шоков монетарной политики и снижения цен на углеводороды привел к спаду ВВП в 2015 г. примерно на 1,6 %.

В этих условиях по-прежнему видится целесообразным проведение мягкой монетарной и активной фискальной политики (увеличение расходов на образование, инвестиционные и инновационные программы, выплаты трансфертных платежей и т.д.), а также проведение программ, способствующих развитию промышленного и сельскохозяйственного комплекса. Особое внимание стоит уделить и диверсификации экономики, так как ВВП страны в большей мере претерпел существенные потери ввиду снижения мирового уровня цен на углеводороды.

Заключение

В настоящем исследовании была построена собственная модель, которая опирается на опыт отечественных и зарубежных макроэкономистов, а также отражает ряд ранее не учтенных особенностей экономики Российской Федерации.

Была произведена оценка основных параметров моделей с использованием поквартальных данных с 2000 по 2018 г. для устойчивых состояний эндогенных переменных. Полученная модель способна достаточно хорошо объяснить все

наблюдаемые переменные и некоторые макроэкономические шоки. Результаты оценки параметров оказались схожими с результатами исходных моделей, однако в ряде аспектов за счет введенных модернизаций удалось лучше объяснить движение временных рядов и продемонстрировать достаточно правдоподобные отклики макропоказателей на возникающие импульсы.

При помощи построенных исторических декомпозиций для поквартальных темпов роста ВВП и инфляции была оценена степень влияния каждого из шоков на изменение динамики анализируемых макропоказателей. Рост уровня инфляции с 2014 по 2015 гг. можно интерпретировать как сумму негативных эффектов от отрицательных шоков смены предпочтений (около 19,1 % в четвертом квартале 2014 г.), шока нефтяных цен (более 25,7 % в 2015 г.), а также положительного вклада стабилизирующей денежно-кредитной политики (около 17,8 % за указанный период).

Наблюдаемый спад в динамике реального ВВП со второго квартала 2014 по третий квартал 2015 г. объясняется синергетическим эффектом от шока монетарной политики (12,3 %) и шока падения цен на нефть (34,7 %). Эффекты изменения и сокращение прямых иностранных инвестиций в нефтегазовый комплекс России оказали меньшее влияние на экономический спад в анализируемом периоде (7,3 %, 5,2 % и 3,3 % соответственно).

В рассматриваемых реалиях будет целесообразным проведение более мягкой монетарной политики, нацеленной на улучшение благосостояния населения и на достижение целевых значений для уровня совокупного выпуска. Чтобы нивелировать негативный эффект от резкого падения цен на нефть, необходимо обратить особое внимание на вопрос диверсификации экономики. Валовой выпуск претерпел существенные потери из-за снижения мирового уровня цен на нефть, повлекшего за собой сокращение нефтегазовых доходов бюджета, снижение экспорта и рост цен на нефтепродукты.

В рамках исследования оценка параметров фискальной политики не проводилась, но в анализируемых условиях выглядит разумным активное использование мер, направленных на стимулирование экономического роста в Российской Федерации посредством увеличения государственных расходов (образование, инвестиционные и инновационные программы и др.), трансфертных платежей и смягчения налогового бремени для ряда секторов экономики. Такой подход также позволит избежать рассинхронизации в действиях монетарных и фискальных властей.

Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии Президента РФ № СП-5871.2021.1 и базового проекта НИР лаборатории 1105 ИИГГ СО РАН № 0266-2019-0008.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов А.О. Время не ждет: экономическая политика как инструмент преодоления рецессии в России // ЭКО. – 2016. – №4. – С. 5-23.

2. Smets F., Wouters R. An estimated stochastic dynamic general equilibrium model for the Euro Area // *Journal of the European Economic Association*. – 2003. – №1. – P. 1123-1175.
3. Algozhina A. Monetary Policy Rule, Exchange Rate Regime, and Fiscal Policy Cyclicity in a Developing Oil Economy // *CERGE-EI WP*. – 2016. – P. 1-46.
4. Крепцев Д. Селезнев С. DSGE-модели российской экономики с малым количеством уравнений // *Серия докладов об экономических исследованиях ЦБ РФ*. – 2016. – №12. С. 1-53.
5. Крепцев Д. Селезнев С. DSGE-модель российской экономики с банковским сектором // *Серия докладов об экономических исследованиях ЦБ РФ*. – 2017. – №27. – С. 1-82.
6. Ferrero A., Seneca M. Notes on the underground: monetary policy in resource-rich economies // *Norges Bank Working Paper*. – 2015. – №2. – P. 1-39.
7. Acurio-Vásquez V. Oil and Unemployment in a New-Keynesian Model // *Documents de Travail du Centre d’Economie de la Sorbonne*. – 2015. – № 2015.43.
8. Ojeda J., Parra-Polania J., Vargas C. Natural-Resource Booms, Fiscal Rules and Welfare in a Small Open Economy // *Borradores de Economía*. – 2014. – № 807. – P. 1-31.
9. Дробышевский С., Полбин А. Декомпозиция динамики макроэкономических показателей РФ на основе DSGE-модели // *Экономическая политика*. – 2015. – № 2, – С. 20-42
10. Полбин А. В. Построение динамической стохастической модели общего равновесия для экономики с высокой зависимостью от экспорта нефти // *Экономический журнал Высшей школы экономики*. – 2013. – № 2. – С. 323-359.
11. Mankiw N. G. The Savers-Spenders Theory of Fiscal Policy // *American Economic Review*. – 2000. – № 90(2). – P. 120–125.
12. Marto R. Assessing the Impacts of Non-Ricardian Households in an Estimated New Keynesian DSGE Model // *Swiss Journal of Economics and Statistics*. – 2014. – №150 – P. 353-398.
13. Gali J., Lopez-Salido J. D., Valles J. Rule-of-Thumb Consumers and the Design of Interest Rate Rules. *Journal of Money, Credit and Banking*. – 2004. – №36. – P. 739-763.
14. Gali J., Lopez-Salido J. D., Valles J. Understanding the Effects of Government Spending on Consumption. *Journal of the European Economic Association*. – 2007. – № 5. – P. 227-270.
15. Дзюба Ю. А. Анализ динамики ключевых макроэкономических показателей в условиях падения цен на нефть и санкций // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь - "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология"*: Материалы XVI международной научной конференции (г. Новосибирск, 20-24 апреля 2020 г.). – 2020. – С. 781-794.

REFERENCES

1. Baranov A.O. Vremya ne zhdet: ekonomicheskaya politika kak instrument preodoleniya recessii v Rossii // *EKO*. – 2016. – №4. – S. 5-23.
2. Smets F., Wouters R. An estimated stochastic dynamic general equilibrium model for the Euro Area // *Journal of the European Economic Association*. – 2003. – №1. – P. 1123-1175.
3. Algozhina A. Monetary Policy Rule, Exchange Rate Regime, and Fiscal Policy Cyclicity in a Developing Oil Economy // *CERGE-EI WP*. – 2016. – P. 1-46.
4. Крепцев Д. Селезнев С. DSGE-модели российской экономики с малым количеством уравнений // *Серия докладов об экономических исследованиях ЦБ РФ*. – 2016. – №12. С. 1-53.
5. Крепцев Д. Селезнев С. DSGE-модель российской экономики с банковским сектором // *Серия докладов об экономических исследованиях ЦБ РФ*. – 2017. – №27. – С. 1-82.
6. Ferrero A., Seneca M. Notes on the underground: monetary policy in resource-rich economies // *Norges Bank Working Paper*. – 2015. – №2. – P. 1-39.
7. Acurio-Vásquez V. Oil and Unemployment in a New-Keynesian Model // *Documents de Travail du Centre d’Economie de la Sorbonne*. – 2015. – № 2015.43.
8. Ojeda J., Parra-Polania J., Vargas C. Natural-Resource Booms, Fiscal Rules and Welfare in a Small Open Economy // *Borradores de Economía*. – 2014. – № 807. – P. 1-31.

9. Drobyshevskij S., Polbin A. Dekompoziciya dinamiki makroekonomicheskikh pokaza-telej RF na osnove DSGE-modeli // Ekonomicheskaya politika. – 2015. – № 2, – S. 20-42
10. Polbin A. V. Postroenie dinamicheskoy stohasticheskoy modeli obshchego ravnovesiya dlya ekonomiki s vysokoj zavisimost'yu ot eksporta nefi // Ekonomicheskij zhurnal Vysshej shkoly ekonomiki. – 2013. – № 2. – S. 323-359.
11. Mankiw N. G. The Savers-Spenders Theory of Fiscal Policy // American Economic Review. – 2000. – № 90(2). – P. 120–125.
12. Marto R. Assessing the Impacts of Non-Ricardian Households in an Estimated New Keynesian DSGE Model // Swiss Journal of Economics and Statistics. – 2014. – №150 – P. 353-398.
13. Gali J., Lopez-Salido J. D., Valles J. Rule-of-Thumb Consumers and the Design of Interest Rate Rules. Journal of Money, Credit and Banking. – 2004. – №36. – P. 739-763.
14. Gali J., Lopez-Salido J. D., Valles J. Understanding the Effects of Government Spending on Consumption. Journal of the European Economic Association. – 2007. – № 5. – P. 227-270.
15. Dzyuba Yu. A. Analiz dinamiki klyuchevyh makroekonomicheskikh pokazatelej v usloviyah padeniya cen na nefi i sankcij // Interekspo GEO-Sibir' - "Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Ekonomika. Geoekologiya": Materialy XVI mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (g. Novosibirsk, 20-24 aprelya 2020 g.). – 2020. – S. 781-794.

© Ю. А. Дзюба, Д. В. Колюжнов, 2021

РОЛЬ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА В ФОРМИРОВАНИИ ДОХОДОВ КОНСОЛИДИРОВАННОГО БЮДЖЕТА РЕГИОНОВ РОССИИ

Дарья Дмитриевна Дочкина

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, лаборант, e-mail: Darya.Dochkina@yandex.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, студент

В статье описана история развития Общероссийского классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД), также в динамике рассмотрены поступления налогов от нефтегазового комплекса в консолидированный бюджет России. Проведён анализ поступлений в консолидированный бюджет в разрезе видов экономической деятельности на 2019 г. Описаны поступления от нефтегазового комплекса в консолидированный бюджет в разрезе налогов по уровням: федеральные, региональные, местные.

Ключевые слова: ОКВЭД, консолидированный бюджет, нефтегазовый комплекс, налоговые поступления

FIRST APPLICATION OF SANMCS TECHNOLOGY TO MARINE SEISMICS

Darya D. Dochkina

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., Laboratory Assistant, e-mail: Darya.Dochkina@yandex.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, student

The article describes the history of the development of the All-Russian classifier of economic activities (OKVED), as well as the dynamics of tax revenues from the oil and gas complex in the consolidated budget of Russia. The analysis of revenues to the consolidated budget in the context of economic activities for 2019 is carried out. The article describes the income from the oil and gas complex to the consolidated budget in the context of taxes at the following levels: federal, regional, and local.

Keywords: OKVED, consolidated budget, oil and gas complex, tax revenues

История развития ОКВЭД

С 1976 года на территории СССР действовал Общесоюзный классификатор отраслей народного хозяйства – ОКОНХ.

Постановлением от 6 ноября 2001 года N 454-ст ОКОНХ был отменён и принят Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД), построенный на основе гармонизации со Статистической классификацией видов экономической деятельности Европейского экономического союза (КДЕС/НАСЕ). ОКВЭД 029-2001 (КДЕС Ред. 1) с датой введения в действия с 1 января 2003 года [1].

Затем, приказом от 22 ноября 2007 г. N 329-ст были приняты изменения в ОКВЭД 029-2001 (КДЕС Ред. 1) и в соответствии с этими изменениями был при-

нят ОК 029-2007 (КДЕС Ред. 1.1) с датой введения в действие 1 января 2008 г. Приказом от 31 января 2014 г. N 14-ст о принятии и введении в действие общероссийского классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД2) ОК 029-2014 (КДЕС РЕД. 2) и общероссийского классификатора продукции по видам экономической деятельности (ОКПД2) ОК 034-2014 (КПЕС 2008) было постановлено принять ОКВЭД2 ОК 029-2014 (КДЕС Ред. 2) и ОКПД2 ОК 034-2014 (КПЕС 2008) с датой введения в действие 1 февраля 2014 года с правом досрочного применения в правоотношениях, возникших с 1 января 2014 года, с установлением переходного периода до 1 января 2017 года и последующей отменой (ОКВЭД) ОК 029-2001 (КДЕС Ред. 1), (ОКВЭД) ОК 029-2007 (КДЕС Ред. 1.1), (ОКДП) ОК 004-93, (ОКПД) ОК 034-2007 (КПЕС 2002), (ОКУН) ОК 002-93 и (ОКП) ОК 005-93 [2].

Изменения коснулись следующих видов деятельности:

- Предоставление услуг в области растениеводства;
- Производство готовых текстильных изделий, кроме одежды;
- Производство прочих текстильных изделий, не включенных в другие группировки;
- Производство одежды, кроме одежды из меха;
- Производство одежды из кожи; 6. Производство спецодежды;
- Производство нательного белья;
- Производство прочей одежды и аксессуаров одежды;
- Производство меховых изделий;
- Производство вязаных и трикотажных чулочно-носочных изделий и др.

Далее, в 2015 году было внесено ещё два изменения:

Приказом от 26 мая 2015 года №423-ст «О принятии и введении в действие Изменения 1/2015 ОКВЭД2» было принято изменение 1/2015 ОКВЭД2 к Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности ОК 029-2014 (КДЕС Ред. 2) с датой введения в действие 1 августа 2015 года с правом досрочного применения в правоотношениях, возникших с 6 апреля 2015 года [3].

Приказом от 17 августа 2015 года №1165-ст «О принятии и введении в действие изменения 2/2015 ОКВЭД2» было принято изменение 2/2015 к Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности ОК 029-2014 (КДЕС Ред. 2) с датой введения в действие 1 ноября 2015 года с правом досрочного применения в правоотношениях, возникших с 1 января 2014 года.

ОКВЭД2 ОК 029-2014 (КДЕС Ред. 2) действителен на данный момент.

ОКВЭД представляет собой один из наиболее значимых для государственной статистики общероссийских классификаторов и является необходимым инструментом систематизации экономическо-статистических данных. Предназначен для описания структуры российской экономики в условиях рыночных отношений и применяется практически во всех сферах управления экономикой. ОКВЭД необходим для классификации экономической деятельности, и используется государством для контроля над налоговой системой. В интересующей нас сфере была изучена налоговая статистика по нефтегазовому комплексу.

Рассматриваемым направлениям соответствуют следующие коды по ОКВЭД:

- Добыча сырой нефти и нефтяного (попутного) газа – **06.10**
- Добыча природного газа и газового конденсата – **06.20**
- Предоставление услуг в области добычи нефти и природного газа – **09.10**
- Производство нефтепродуктов – **19.20**
- Деятельность трубопроводного транспорта – **49.50** [4]

Консолидированный бюджет РФ включает в себя бюджеты различных уровней (федеральный, региональный, местный) и внебюджетные фонды (фонд социального страхования, Пенсионный фонд РФ, фонд инвестирования жилищного строительства, фонд обязательного медицинского страхования, российский фонд технологического развития). Поступления в бюджеты всех уровней регулируются Бюджетным кодексом Российской Федерации от 31.07.1998 №145-ФЗ (ред. от 08.06.2020) с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.07.2020 [5].

Бюджетный кодекс РФ является инструментом организации и регулирования бюджетной системы РФ. Доходы бюджета составляют налоговые, неналоговые и безвозмездные поступления (Таблица 1).

Таблица 1

Поступление налогов, сборов и страховых взносов в бюджетную систему России от нефтегазового комплекса в 2019 г., млрд руб.

Вид деятельности	Консолидированный бюджет	в том числе налоги и сборы				Внебюджетные фонды
		федеральные	региональные	местные	специальные налоговые режимы	
Добыча сырой нефти и природного газа	6 983	6 878	106	2	7	113
Добыча сырой нефти и нефтяного (попутного) газа	6 064	5 960	98	1	7	86
Добыча природного газа и газового конденсата	918	918	8	0	0	27
Предоставление услуг в области добычи нефти и природного газа	200	193	5	0	0	80
Производство нефтепродуктов	550	542	16	1	0	31
Деятельность трубопроводного транспорта	171	125	49	0	0	64
Всего по НГК	7 903	7 738	176	3	7	288
Всего по России	22 511	20 338	1 096	263	814	7 036
<i>Доля НГК в России</i>	<i>35%</i>	<i>38%</i>	<i>16%</i>	<i>1%</i>	<i>1%</i>	<i>4%</i>

Налоговые и неналоговые доходы имеют различие в способе правового регулирования. За регулирование налоговых доходов отвечает налоговое законодательство, а неналоговые доходы регулируются различными правовыми актами. Также, неналоговые доходы могут носить как добровольный, так и принудительный характер, в то время как налоговые доходы всегда имеют обязательный характер. Большую часть неналоговых доходов занимают доходы от внешнеэкономической деятельности, в частности вывозные таможенные пошлины, таможенные сборы, а также штрафы, санкции и возмещение ущерба.

Безвозмездные поступления также являются одним из источников формирования бюджета. Они включают в себя различные субсидии, дотации, субвенции, а также безвозмездные поступления от физических и юридических лиц, международных организаций и правительств иностранных государств [6].

Общая тенденция

В 2019 году поступления налогов от нефтегазового комплекса в консолидированный бюджет РФ составили 7 924 млрд руб. За период с 2010 по 2015 г. наблюдается равномерный рост поступлений налогов, в 2016 г. количество поступлений находится примерно на том же уровне, что и в 2015 г. Также, за рассматриваемый период с 2010 по 2019 год максимальное количество поступлений приходится на 2018 г. и составляет 8 182 млрд рублей. Это можно назвать всплеском за рассматриваемый период, так как количество поступлений относительно предыдущего года увеличилось почти на 3 млрд руб., тогда как за остальные годы изменения поступлений колебались в пределах 1 млрд руб.

Относительно общего количества налоговых поступлений в консолидированный бюджет налоговые поступления от нефтегазового комплекса в среднем составляют 32 %. В период с 2010 г. по 2017 г. значение доли нефтегазового комплекса от общих поступлений в консолидированный бюджет РФ остаётся практически неизменным. За рассматриваемый период в 2018 году наблюдается наибольший вклад поступлений от нефтегазового комплекса в консолидированный бюджет РФ – 39 % [7].

Налоговые поступления от нефтегазового комплекса в консолидированный бюджет в разрезе видов экономической деятельности

Основной вклад в поступления в консолидированный бюджет внесли доходы от добычи сырой нефти и природного газа, что в 2019 году составило 6 992 млрд руб. или 88,2 %. Причём добыча сырой нефти и нефтяного газа составила 6 066 млрд руб. или 76,5 %, а добыча природного газа – 926 млрд руб. или 11,7 %. Незначительный вклад внесли доходы от предоставления услуг в области добычи нефти и природного газа – 198 млрд руб. или 2,5 %, и от деятельности трубопроводного транспорта – 174 млрд руб. или 2,2 %. Поступления налогов от производства нефтепродуктов составили 560 млрд руб. или 7,1 % от поступлений нефтегазового комплекса.

Добыча сырой нефти и природного газа.

За рассматриваемый период с 2010 г. по 2019 г. доля налоговых поступлений от добычи сырой нефти и природного газа от общих поступлений нефтегазового комплекса постепенно возрастала, с незначительным сокращением в 2011 г. до 70 %, в 2016 г. – до 76 % и в 2019 г. – до 88 %. Максимальный вклад налоговых поступлений с добычи нефти и газа приходится на 2018 год и составляет 90 % [8].

Предоставление услуг в области добычи нефти и природного газа

С 2010 г. по 2019 г. вклад налоговых поступлений от предоставления услуг в области добычи нефти и природного газа в консолидированный бюджет достигал своего максимума в 2014 году и составил 583 млрд руб. или 14 %. В 2017 году произошёл резкий спад: если в 2016 г. налоговые поступления от предоставления услуг в области добычи нефти и газа составляли 484 млрд руб. или 12 %, то в 2017 г. значение резко сократилось до 130 млрд руб., что составило 2 % от общих поступлений от НГК. Следующие два года значение налоговых поступлений от предоставления услуг в области добычи нефти и газа растёт, но незначительно: в 2018 г. налоговые поступления от этой отрасли составляют 147 млрд руб., в 2019 г. – 198 млрд руб. В относительных показателях по сравнению с 2017 г. значительных изменений не произошло – в 2018 г. 2%, в 2019 г. – 3% [6].

Производство нефтепродуктов

Поступления налогов, сборов и страховых взносов в консолидированный бюджет РФ от производства нефтепродуктов равномерно возрастали с 2010 г. по 2013 г. В 2010 г. от производства нефтепродуктов в консолидированный бюджет поступило 196 млрд руб., что в относительных показателях составило 10 %. В 2015 г. доля налоговых поступлений от производства нефтепродуктов в общих поступлениях от НГК достигла своего минимума и составила 5 %. В 2016 г. наблюдается резкий скачок – значение налоговых поступлений возросло с 237 млрд руб. до 426 млрд руб., что составило 10 % от общих поступлений от НГК. Своего максимума налоговые поступления от производства нефтепродуктов достигают в 2019 г. и составляют 560 млрд руб., а в относительных показателях – 7 % от общих поступлений от НГК. Также, с 2011 г. по 2013 г. доля налоговых поступлений от производства нефтепродуктов в общих поступлениях от НГК является максимальной за период с 2010 г. по 2019 г. и составляет 11 % на протяжении этих трёх лет.

Деятельность трубопроводного транспорта

Налоговые поступления от деятельности трубопроводного транспорта в консолидированный бюджет РФ неравномерны. В 2013 г. налоговые поступления от трубопроводного транспорта достигают своего минимума, что составляет 34 млрд руб., а в относительных показателях – 1 % от общих поступлений от НГК. С 2015

г. наблюдается равномерный рост, и в 2019 г. налоговые поступления от НГК достигают своего максимального значения – 174 млрд руб. или 2 % [3-5].

В относительных показателях своего максимального значения налоговые поступления от деятельности трубопроводного транспорта достигают в 2011 г. – 4 %.

Налоговые поступления от нефтегазового комплекса в разрезе налогов по уровню

В налоговой структуре основную часть поступлений от нефтегазового комплекса в консолидированный бюджет в 2019 году составляют федеральные налоги и сборы – 7 738 млрд руб. или 97,7 %. Региональные налоги и сборы составляют 176 млрд руб. или около 2 %, а местные представляют незначительный вклад в консолидированный бюджет – 3 млрд. рублей или 0.04 %. На протяжении всего периода, с 2010 г. по 2019 г. основной вклад в консолидированный бюджет вносили федеральные налоги и сборы, в среднем уровень поддерживался около 96 %.

В структуре федеральных налогов и сборов поступления от добычи сырой нефти, и попутного газа в 2019 году составили 6 878 млрд руб., что является значительной долей поступлений от всего нефтегазового комплекса – 88,9 %, а в структуре региональных налогов и сборов налоговые поступления от добычи сырой нефти и газа составили 106 млрд руб. или 60,1 % от общих поступлений НГК [2].

Поступления от деятельности трубопроводного транспорта в структуре федеральных налогов и сборов составили 125 млрд руб. или 1,6 %, в структуре региональных налогов и сборов – 49 млрд руб. или 27,8 %, в структуре местных налогов и сборов – 418 291 тыс. руб. или 12 %.

Поступления от предоставления услуг в области добычи нефти и природного газа составляют 193 млрд руб. или 2,5 % в структуре федеральных налогов и сборов, 5 млрд руб. или 2,7 % в структуре региональных налогов и сборов, и 136 849 тыс. руб. или 3,9 % в структуре местных налогов и сборов.

В структуре налогов и сборов местного уровня, налоговые сборы от добычи сырой нефти и газа в 2019 г. составили 46,7 %, а поступления от производства нефтепродуктов, которые в структуре федеральных сборов составляют 7 %, а в структуре региональных – 9,4 %, в структуре налогов и сборов местного уровня имеют значительную долю – 37,5 % [3] (Таблица 2).

Таблица 2

Структура налоговых отчислений

Вид деятельности	федеральные	региональные	местные
Добыча сырой нефти и природного газа	88.9%	60.1%	46.7%
Добыча сырой нефти и нефтяного (попутного) газа	77.0%	55.6%	42.7%
Добыча природного газа и газового конденсата	11.9%	4.5%	3.9%
Предоставление услуг в области добычи нефти и природного газа	2.5%	2.7%	3.9%
Производство нефтепродуктов	7.0%	9.4%	37.4%
Деятельность трубопроводного транспорта	1.6%	27.8%	12.0%
Всего по НГК	100%	100%	100%

С 2010 г. до 2012 г. (включительно) вклад федеральных налоговых поступлений в консолидированный бюджет растёт, затем начинает уменьшаться и в 2015 г. достигает своего минимума – 93,4 %. Затем, до 2019 года включительно доля федеральных налоговых поступлений в консолидированном бюджете увеличивается и в 2019 году достигает своего максимума – 97,7 % [5].

Доля региональных и местных налоговых поступлений наоборот, достигала своего максимума в 2010 году: доля региональных составила 3,9 %, а местных 0,2 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ – 2571.2020.6 и базового проекта НИР лаборатории 349 ИНГГ СО РАН № 0331-2019-0028.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ОК 029-2997 (КДЕС Ред. 1.1) Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД) (с Изменениями N 1/2007, 1/2010, 2/2011, 3/2011, 4/2012).

2. Приказ о принятии и введении в действие изменения 1/2007 ОКВЭД к Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности ОК 029-2001 (КДЕС РЕД. 1), Общероссийского классификатора видов экономической деятельности ОК 029-2007 (КДЕС РЕД. 1.1) и Общероссийского классификатора продукции по видам экономической деятельности ОК 034-2007 (КПЕС 2002) [Текст]: Приказ Ростехрегулирования от 22 ноября 2007 г. N 329-ст // СПС «Консультант Плюс».

3. О принятии и введении в действие ОКВЭД (вместе с "ОК 029-2001 (КДЕС Ред. 1). Общероссийский классификатор видов экономической деятельности [Текст]: Постановление Госстандарта России от 06.11.2001 N 454-ст (ред. от 10.11.2015) // СПС «Консультант Плюс».

4. О принятии и введении в действие Общероссийского классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД2) ОК 029-2014 (КДЕС Ред. 2) и Общероссийского классификатора продукции по видам экономической деятельности (ОКПД2) ОК 034-2014 (КПЕС 2008) [Текст]: Приказ Росстандарта от 31.01.2014 N 14-ст (ред. от 16.10.2018) // СПС «Консультант Плюс».

5. О принятии и введении в действие Изменения 1/2015 ОКВЭД2 к Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности ОК 029-2014 (КДЕС Ред. 2) [Текст]: Приказ Росстандарта от 26.05.2015 N 423-ст // СПС «Консультант Плюс».

6. О принятии и введении в действие Изменения 2/2015 ОКВЭД2 к Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности ОК 029-2014 (КДЕС Ред. 2)» [Текст]: Приказ Росстандарта от 17.08.2015 N 1165-ст // СПС «Консультант Плюс».

7. Зимин В. А. Внебюджетные фонды: их образование, финансирование и использование / Научно-технический центр, Самара. – 2016. – 184 с.

8. Филимонова И.В., Проворная И.В., Комарова А.В., Земнухова Е.А. Устойчивые тенденции изменения региональной структуры добычи нефти в России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2019. – Т. 14. – № 3. – С. 4.

REFERENCES

1. ОК 029-2997 (KDES Red. 1.1) Obshcherossiyskiy klassifikator vidov ekonomicheskoy deyatel'nosti (OKVED) (s Izmeneniyami N 1/2007, 1/2010, 2/2011, 3/2011, 4/2012).

2. Prikaz o prinyatii i vvedenii v deystviye izmeneniya 1/2007 OKVED k Obshcherossiyskomu klassifikatoru vidov ekonomicheskoy deyatel'nosti ОК 029-2001 (KDES RED. 1), Obshcherossiyskogo klassifikatora vidov ekonomicheskoy deyatel'nosti ОК 029-2007 (KDES RED.

1.1) i Obshcherossiyskogo klassifikatora produktsii po vidam ekonomicheskoy deyatel'nosti OK 034-2007 (KPES 2002) [Tekst]: Prikaz Rostekhregulirovaniya ot 22 noyabrya 2007 g. N 329-st // SPS «Konsul'tant Plyus».

3. O prinyatii i vvedenii v deystviye OKVED (vmeste s "OK 029-2001 (KDES Red. 1). Obshcherossiyskiy klassifikator vidov ekonomicheskoy deyatel'nosti [Tekst]: Postanovleniye Gosstandarta Rossii ot 06.11.2001 N 454-st (red. ot 10.11.2015) // SPS «Konsul'tant Plyus».

4. O prinyatii i vvedenii v deystviye Obshcherossiyskogo klassifikatora vidov ekonomicheskoy deyatel'nosti (OKVED2) OK 029-2014 (KDES Red. 2) i Obshcherossiyskogo klassifikatora produktsii po vidam ekonomicheskoy deyatel'nosti (OKPD2) OK 034-2014 (KPES 2008) [Tekst]: Prikaz Rosstandarta ot 31.01.2014 N 14-st (red. ot 16.10.2018) // SPS «Konsul'tant Plyus».

5. O prinyatii i vvedenii v deystviye Izmeneniya 1/2015 OKVED2 k Obshcherossiyskomu klassifikatoru vidov ekonomicheskoy deyatel'nosti OK 029-2014 (KDES Red. 2) [Tekst]: Prikaz Rosstandarta ot 26.05.2015 N 423-st // SPS «Konsul'tant Plyus».

6. O prinyatii i vvedenii v deystviye Izmeneniya 2/2015 OKVED2 k Obshcherossiyskomu klassifikatoru vidov ekonomicheskoy deyatel'nosti OK 029-2014 (KDES Red. 2)» [Tekst]: Prikaz Rosstandarta ot 17.08.2015 N 1165-st // SPS «Konsul'tant Plyus».

7. Zimin V. A. Vnebyudzhetye fondy: ikh obrazovaniye, finansirovaniye i ispol'zovaniye / Nauchno-tekhnicheskiiy tsentr, Samara. – 2016. – 184 s.

8. Filimonova I.V., Provornaya I.V., Komarova A.V., Zemnukhova Ye.A. Ustoychivyye tendentsii izmeneniya regional'noy struktury dobychi nefi v Rossii // Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika. – 2019. – T. 14. – № 3. – S. 4.

© Д. Д. Дочкина, 2021

ОБЩЕОТРАСЛЕВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПЕРЕРАБОТКИ ГАЗА В РОССИИ

Екатерина Андреевна Земнухова

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

Александр Михайлович Маканин

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, e-mail: makanin.al@gmail.com

В статье рассмотрены основные тенденции развития современной газовой переработки, проанализированы динамика и региональная структура переработки газа в России. Авторами сформулированы актуальные проблемы переработки газа и определены основные перспективные направления развития газовой перерабатывающей отрасли в России. Значимым барьером является отсутствие новых технологических решений по переработки и утилизации всех компонентов, добываемых с газом на Севере Западной Сибири. Приоритетные направления развития переработки газа связаны со строительством новых газоперерабатывающих и газохимических мощностей, необходимых для квалифицированного и эффективного использования газовых попутных компонентов.

Ключевые слова: газовый комплекс, газопереработка, природный газ, попутный нефтяной газ

GENERAL TRENDS IN GAS PROCESSING IN RUSSIA

Ekaterina A. Zemnukhova

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

Alexander M. Makanin

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, student, e-mail: makanin.al@gmail.com

The article discusses the main trends in the development of modern gas processing, analyzes the dynamics and regional structure of gas processing in Russia. The authors formulated the urgent problems of gas processing and identified the main promising directions for the development of the gas processing industry in Russia. A significant barrier is the lack of new technological solutions for the processing and utilization of all components produced with gas in the North of Western Siberia. Priority directions for the development of gas processing are associated with the construction of new gas processing and gas chemical facilities required for the qualified and efficient use of associated gas components.

Keywords: gas complex, gas processing, natural gas, associated petroleum gas

Значимым направлением повышения эффективности развития газового комплекса России является развитие газоперерабатывающей и газохимической промышленности. Стремительный рост добычи высоко конденсатного газа (содержащего, кроме метана, в большом количестве этановую, пропановую, бутановую фракции) на севере Западной Сибири, а в перспективе и в восточных регионах России требует развития новых мощностей по газопереработке, эффективной утилизации и переработки всех попутных компонентов, содержащихся в добытом газе.

Под переработкой природного и попутного нефтяного газа понимается совокупность технологических процессов физического, физико-химического и химического преобразования природного газа и всех компонентов попутного нефтяного газа в продукты переработки.

Основными видами продукции ГПЗ и ГПП Российской Федерации являются природный газ, подаваемый в газотранспортную систему, сжиженные углеводородные газы (СУГ), широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ), этановая фракция, сухой газ, сера, стабильный конденсат, продукты его переработки и др.

В настоящее время в России функционируют 14 крупных ГПЗ и ГПП с объёмами переработки более 1 млрд куб. м в год, которые обеспечивают до 92 % всего объема переработки, а также значительное количество малых ГПЗ [1].

В 2019 г. объем переработки газа в России составил 81,3 млрд куб. м, на 1,3 млрд куб. м превысив уровень 2018 г., и достигнув максимального значения за рассматриваемый период.

За период с 2012 по 2018 г. объем переработки газа в России увеличился на 13 %, с 70,7 до 80 млрд куб. м, при этом с каждым годом прирост переработки газа увеличивался (рис. 1).

Данные официальной статистики не учитывают объемы переработки «жирного» газа на севере Западной Сибири, где функционируют установки комплексной подготовки газа в составе промысла, которые частично берут на себя функцию первичного разделения добываемой газовой смеси. После этого нестабильный и стабильный газовый конденсат перерабатывается на соответствующих предприятиях Западной Сибири [2].

Переработка газа в Западной Сибири

До недавнего времени на газовых месторождениях Сибири разрабатывался преимущественно сухой газ сеноманских отложений, характеризующийся преобладанием в его составе метана, сравнительно невысоким содержанием этана и низким содержанием тяжелых углеводородов. С ростом вовлечения в разработку Валанжинских и Ачимовских залежей состав и структура газа меняется, в процессе добычи газа появляются попутные компоненты – углеводородные газы (этан, пропан, бутан и др.), а также конденсат, при этом добыча такого «жирного» газа составляет не менее 100 млрд куб. м в год [3].

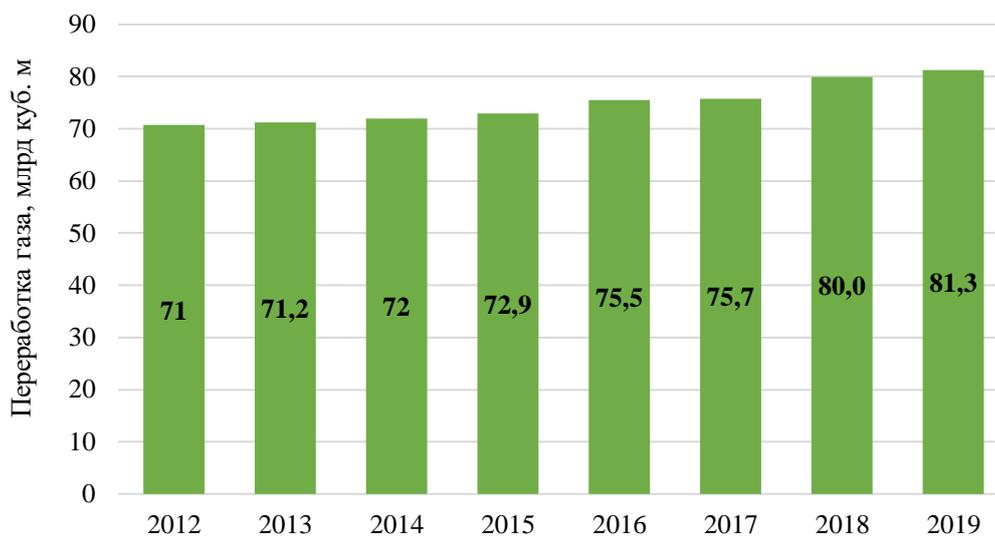


Рис. 1. Прирост переработки газа в России

Для подготовки такого газа к транспортировке необходимо выделять и перерабатывать все попутные компоненты, и для этого на территории Западной Сибири функционирует несколько предприятий, которые определяют газоперерабатывающий комплекс Сибири, объединенный конденсатопроводом Уренгой-Сургут протяженностью порядка 700 км.

Добытый на промысле газ поставляется на УКПГ (установку комплексной подготовки газа, которая функционирует в рамках промысла), где кроме стандартных осушки и очистки от метановой фракции отделяются все попутные компоненты. Смесь выделенных попутных компонентов направляется на Уренгойский завод по подготовке конденсата к транспорту, на котором происходит выделение этана и его обратное закачивание в поставляемый для энергетических нужд сухой газ. Проектная производительность завода составляет 13,7 млн т нестабильного газового конденсата в год. Продукцией завода является деэтанализированный газовый конденсат, направляемый для дальнейшей переработки на Сургутский завод стабилизации конденсата; дизельное топливо; стабильный газовый конденсат; сжиженный газ; широкая фракция легких углеводородов; дистиллят газового конденсата легкий; сухой газ (газ деэтанализации), авиационный керосин марки ТС-1.

Проектная производительность Сургутского завода стабилизации конденсата – 8 млн т. нефтегазоконденсатной смеси в год. В четвертом квартале 2014 года были введены в эксплуатацию две технологические нитки по стабилизации конденсата, что увеличило производительность завода по сырью до 12 млн т в год, при этом его мощность по первичной переработке стабильного конденсата – 4 млн т в год. В 2013 г. введена в эксплуатацию установка утилизации низконапорных сбросных газов, которая позволила нарастить выпуск сжиженных углеводородных газов [4].

На Сургутском заводе происходит выделение газового конденсата, пропан-бутановой фракции, а также производится набор продуктов газовой переработки и газохимии. Продукцией завода является стабильный газовый конденсат, дистиллят газового конденсата легкий, автомобильный бензин, дизельное топливо, широкая фракция легких углеводородов, сжиженный газ, пентан-гексановая фракция, углеводородная фракция, топливо для реактивных двигателей ТС-1. Пропан-бутановая фракция поступает на «СИБУР Тобольск» (ранее «Тобольск-Нефтехим» (Тобольский нефтехимический комбинат)), где производится широкая линейка нефтегазоперерабатывающей и нефтегазохимической продукции. Мощность «СИБУР Тобольск» по приему в переработку ШФЛУ – 6,6 млн т в год.

Общепромышленные тенденции переработки газа: структура переработки

В 2019 г. газоперерабатывающие компании России переработали 54,7 млрд куб. м природного газа и 26,6 млрд куб. м попутного нефтяного газа, таким образом, доля ПНГ в переработке газа составила около 33 %. Прирост переработки газа на 1,3 млрд куб. м был обеспечен увеличением переработки природного газа (+2,2 млрд куб. м), при этом объем переработки попутного нефтяного газа уменьшился на 0,8 млрд куб. м.

За период с 2012 по 2015 г. структура переработки газа менялась незначительно, но в последние четыре года наблюдается тенденция уменьшения доли попутного нефтяного газа с 46,4 % в 2016 г. до 32,7 % в 2019 г. [5]

Анализ динамики приростов переработки газа показывает, что до 2016 г. положительный прирост переработки обеспечивал по большей части только природный газ. В то же время объем переработки попутного нефтяного газа в каждый год сокращался (рис. 2).

Лидерами являются:

- по переработке природного газа – «Газпром» (около 81 % от переработки природного газа в РФ);
- по переработке ПНГ – «СИБУР Холдинг» (85 % от переработки ПНГ в РФ).

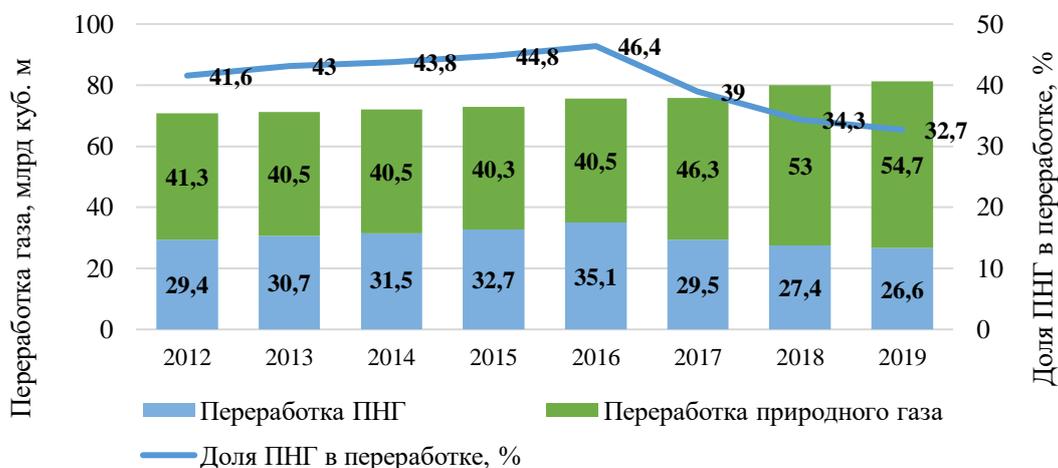


Рис. 2 Структура переработки газа в России

Региональная структура переработки газа

В региональной структуре переработки газа за 2019 г. представлены все федеральные округа России, при этом наибольшая часть переработки приходится на крупнейшие по добыче газа ФО: Приволжский (34,6 %) и Уральский (39 %) [6].

В 2019 г. в Приволжском ФО было переработано около 28,1 млрд куб. м газа. Здесь расположено 12 ГПЗ и ГПП. Оренбургский ГПЗ является крупнейшим заводом в Приволжском федеральном округе, однако в последние шесть лет (за исключением 2018 и 2019 гг.) объем переработки газа на данном ГПЗ незначительно сокращался каждый год с 25,8 млрд куб. м в 2012 г. до 23,9 млрд куб. м в 2017 г. В 2019 г. величина переработки газа составила 24,12 млрд куб. м. В то же время доля ПФО в структуре переработки газа сократилась с 42,7 % в 2012 г. до 34,6 % в 2019 г. (Рис. 3)

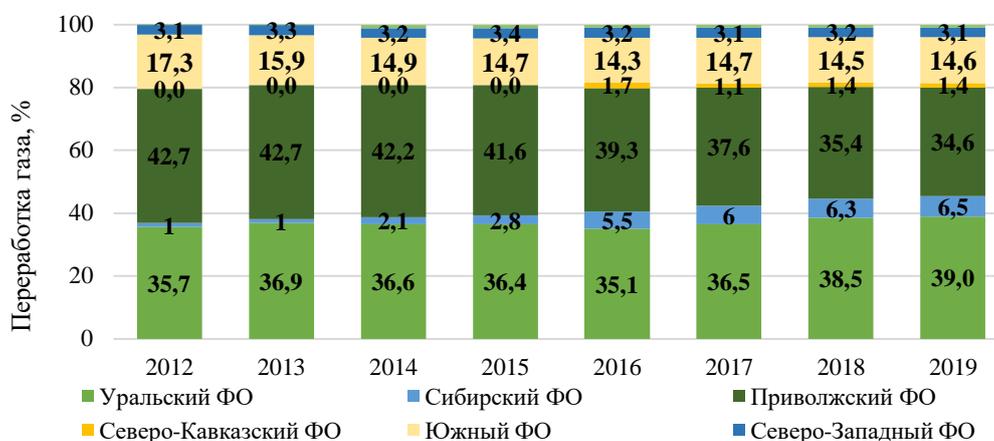


Рис. 3. Динамика прироста переработки газа по федеральным округам

Объем переработки газа в Уральском федеральном округе в 2019 г. составил 31,7 млрд куб. м. В УФО представлено 10 газоперерабатывающих заводов, большая часть которых расположена в Ханты-Мансийском автономном округе (Сургутский УПП, Нижневартовский ГПК, Белозерный ГПК и т.д.). Доля Уральского федерального округа в региональной структуре в период 2012–2017 гг. существенно не менялась, составляя в среднем 36,2 %, в 2018 г. поднялась до 38,5 %, а в 2019 – до 39 %.

Третьим крупнейшим по объему переработки газа является Южный федеральный округ (11,9 млрд куб. м, 14,6 %). Астраханский ГПЗ обеспечивает около 97 % объема переработки газа в ЮФО (11,5 млрд куб. м). С 2014 по 2019 г. доля Южного федерального округа в общероссийском объеме переработки незначительно колебалась вокруг среднего значения – 14,6 %.

Остальные регионы занимают 12 % в структуре переработки газа: доли всех федеральных округов значительно не менялись, за исключением СФО, который с 2012 г. показывает постоянный рост в региональной структуре переработки (с

1,2 до 6,5 %) за счет роста объема переработки на «Востокгазпроме», основанном на повышении добычи газа на близлежащих месторождениях.

Заключение

Перспективы развития переработки природного и попутного газа базируются на повышении степени извлечения ценных компонентов, содержащихся в природном газе, что в свою очередь будет способствовать развитию действующих и созданию новых газохимических производств, а также увеличению добычи попутного нефтяного газа и обязательному повышению доли его полезного использования нефтегазовыми компаниями.

Однако существующие технологические цепочки не в полной мере решают проблему эффективной переработки и утилизации всех компонентов на Севере Западной Сибири, прежде всего в области утилизации этановой фракции, которая после выделения закачивается в метановый газ и сжигается в энергетике.

Приоритетные направления развития переработки газа в России связаны со строительством новых газоперерабатывающих и газохимических мощностей, необходимых для квалифицированного и эффективного использования всех попутных компонентов, добываемых с газом, в том числе:

- формирование на севере Западной Сибири газоперерабатывающих и газохимических мощностей на новой технологической основе с целью переработки газового сырья валанжинских и ачимовских залежей месторождений Надым-Пур-Тазовского региона и п-ова Ямал с организацией выпуска продукции «высоких переделов»;

- завершение строительства на Дальнем Востоке крупнейшего газоперерабатывающего и газохимического комплекса по переработке газа Чаяндинского и Ковыктинского месторождений с организацией производства по выделению, хранению и транспортировке гелия как стратегического сырья для развития высокотехнологических производств;

- расширение географии строительства крупных и малотоннажных заводов по производству сжиженного природного газа (СПГ) с учётом планирования инфраструктуры и объектов для транспортировки (парк цистерн, терминалы, автомобильные дороги и трубопроводы-отводы).

Исследование выполнено при финансировании РФФИ в рамках научного проекта №20-310-90059 и базового проекта НИР лаборатории 1105 ИНГГ СО РАН № 0266-2019-0008.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филимонова И.В., Моисеев С.А., Немов В.Ю., Гордеева А.О. Современное состояние и перспективы развития нефтегазового комплекса республики Саха (Якутии) // Маркшейдерия и недропользование. – 2020. – № 2 (106). – С. 3-10.

2. Филимонова И.В., Проворная И.В., Комарова А.В., Земнухова Е.А. Устойчивые тенденции изменения региональной структуры добычи нефти в России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2019. – Т. 14. – № 3. – С. 4.

3. Проворная И.В., Филимонова И.В., Комарова А.В., Земнухова Е.А. Закономерности развития нефтегазовых ресурсных регионов России с учетом транспортной обеспеченности (окончание) // Экологический вестник России. – 2020. – № 2. – С. 20-24.

4. Филимонова И.В., Шумилова С.И., Дзюба Ю.А. Комплексный анализ и прогноз недропользования в регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока // Экологический вестник России. – 2019. – № 10. – С. 20-27.

5. Филимонова И.В., Немов В.Ю., Мишенин М.В., Проворная И.В. Нефтяная промышленность России: региональная и организационная структура добычи, переработки и экспорта // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2020. – № 4-5 (173). – С. 53-63.

6. Филимонова И.В., Комарова А.В., Мишенин М.В., Земнухова Е.А. Роль трудноизвлекаемых запасов нефти в воспроизводстве сырьевой базы и устойчивом развитии нефтегазового комплекса России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2020. – № 6 (174). – С. 12-20.

REFERENCES

1. Filimonova I.V., Moiseyev S.A., Nemov V.YU., Gordeyeva A.O. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa respubliky Sakha (Yakutii) // Marksheyderiya i nedropol'zovaniye. – 2020. – № 2 (106). – S. 3-10.

2. Filimonova I.V., Provornaya I.V., Komarova A.V., Zemnukhova Ye.A. Ustoychivyye tendentsii izmeneniya regional'noy struktury dobychi nefiti v Rossii // Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika. – 2019. – Т. 14. – № 3. – S. 4.

3. Provornaya I.V., Filimonova I.V., Komarova A.V., Zemnukhova Ye.A. Zakonomernosti razvitiya neftegazovykh resursnykh regionov Rossii s uchetom transportnoy obespechennosti (okonchaniye) // Ekologicheskiy vestnik Rossii. – 2020. – № 2. – S. 20-24.

4. Filimonova I.V., Shumilova S.I., Dzyuba YU.A. Kompleksnyy analiz i prognoz nedropol'zovaniya v regionakh Vostochnoy Sibiri i Dal'nego Vostoka // Ekologicheskiy vestnik Rossii. – 2019. – № 10. – S. 20-27.

5. Filimonova I.V., Nemov V.YU., Mishenin M.V., Provornaya I.V. Neftyanaya promyshlennost' Rossii: regional'naya i organizatsionnaya struktura dobychi, pererabotki i eksporta // Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye. – 2020. – № 4-5 (173). – S. 53-63.

6. Filimonova I.V., Komarova A.V., Mishenin M.V., Zemnukhova Ye.A. Rol' trudnoizvlekayemykh zapasov nefiti v vosproizvodstve syr'yevooy bazy i ustoychivom razvitii neftegazovogo kompleksa Rossii // Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye. – 2020. – № 6 (174). – S. 12-20.

© Е. А. Земнухова, А. М. Маканин, 2021

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ РОЖДАЕМОСТИ В РОССИИ

Анастасия Викторовна Ивершинь

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, e-mail: a.ivershin@g.nsu.ru

Светлана Игоревна Кожевина

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, младший научный сотрудник, e-mail: svetlana.shumilova1410@gmail.com

В статье приведен алгоритм моделирования факторов рождаемости, которые являются дискретными переменными, на кросс-секционных данных по индивидам с учетом эндогенности. Описаны основные факторы, влияющие на вероятность рождения ребенка в течение года и количество имеющихся у женщины детей.

Ключевые слова: рождаемость, факторы рождаемости, демографическая политика

ANALYSIS OF FERTILITY FACTORS IN RUSSIA

Anastasiia V. Ivershin

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

Svetlana Ig. Kogevina

Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuka SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Prospect Akademika Koptyug 3, Junior Researcher, e-mail: svetlana.shumilova1410@gmail.com

The article presents an algorithm for modeling fertility factors, which are discrete variables, taking into account endogeneity. Cross-sectional data for individuals is used. The main factors influencing the probability of having a child within the next year and the number of children a woman has are described.

Keywords: fertility, fertility factors, demographic policy

Одним из главных приоритетов социально-экономического развития России является рост численности населения, что зафиксировано в ряде стратегических документов федерального уровня – Концепции демографической политики РФ до 2025 г., Национальном проекте «Демография» и ряде других. Вместе с тем, остается актуальным вопрос о том, какие меры по поддержанию численности населения в России являются наиболее эффективными, и какие направления демографической политики целесообразно скорректировать.

Особое место в поддержании и росте численности населения страны занимает показатель рождаемости – важнейший демографический фактор, влияющий на воспроизводство населения и как следствие на темпы экономического роста в

целом. В настоящее время, среднее количество детей у российских женщин (коэффициент рождаемости) составляет 1,78. Однако для обеспечения простого воспроизводства коренного населения России в 2020 г. коэффициент рождаемости должен был составить 2,1. Таким образом, уровень рождаемости в России находится на крайне низком уровне – существенно ниже достаточного даже для простого воспроизводства населения.

Исследование факторов, оказывающих влияние на уровень рождаемость в России, позволит определить ключевые факторы для построения новой демографической политики, направленной на более эффективное стимулирование рождаемости в России.

Для решения поставленной задачи были выбраны эконометрические методы, т.к. они позволяют выявить зависимости между факторами и целевой переменной – как направление, так и степень влияния факторов, а также статистически подтвердить гипотезы исследования.

В качестве зависимых переменных были приняты факт рождения ребенка в течение года и количество имеющихся детей. Для моделирования регрессионных уравнений используются кросс-секционные данные по индивидам за 2018 год. В качестве объектов исследования были отобраны женщины фертильного возраста (15-44 года согласно подходу ВОЗ). Количество наблюдений – 8329.

Ввиду того, что зависимые переменные являются дискретными, используются нелинейные регрессионные модели, которые оцениваются методом максимального правдоподобия. Для бинарных зависимых переменных используются линейные вероятностные модели, к которым относятся логит и пробит-регрессии. Целевая переменная количества детей принимает несколько значений, которые ранжируются между собой, поэтому использовались модели упорядоченного логита и пробита [1].

В качестве основного источника данных выступает база данных за 2018 год Российского мониторинга экономического положения и здоровья населения НИУ ВШЭ (RLMS HSE), проводимого Национальным исследовательским университетом "Высшая школа экономики" и ООО «Демоскоп» при участии Центра народонаселения Университета Северной Каролины в Чапел Хилле и Института социологии Федерального научно-исследовательского социологического центра РАН.

Для моделирования исследуемых зависимостей на основе анализа литературы и доступности данных были отобраны 50 факторов, которые по источникам влияния можно разделить на следующие группы: личностные, психологические, социально-экономические, жилищные условия, условия труда, региональные факторы.

При моделировании факта рождения ребенка и количества имеющихся детей присутствует проблема самоотбора – женщины делают сознательный выбор, поэтому отбор не является случайным. Наличие проблемы эндогенности связано с коррелированностью регрессоров и ошибки, поэтому оценки являются смещенными и несостоятельными [1]. При этом ряд факторов, влияющих на принятие этих решений остается не доступным для моделирования, например, ценности,

убеждения, воспитание и др. Поэтому для устранения проблемы эндогенности необходимо использовать инструментальные переменные (таблица).

Эндогенные переменные и используемые инструменты

Эндогенная переменная	Инструмент	Значения переменной
Наличие высшего образования	Количество студентов в регионе	Количество студентов на 1000 чел.
Характерна ли профессия респондента преимущественно для мужчин?	Соотношение полов	Количество женщин, приходящихся на 1 мужчину
Связана ли сфера работы респондента с общением с людьми?	Численность населения	Количество человек
Доход респондента за последние 30 дней (полном второй степени)	В течение последних 12 месяцев респонденту уменьшали зарплату или сокращали часы работы не по собственному желанию?	0 – нет 1 – да
	Средний уровень дохода на душу населения в регионе	Количество корзин минимальных потребительских наборов

Алгоритм получения итоговых вариантов моделей представлен на рисунке.



Алгоритм построения регрессионных моделей

Архитектурой финальной модели для зависимой переменной рождения ребенка является логистическая регрессия с 23 факторами. Итоговая модель для

количества детей – упорядоченный логит с 27 факторами. Рассмотрим интерпретацию результатов моделирования.

Наибольшее влияние на вероятность женщиной рождения ребенка в течение года оказывают личностные и социально-экономические факторы, а также условия труда.

Так, женщины, имеющие высшее образование, менее склонны к рождению детей. Женщины, имеющие больший доход, вероятно, больше заинтересованы в развитии карьеры, чем в рождении детей. Если женщину устраивает уровень оплаты труда, она с меньшей вероятностью родит ребенка. Кроме того, наличие страха потерять работу или существующий уровень дохода после декретного отпуска из-за потери квалификации негативно влияет на рождаемость. Рост безработицы в регионе является существенным препятствием при принятии решения о рождении ребенка.

Если профессия женщины предполагает необходимость применения физической силы и/или высокий уровень ответственности, т.е. относится к тем типам деятельности, в которых работают преимущественно мужчины, вероятность принятия решения о рождении ребенка уменьшается. Данный факт можно связать с рациональностью принимаемых решений, существующими у женщины ценностями и ее жизненным опытом.

На количество имеющихся у женщины детей влияют все группы факторов, в особенности – социально-экономические факторы и условия работы.

Тип места жительства влияет на решение о количестве детей: женщины, живущие в городах, более склонны не иметь детей вовсе по сравнению с женщинами из сел, поселков городского типа и т.д.

Женщины, имеющие работу, менее вероятно имеют большое число детей, при этом наибольшее число детей имеют домохозяйки – чем больше детей в семье, тем больше времени необходимо уделять их воспитанию, что для работающей женщины затруднительно.

Если работа женщины предполагает преимущественно взаимодействие с людьми, это снижает намерения рожать детей. Причиной данного факта выступает то, что женщины часто компенсируют большим социальным кругом общения потребность заботы и ухода за кем-либо, в частности, за детьми. Ребёнок в большей степени – это склонность к заботе и выражение материнского инстинкта, чем просто логический и рациональный поступок. А социальное общение означает коммуникабельность женщины, общительность, её чувствительность к чужим проблемам, что замещает потребность иметь детей.

Зависимость количества детей от уровня дохода является квадратичной – на количество детей в семье негативно влияют как чрезвычайно низкие, так и высокие значения уровня дохода женщины.

Семьи, не уверенные в своей будущей материальной стабильности, в том числе своих жилищных условий, менее склонны иметь большое количество детей.

Исследование выполнено в рамках проекта гранта Президента РФ № НШ-2571.2020.6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цыплаков А.А. Экскурс в мир инструментальных переменных // Квантиль. – №2. – 2007. – С. 21–47. URL: <https://www.hse.ru/mirror/pubs/share/444211757.pdf>.

REFERENCES

1. Syplakov A.A. Ekskurs v mir instrumental'nyh peremennyh // Kvantil'. – №2. – 2007. – S. 21–47. URL: <https://www.hse.ru/mirror/pubs/share/444211757.pdf>.

© А. В. Ивершинь, С. И. Кожевина, 2021

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Алексей Андреевич Карташевич

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1, Магистрант, тел. +79237188297, e-mail: Ka7lex@gmail.com

Василий Юрьевич Немов

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

В работе рассмотрена проблема интеграции корпоративной социальной деятельности добывающих компаний в регионы Крайнего Севера. Разработан инструмент, позволяющий оценить долгосрочные перспективы деятельности компании в разрезе экологической и социальной значимости для местных сообществ. Дополнительно рассмотрены проблемы регионов и моногородов, имеющих высокую зависимость от развития драйверной компании.

Ключевые слова: корпоративная социальная ответственность, КСО, крайний север, моногород, долгосрочная устойчивость

SOCIO-ECOLOGICAL PROBLEMS OF THE DEVELOPMENT OF GAS-PRODUCING ENTERPRISES OF THE FAR NORTH

Aleksey A. Kartashevich

Novosibirsk National Research State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova 1, master's degree student, tel. +79237188297, e-mail: ka7lex@gmail.com

Vasiliy Y. Nemov

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

The article deals with the problem of integration of corporate social activities of mining enterprises in the regions of the Far North. A tool for assessing the long-term prospects of the company's activities in the context of environmental and social significance for local communities has been developed. In addition, the problems of regions and single-industry towns, which are highly dependent on the development of the driver company, are considered.

Keywords: Corporate social responsibility, CSR, far north, single-industry town, long-term sustainability

Введение

Специфика газовой отрасли часто вынуждает развертывать добывающие комплексы в местах с низкоразвитой инфраструктурой, развивая ее самостоятельно. Таким образом образуются вахтовые посёлки и моногорода, имеющие высокую зависимость от деятельности добывающей компании. В таком случае

на компании ложиться большая ответственность, которая вынуждает их развивать не только бизнес, но и вести так называемую корпоративную социальную политику в отношении заинтересованных сторон (муниципальных образований, работников компании и других общественных меньшинств).

Целенаправленная коммерческая деятельность добывающих компаний ставит под вопрос экологические последствия от неё. Сейчас в рамках устойчивого развития компании стараются нивелировать отрицательные последствия от добычи, переработки и транспортировки полезных ископаемых. Однако обратимость отрицательного воздействия остается непонятной, а ущерб, фактически нанесенный окружающей среде, не всегда восполняется инвестициями и разного рода сборами.

Оценить положительное влияние от инвестиций не представляется возможным, так как прямого экономического эффекта на пользу компании, они в большей части не несут, а являются вспомогательными сигналами/факторами, формирующими положительные стимулы для деятельности компаний в будущем, преимущественно в долгосрочной перспективе. В этих рамках для властей и жителей региона важным фактором для развития будет положительная результативность самой компании. Данная проблема долгосрочной положительной экономической и социальной деятельности будет особенно актуальна для моногородов, которые формируют базу для основной деятельности добывающих компаний.

Оценка социально-экологической деятельности градообразующей компании. Выявление проблемных зон

Для оценки эффекта от долгосрочной деятельности важно понимать, что в прямом денежном выражении оценить этот эффект не предоставляется возможным, т.к.:

- Инвестиции в региональное развитие направлены на развитие и поддержания благосостояния региона, и не имеют прямой связи с основной деятельностью организации;

- Инвестиции экологического характера в восстановление природных ресурсов и минимизации вреда так же не связаны с основной деятельностью организации, не наращивают ее производственные мощности и не увеличивают фондоотдачу.

- Для капиталовложений в исследование и разработку экологичных и более эффективных способов, методов и инструментов осуществления основной деятельности компании, фондоотдача увеличится в случае прорывных инноваций.

- Инвестиции социального характера в внутреннюю корпоративную политику компании имеют более стимулирующее воздействие для сотрудников, так как непосредственно улучшают условия труда и мотивируют на более эффективное использование рабочего времени для компании.

По данным предпосылкам мы оцениваем положение компании с точки зрения ее устойчивости в границах политики устойчивого развития, которой стараются придерживаться все газодобывающие компании.

В целях нашего исследования важно анализировать следующие параметры:

- социальную устойчивость в рамках корпоративной кадровой политики компании (льгот, заработной платы, системы мотивации и премирования, соблю-

дения норм трудового законодательства, усиления безопасности и улучшения условий труда и т.д.);

- экологическую устойчивость (инвестиции в воспроизводство ресурсов и нивелирования последствий техногенных отрицательных эффектов, минимизация использования не возобновляемых ресурсов и т.д.),

- устойчивое развития региональной инфраструктуры (инвестиции в развитие социально значимых объектов в регионе, увеличение благосостояния населения в регионах и т.д.)

- развитие инфраструктуры в зонах добычи (обеспечение работников жильем, доступ к медицинским услугам и т.д.) позволяющей улучшить условия труда и жизни работников [1].

Основные параметры необходимы для агрегации издержек и показателей, на которые компания акцентируется в рамках своей деятельности, по каждому направлению деятельности можно выделить перечень показателей, которые непосредственно влияют на устойчивое развитие организации в долгосрочной перспективе на основе ее корпоративной социальной и экологической деятельности (рис. 1) [2].

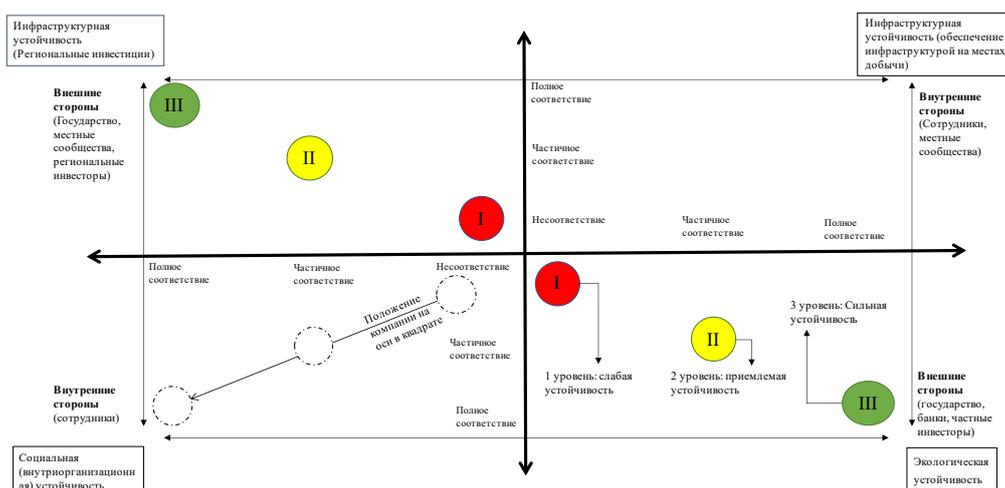


Рис. 1. Схема качественного анализа КСО компании

Исходя из схемы положение компании, по каждому направлению, может быть в 3х состояниях 1-2-3 уровни устойчивости, где:

- 1 уровень. Предполагает низкую направленность стратегий и политик компании на рассматриваемое направление. В случае если компания пренебрегает развитием одного или нескольких направлений КСО, то в долгосрочной перспективе устойчивое положение компании будет снижаться.

- 2 уровень. Предполагает приемлемую направленность стратегий и политик компании на развития направления. Такая компания инвестирует средства на достижение положительного эффекта, однако некоторые важные параметры направления могут не рассматриваться. Устойчивость компании в данном случае будет находится на среднем уровне и даже немного развивать перспективы на долгосрочное развитие компании.

- 3 уровень. Предполагает сильную завязку бизнес-процессов компании на соблюдение норм и правил в направлении, которые обеспечат ей благоприятный рост в будущем. Прямой экономический эффект переносится на косвенные признаки благоприятного развития.

Центральная ось координат показывает соответствие параметрам, для каждой группы в зависимости от полученных баллов по шкале Е. Харрингтона выставляется соответствующий уровень устойчивости отдельно взятого направления (Табл. 1).

Таблица 1

Ключевые показатели социально-экологической устойчивости.

№	Показатели/критерии	Комментарии
1. Социальные (внутриорганизационные)		
1.1	Уровень заработной платы к среднерегиональному	Данное направление важно рассматривать с позиции уровня обеспечения необходимой материальной базой и не материальной мотивацией для роста благосостояния работников, и улучшение условий труда для обеспечения стабильно развивающихся кадров и роста приверженности компании.
1.2	Текучесть кадров	
1.3	Доля сотрудников в составе коллективного договора к общей численности.	
1.4	Доля дополнительной материальной мотивации (включая: ДМС, пенс. обеспечение, выплаты социального характера)	
1.5	Доля расходов на охрану труда в структуре чистой прибыли	
1.6	Чрезвычайные происшествия на предприятиях	
2. Экологические (воздействие на окружающую среду)		
2.1	Инвестиции в развитие экологичного производства восстановление природных ресурсов	Данную группу показателей/критериев направления стоит рассматриваться в целях минимизации ущерба окружающей среде, нивелирования негативного воздействия и поиска возможностей альтернативных ресурсов
2.2	Отсутствие разливов нефти и иных вредных веществ	
2.3	Таргетинг на снижение выбросов в атмосферу	
2.4	Обеспечение производства водоочистительными сооружениями	
2.5	Использование водных ресурсов.	
2.6	Использование почвенных ресурсов	
3. Инфраструктурные (региональные вливания, имеющие отношение к МО)		
3.1	Финансовая поддержка органов местного самоуправления для реализации социально значимых проектов	Группа показателей направлена на улучшение благосостояния населения не входящих в кадровый состав организации для стабильного роста экономики и уровня жизни субъектов (МО). Важная характеристика для моногородов.
3.2	Ведение благотворительных проектов (инвестиции в НКО)	
3.3	Поддержание коренных, малочисленных народов крайнего севера, или иных меньшинств	
3.4	Реализация партнерских и благотворительных программ образовательного и медицинского характера.	
4. Инфраструктурные (в местах добычи)		
4.1	Доступность жилого фонда	Данная группа критериев направлена на поддержания должных условий труда и жизни не в целом по обществу, а на отдельных бизнес-единицах, зонах трудящихся, в силу специфики труда. Актуально для вахтовых поселков и иных труднодоступных с точки зрения логистики объектов.
4.2	Обеспечение вахтовых поселков необходимой для жизни и работы инфраструктуры	
4.3	Содержание (строительство) культурно массовых комплексов	
4.4	Содержание (строительство) оздоровительных комплексов	

На основании экспертного мнения и анализа внутренних данных аналитик выставляет балл (от 0 до 1) по каждому из показателей в целом оценивая его в соответствии с основной целью каждого направления и влияния в долгосрочной перспективе (Табл. 2)

Таблица 2

Способ определения степени соответствия критериев уровням устойчивости по каждому направлению

Лингвистическая оценка (степень соответствия)	Балл	Среднее значение по направлению	Уровень устойчивости
Очень высокое	0,8 – 1,0	$I = \sum b_i/n$ где b_i – оценка i -го показателя; n – кол-во показателей в группе I – значение по направлению	3 уровень (полностью устойчивое)
Высокое	0,63 – 0,8		2 уровень (в целом устойчивое)
Среднее	0,37 – 0,63		1 уровень (не устойчивое)
Низкое	0,2 – 0,37		
Очень низкое (или отсутствует)	0 – 0,2		

После анализа и выставления баллов по каждому направлению результирующий показатель представляет собой среднюю величину баллов всех направлений анализа. Обобщающий показатель можно рассчитать по формуле 1:

$$\lambda = \sum I_i/n \quad (1),$$

где I_i – комплексная оценка i -го направления; n – кол-во направлений (всего 4); λ – комплексная оценка устойчивости.

Данный инструмент будет полезен при оценке компаний, имеющих высокую степень ответственности перед местным сообществом, экологией и социальными группами рабочих. Такой подход позволяет выявить проблемные зоны в текущей деятельности компании по каждому из направлений корпоративной социальной ответственности.

Заключение

Переходя к проблемным зонам, влияющим на регион, важно отметить некоторые факторы, негативно влияющие на местные территории:

– Налоги и вывозные пошлины экспортеров горнодобывающих компаний уплачиваются в федеральный бюджет, а межбюджетных трансфертов и дотаций зачастую не хватает на полное исполнение функций органами региональной и муниципальной власти [3, 4];

– После изменения экономического уклада страны, компании, ранее обеспечивающие инфраструктуру местных территорий, задались вопросом об источ-

никах содержания объектов социальной инфраструктуры, полностью находившихся на содержании предприятий нефтегазового сектора;

– Достаточно сложная логистика поставок необходимых товаров и топлива, которая может включать в себя морские и воздушные пути перевозок. Вследствие чего возникают высокие издержки на поставляемую продукцию;

– Низкий уровень государственных инвестиций в природоохранную деятельность, наряду с высоким уровнем ущерба экологии добывающими компаниями [5].

Учитывая особенности экономики регионов Севера России, значимость большинства социальных программ для населения, неготовность органов исполнительной власти принять на себя социальные функции, выполняемые до настоящего времени крупными промышленными предприятиями, нефтегазовый комплекс осторожно подходил к принятию инвестиционных решений и разработке стратегии реструктуризации социальной инфраструктуры. В этом аспекте важно нахождение пути баланса между основной деятельностью компаний, наносящей вред экологии, возможностью развития инфраструктуры региона и получением прибыли компанией, являющейся основным драйвером развития региона или моногорода.

Районы крайнего севера имеют весьма богатую ресурсную составляющую и суровый климат при ее освоении в условиях нежелания социальных вливаний в экономики регионов как со стороны государства, так и коммерческих организаций. При этом единственно верным путем развития будет выстраивание коммерческих и социальных процессов между представителями государства и частного сектора, направленных на поддержание благополучия всех заинтересованных сторон в регионе и государства в целом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ № 20-010-00699.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грачев С.Л. Ключевые направления повышения эффективности использования социальной инфраструктуры (на примере ООО «Газпром добыча Надым») // Интерэкспо ГЕО–Сибирь–2016. XII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология" (г. Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.): Сборник материалов в 4 т. – 2016. – Т. 2. – С. 139-143.

2. Тульчинский Г.Л. Корпоративные социальные инвестиции и социальное партнерство: технологии и оценка эффективности / Г.Л. Тульчинский, Санкт-Петербургский филиал Нац. исслед. ун-та «Высшая школа экономики». – СПб.: Отдел оперативной полиграфии НИУ ВШЭ, 2012. – 236 с.

3. Бюджет для граждан МО г. Надым 2019 г. [Электронный ресурс] / Департамент финансов Надымского района. – 2020. URL: http://xn--80aimrd4b.xn--p1ai/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=122&Itemid=180

4. Бюджетный кодекс Российской Федерации от 31.07.1998 № 145-ФЗ (ред. от 22.12.2020) // Собрание законодательства РФ. - 03.08.1998. - № 31. - Ст. 3823.

5. Филимонова И.В., Эдер Л.В., Проворная И.В., Немов В.Ю., Мишенин М.В, Комарова А.В., Земнухова Е.А., Шумилова С.И., Дзюба Ю.А. Газовая промышленность России: долгосрочные тенденции и закономерности развития. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2019. – 58 с.

REFERENCES

1. Grachev S.L. Klyucheve napravleniya povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya social'noj infrastruktury (na primere ООО «Gazprom dobycha Nadym») // Interekspo Geo-Sibir'-2016. XII nauch. kongr.: Mezhdunar. Nauch. konf. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Ekonomika. Geoekologiya (g. Novosibirsk, 18–22 aprelya 2016 g.) sbornik materialov XII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa, v 4 t. – 2016. – T. 2. – S. 139-143. [Elektronnyj resurs] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klyucheve-napravleniya-povysheniya-effektivnosti-ispolzovaniya-sotsialnoy-infrastruktury-na-primere-ooo-gazprom-dobycha-nadym>.

2. Tul'chinskij G.L. Korporativnye social'nye investicii i social'noe partnerstvo: tekhnologii i ocenka effektivnosti / G.L. Tul'chinskij, Sankt-Peterburgskij filial Nac. issled. un-ta «Vysshaya shkola ekonomiki». – SPb.: Otdel operativnoj poli-grafii NIU VSHE, 2012. – 236 s.

3. Byudzhet dlya grazhdan MO g. Nadym 2019 g. [Elektronnyj resurs] URL: http://xn--80aimrd4b.xn--p1ai/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=122&Itemid=180

4. "Byudzhetnyj kodeks Rossijskoj Federacii" ot 31.07.1998 N 145-FZ (red. ot 22.12.2020) // Sobranie Zakonodatel'stva RF. - 03.08.1998. - № 31. - St. 3823.

5. Filimonova I.V., Eder L.V., Provornaya I.V., Nemov V.Yu., Mishenin M.V, Komarova A.V., Zemnuhova E.A., Shumilova S.I., Dzuba Yu.A. Gazovaya promyshlennost' Rossii: dolgosrochnye tendencii i zakonomernosti razvitiya. Novosibirsk: IPC NGU, 2019, 58 s.

© А. А. Карташевич, В. Ю. Немов, 2021

ТЕКУЩАЯ СИТУАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЗЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ НА ПРИМЕРЕ ПОКАЗАТЕЛЯ LCOE

Владислав Дмитриевич Кожевин

Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 17, аспирант, тел. (383)330-89-44, e-mail: kozhevl@mail.ru

Развитие возобновляемой энергетики в России следует за мировыми трендами с некоторым опозданием. Однако на данный момент был сформирован производственный кластер ВИЭ и запланирован ввод 5,6 ГВт мощностей до 2024 года, отмечая более чем двукратное падение капитальных затрат в рамках программы ДПМ. В статье был рассчитан показатель LCOE для трех видов генерации ВЭС, СЭС и МГЭС в 2020 году по итогам отборов мощностей на аукционах ДПМ, описаны основные факторы и драйверы снижения данного показателя.

Ключевые слова: ВИЭ, ВЭС, СЭС, LCOE

THE CURRENT SITUATION AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF GREEN ENERGY IN RUSSIA ON THE EXAMPLE OF THE LCOE INDICATOR

Vladislav D. Kozhevin

Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS, 17, Prospect Akademik Lavrentyev, Novosibirsk, 630090, Russia, PhD student, phone: (383)330-89-44, e-mail: kozhevl@mail.ru

The development of renewable energy in Russia follows global trends with some delay. However, at the moment, a renewable energy production cluster has been formed and the commissioning of 5.6 GW of capacity is planned until 2024, marking a more than twofold drop in capital expenditures under the power supply contracts program. The article calculated the LCOE indicator for three types of generation of wind power plants, solar power plants and small hydro power plants in 2020 based on the results of capacity selection at power supply contracts auctions, and describes the main factors and drivers for reducing this indicator.

Keywords: RES, wind energy, solar energy, LCOE

Введение

Тренд на развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире уже не новый, однако в России данный процесс наиболее активно стал развиваться, только начиная с 28 мая 2013 года, когда были подписаны постановление Правительства РФ №449 и распоряжение №861-р о существенных условиях и механизме ДПМ ВИЭ (договоры поставки мощности) [1,2]. Фактически до этого момента ключевые новые ВИЭ промышленного масштаба (солнечные и ветряные) не существовали в России. ДПМ ВИЭ заключается на 15 лет в отношении объектов генерации, определенных по результатам конкурсного отбора инвестиционных проектов ВИЭ. Основным критерий при отборе на конкурсе – это наименьшая заявленная величина полных капитальных затрат на 1 кВт установленной

мощности, которая не может превышать предельные значения, установленные в рамках отбора.

Всего в рамках таких отборов в 2013-2020 гг, было отобрано более 5,6 ГВт установленной мощности со сроками ввода объектов до 2024 года. Распределение вводов по конкурсам представлено на рисунке 1 по данным Администратора торговой системы оптового рынка электроэнергии.

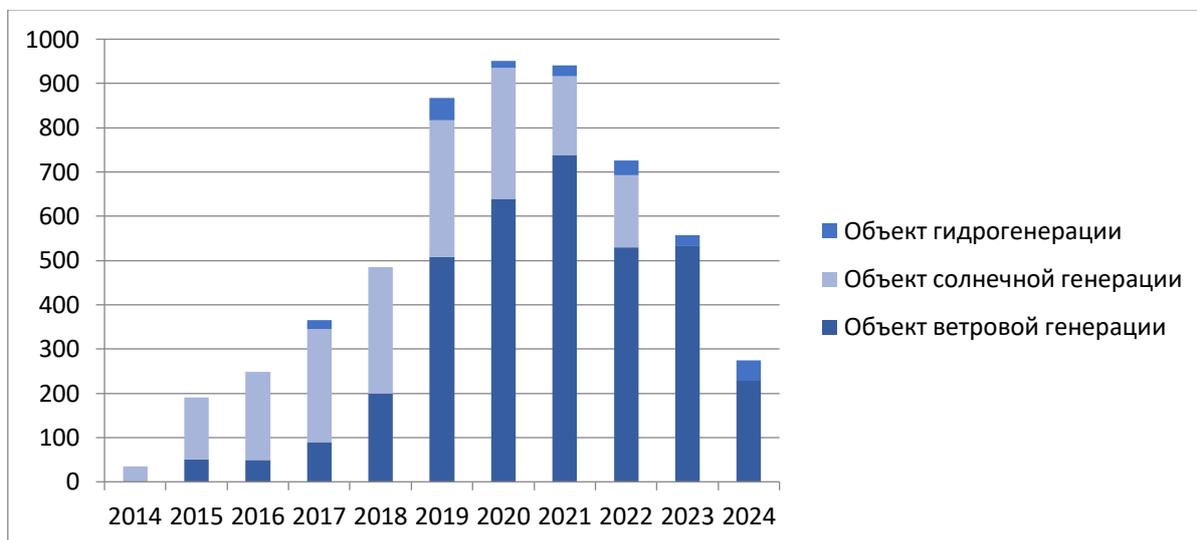


Рис.1 Ввод объектов ВИЭ в рамках конкурсов ДПМ

Крупнейшими игроками на рынке новой возобновляемой энергетики в России являются (конечные бенефициары мощности):

- ВЭС: АО «Новавинд» (ГК «Росатом») – 1192,5 МВт, Фортум – 947 МВт, Роснано – 911,3 МВт, Энел Россия – 362,3 МВт.

- СЭС: ГК «Ренова» - 619,2 МВт, ПАО «Т плюс» - 326,2 МВт, ООО «Солар Системс» - 316,3 МВт, ООО «Реам менеджмент» - 212,1 МВт, ГК «Вершина девелопмент» (Core Value Capital GmbH), Фортум – 115,6 МВт.

- МГЭС: ПАО «Русгидро» - 99,5 МВт, ООО «Норд Гидро» - 49,8 МВт.

Активное развитие ВИЭ в России в том числе связано с поступательным развитием технологий и созданием производств на территории России: Гетероструктурные ФЭМ ГК «Хевел» в г. Новочебоксарске объемом 340 МВт/год, Мультикристаллические кремниевые слитки и пластины ООО «Хелиос-ресурс» в г. Мытищи и г. Саранске объемом 180 МВт/год, Гондолы ВЭУ и системы охлаждения ООО «Вестас Рус» в г. Нижний Новгород объемом 80 гондол/год и другие [3].

Капитальные затраты на 1 кВт значительно сократились во время отборов для ВЭС с 155 тыс. руб. за кВт установленной мощности в 2016 году до 65 тыс. руб. для объектов с вводом в 2024 году; СЭС со 108 тыс. руб. в 2015 до 83-97 тыс. руб. в 2021-2022. МГЭС же наоборот выросли с 146 тыс. руб. за кВт установленной мощности в 2017 году до 193 тыс. руб. в 2024.

При этом с проблемами столкнулись первые победители конкурсов в виду как некорректного указания капитальных затрат на единицу мощности, так и девальвации рубля в 2014 году и ухудшении условий банковского финансирования. Так, по словам Павла Шевченко (бывшего директора ГК «Энергия солнца») компания вместе с инвесторами из Bright Capital не смогла исполнить свои обязательства по строительству солнечных электростанций установленной мощностью 435 МВт и в 2016 г. начала распродавать свои ДПМ, выигранные ранее на конкурсах (в течение 2-х лет ДПМ в отношении 13 проектов СЭС совокупной мощностью 195 МВт были проданы структурам ГК «Ренова», ДПМ в отношении 4 проектов совокупной мощностью 60 МВт были проданы компаниям, входящим в группу «Солар Системс», 135 МВт австрийскому фонду Core Value Capital GmbH под управление ГК «Вершина девелопмент»).

Методы и материалы

В рамках работы используется методика для расчета средней расчетной себестоимости производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла генерирующего объекта, получившая обозначение LCOE (levelized cost of electricity).

$$LCOE = \frac{\sum \frac{Cap_t + O\&M_t + F_t + Carb_t + D_t}{(1+r)^t}}{\sum \frac{MWh_t}{(1+r)^t}}$$

где: MWh_t – количество произведенной энергии в году t ;

$(1+r)^{-t}$ – коэффициент дисконтирования для года t ;

Cap_t – полные капитальные затраты в году t ;

$O\&M_t$ – операционные затраты в году t ;

F_t – затраты на топливо в году t ;

$Carb_t$ – затраты на оплату парниковых газов в году t ;

D_t – затраты на обращение с отходами и вывод из эксплуатации в году t .

LCOE отражает стоимость вырабатываемого МВт·ч электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла энергоустановки, учитывая плановый КИУМ (коэффициент извлечения установленной мощности), капитальные расходы на строительство, операционные расходы, топливо, проценты по привлекаемым кредитам, ремонт и вывод из эксплуатации. LCOE представляет собой среднюю минимальную цену продажи электроэнергии, которая обеспечивает безубыточность генерирующего объекта в течение всего срока эксплуатации [4].

LCOE является сводной оценкой общей конкурентоспособности различных технологий, что позволяет заинтересованным сторонам (инвесторам и регуляторам):

- Отбор наиболее эффективных проектов для снижения капитальных и операционных затрат;

- Комплексный анализ влияния технико-экономических и финансовых изменений на возведение генерирующего объекта;

- Сравнение отечественных и зарубежных технологий, определение конкурентных преимуществ проекта;

- Принятие инвестиционных решений по конкретным объектам.

Для целей работы будут рассчитаны LCOE в России на 2020 год и сопоставлены с мировыми значениями.

Текущая ситуация в России

Расчет показателя LCOE осуществляется рядом известных международных организаций (IRENA, Bloomberg NEF, Lazard и др.), однако методики расчета у каждой из этих организаций являются индивидуальными, что приводит к разбросам в значениях.

Результаты расчета LCOE в России на 2020 год показывают его существенное превышение над международными аналогами в 2-4 раза (Таблица). Сокращение данного отставания возможно при реализации следующих факторов:

- Развитие технологий;
- Усиление конкуренции на конкурсных отборах;
- Появление большого числа опытных, международных девелоперов.

Корреляция спектральных аномалий

Параметры		СЭС	ВЭС	МГЭС
Год ввода по конкурсу		2020	2020	2020
Кап затраты	тыс. руб./кВт	114,0	111,3	175,5
Опер затраты	руб./кВт в мес	301,7	209,4	164,5
КИУМ	%	15,08	27,47	47,33
WACC	%	12%	12%	12%
Жизненный цикл	Лет	25 лет	25 лет	25 лет
LCOE РФ*	руб./кВт	13,9	7,0	5,9
LCOE Мир**	руб./кВт	3,3	3,3	3,4

* Расчеты автора ** IRENA

Данные факторы в значительной мере уже реализуются на территории России, что ведет к постепенному снижению себестоимости выработки электроэнергии из новых объектов ВИЭ и сокращению отставания.

Развитие внутренних кластеров производства оборудования для ВИЭ (солнечные панели, элементы ветроустановок), приводит к постепенному снижению себестоимости: от 24 руб. за кВт*ч у СЭС и 12,6 руб. за кВт*ч у ВЭС на старте программы ДПМ в 2015-2016 гг. до нынешних значений в 14 и 7 рублей соответственно.

Помимо этого усиливается конкуренция компаний на конкурсных отборах мощностей. Если в первые 3 года программы ДПМ отбиралось не более 200 МВт установленной мощности, то к 2020 году данный показатель практически достиг

1 ГВт, а капитальные расходы снизились с 155 тыс. руб./кВт (ВЭС) и 108 тыс. руб./кВт (СЭС) до 65 тыс. руб./кВт (ВЭС) в 2024 г. и 50 тыс.руб./кВт в 2022 г. соответственно.

В третьих, на рынок вышли крупные энергетические и промышленные игроки с международным опытом строительства объектов ВИЭ и развития технологий производства. Enel Group с портфелем проектов по всему миру более 49 ГВт, Фортум – более 3 ГВт, Vestas – 136 ГВт, Siemens Gamesa Renewable Energy – производство более 12 ГВт ветрогенераторов по всему миру (данные с сайтов компаний). Это позволяет реализовывать крупные проекты с конкурентоспособной себестоимостью энергии.

Обсуждение и заключение

Согласно Renewables 2020 Global status report, данным IRENA и Lazard новые проекты возобновляемых источников энергии оказываются более конкурентоспособными с точки зрения затрат по сравнению с традиционной генерацией и вырабатывают более 26% мирового производства электроэнергии. Чистый прирост мощностей для возобновляемых источников энергии был выше, чем для ископаемых видов топлива и ядерной энергии вместе взятых, начиная с 2015 года, и в настоящее время ВИЭ составляют более одной трети общемировой установленной мощности [5]. Россия также отмечает подобные тенденции: цены возобновляемой электроэнергии существенно снизились и новые отборы регистрируют все более низкие значения, операционные затраты также продолжают снижаться, а промышленный кластер ВИЭ способен производить более 1,5 ГВт установленной мощности ежегодно. Все это непосредственно сказывается на значениях LCOE, приближая российскую возобновляемую энергетику к международному уровню, даже при учете факторов зависимости потребления ВИЭ от цен на углеводороды или коррупционной составляющей, которые существенно замедляют проникновение ВИЭ в энергобалансы стран [6].

При этом ключевыми внутренними драйверами снижения LCOE российских проектов остаются КИУМ и WACC. Первый показатель является результатом развития технологий, а второй – стоимости заимствования и инвестиционной привлекательности проектов. Внешними драйверами, способными существенно ускорить снижение LCOE, являются государственная поддержка и рост рыночного спроса на зеленую энергию.

По всем из этих драйверов в последние годы можно было наблюдать существенные изменения: мягкая ДКП Банка России снижала стоимость заимствования, технологический кластер увеличивал локализацию производства, снижая себестоимость, государство продлило программу ДПМ ВИЭ до 2035 года, пусть и в несколько урезанном виде, а крупные промышленные компании и генерация, как Полюс золото и ТГК-1, начали заключать сделки по купле-продаже «зеленых» сертификатов.

Таким образом, до 2035 года можно ожидать снижение LCOE ВИЭ ниже аналогичного показателя для традиционной генерации, в частности ТЭС, и сокращении разрыва с общемировыми значениями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ – 2571.2020.6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 г. N 449 "О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности" [Электронный ресурс]. – <http://government.ru/docs/2121/> (дата обращения: 20.04.2021)
2. Распоряжение Правительства РФ от 28 мая 2013 г. N 861-р. [Электронный ресурс]. – <http://government.ru/docs/2180/> (дата обращения: 20.04.2021)
3. Отрасль ВИЭ в РФ. Потенциал развития до 2035г. Роснано. [Электронный ресурс]. – <https://www.rusnano.com/upload/images/sitefiles/files/РОСНАНО%20Презентация%20Отрасль%20ВИЭ%20в%20РФ.pdf> (дата обращения: 20.04.2021)
4. Развитие ВИЭ в России: технологии и экономика / под ред. А.Б. Чубайса, В.А. Зубакина и А.Е. Копылова – М.: Издательская группа «Точка», 2020. – 464 с.
5. REN21. 2020. Renewables 2020 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017_Full-Report_English.pdf (дата обращения: 20.04.2021).
6. Eder L.V. World energy market in the conditions of low oil prices, the role of renewable energy sources / L.V. Eder, I.V. Provornaya, I.V. Filimonova, V.D. Kozhevina, A.V. Komarova // Energy Procedia. – 2018. – Vol 153. – P.112-117. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218308804?via%3Dihub> (дата обращения: 20.04.2020).

REFERENCES

1. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 28 maya 2013 g. N 449 "O mekhanizme stimulirovaniya ispol'zovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii na optovom rynke elektricheskoy energii i moshchnosti" [Elektronnyj resurs]. – <http://government.ru/docs/2121/> (data obrashcheniya: 20.04.2021)
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28 maya 2013 g. N 861-r. [Elektronnyj resurs]. – <http://government.ru/docs/2180/> (data obrashcheniya: 20.04.2021)
3. Otrasl' VIE v RF. Potencial razvitiya do 2035g. Rosnano. [Elektronnyj resurs]. – <https://www.rusnano.com/upload/images/sitefiles/files/ROSNANO%20Prezentaciya%20Otrasl'%20VIE%20v%20RF.pdf> (data obrashcheniya: 20.04.2021)
4. Razvitie VIE v Rossii: tekhnologii i ekonomika / pod red. A.B. Chubajsa, V.A. Zubakina i A.E. Kopylova – M.: Izdatel'skaya gruppya «Tochka», 2020. – 464 s.
5. REN21. 2020. Renewables 2020 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017_Full-Report_English.pdf (data obrashcheniya: 20.04.2021).
6. Eder L.V. World energy market in the conditions of low oil prices, the role of renewable energy sources / L.V. Eder, I.V. Provornaya, I.V. Filimonova, V.D. Kozhevina, A.V. Komarova // Energy Procedia. – 2018. – Vol 153. – P.112-117. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218308804?via%3Dihub> (data obrashcheniya: 20.04.2020).

© В. Д. Кожевин, 2021

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА ЕВРОПЕЙСКИХ СТРАН

Анна Владимировна Комарова

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

В статье исследована структура современных документов Европейских стран в области климатической политики, включающая изменения последних лет. По результатам анализа динамики и структуры потребления энергии европейского макрорегиона выявлено, что на фоне общей тенденции снижения энергопотребления, наблюдается увеличение роли возобновляемых источников энергии. При сравнении показателей доли возобновляемых источников энергии в энергопотреблении и целей по сокращению выбросов парниковых газов для отдельных стран были выявлены значительные различия для отдельных стран европейского макрорегиона.

Ключевые слова: климатическая политика, Парижское соглашение, Зеленая сделка, Чистая энергия, страны ЕС

CLIMATE POLICY OF EUROPEAN COUNTRIES

Anna V. Komarova

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

The article examines the structure of modern documents of European countries in the field of climate policy, including changes in recent years. Based on the results of the analysis of the dynamics and structure of energy consumption in the European macro-region, it was revealed that against the background of the general trend of decreasing energy consumption, there is an increase in the role of renewable energy sources. When comparing the indicators of the share of renewable energy sources in energy consumption and targets for reducing greenhouse gas emissions for individual countries, significant differences were revealed for individual countries of the European macro-region.

Keywords: climate policy, Paris Agreement, Green Deal, Clean energy, EU countries

В 2019 году ЕС завершил комплексное обновление своей энергетической политики, чтобы облегчить переход от ископаемого топлива к более чистой энергии и выполнить обязательства ЕС в рамках Парижского соглашения по сокращению выбросов парниковых газов. Данное соглашение подразумевает удержание прироста глобальной средней температуры значительно ниже 2°C сверх доиндустриальных уровней и приложения усилий в целях ограничения роста температуры до 1,5°C. Также страны-участники стремятся как можно скорее достичь глобального пика выбросов парниковых газов [1].

Европейские страны являются одними из основных торговых партнеров России в области энергетических ресурсов. Значительные изменения в области климатической и энергетической политики региона могут иметь разностороннее влияние на развитие отдельных отраслей российской экономики [2].

Динамика энергопотребления в Европе. Пик энергопотребления в Европе пришелся на 2004-2007 гг. Важными тенденциями, повторяющимися общемировые направления развития отрасли, являются снижение потребления угля и атомной энергии, а также повышение уровня использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Так в настоящее время доля ВИЭ в потреблении энергии составляет почти 10% (рис. 1) [3].

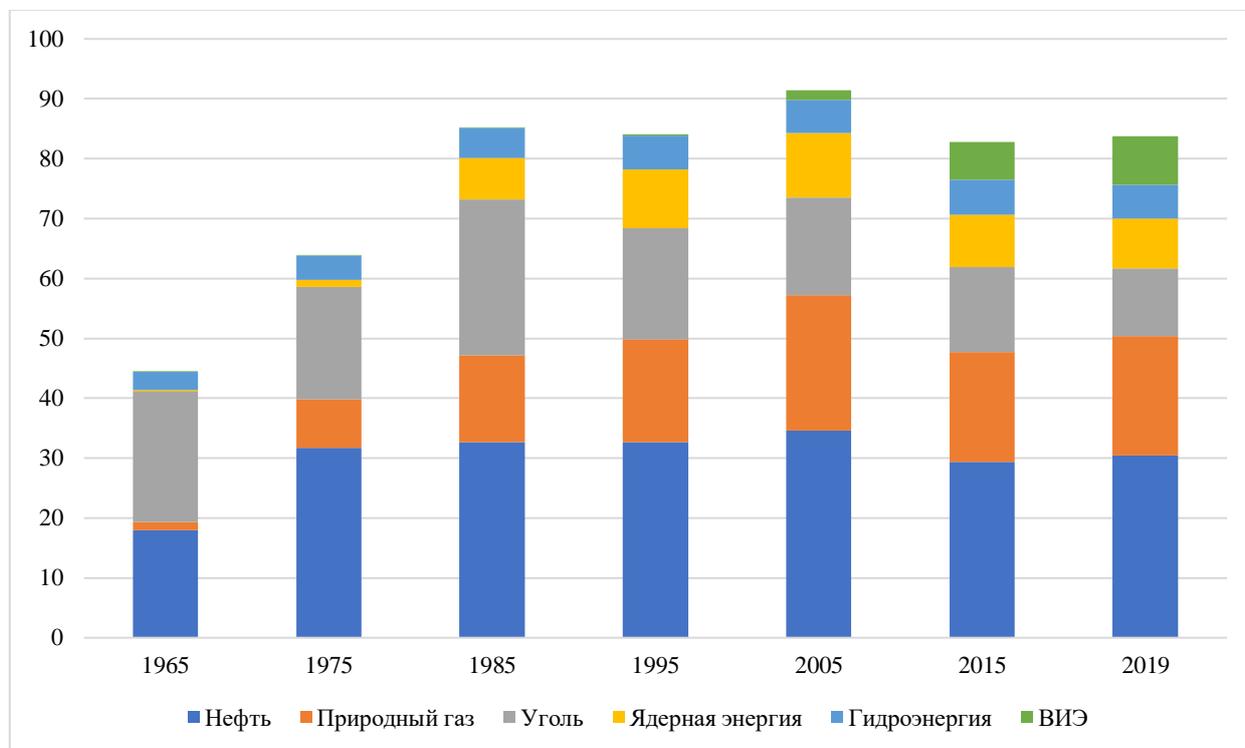


Рис. 1. Потребление энергии по видам энергоносителей в европейских странах в 1965-2019 гг., экскаджоули

Основные климатические документы ЕС. В 2015 г. началось формирование законодательного пакета "Чистая энергия для всех европейцев". Данный энергетический пакет является четвертым по счету [4].

Индикаторы пакета Чистая энергия включают следующие целевые показатели:

- доля ВИЭ в потреблении энергии 32% к 2030 г.
- доля возобновляемого топлива на транспорте 14% к 2030 г.
- показатель энергоэффективности не менее 32,5% к 2030 году (по сравнению с прогнозами 2007 г. на 2030 г.). В абсолютном выражении это означает, что потребление энергии в ЕС не должно превышать 1128 Мтнэ (миллион тонн эквивалента) первичной энергии и / или не более 846 Мтнэ конечной энергии (для ЕС-27, не включая Великобританию).

- новая совокупная годовая экономия энергии конечным потребителем в размере 0,8% в год от конечного потребления энергии в период 2021-2030 гг., за исключением Кипра и Мальты (0,24% в год).

- национальные цели по энергоэффективности.

На основе предложений Комиссии, опубликованных в ноябре 2016 года, пакет "Чистая энергия для всех европейцев" состоит из восьми законодательных актов:

1. Директива об энергоэффективности зданий (ЕС) 2018/844:

2. Директива о ВИЭ, которая устанавливает обязательную цель в 32% для ВИЭ в структуре энергетики ЕС к 2030.

3. Директива об энергоэффективности, которая устанавливает целевой показатель энергоэффективности на уровне 32,5% к 2030 году по сравнению с базовым сценарием, установленным в 2007 году.

4. Регламент Управления Энергетическим союзом, который устанавливает новую систему управления для Энергетического союза. Каждое государство-член должно разработать интегрированный 10-летний национальный план по энергетике и климату (NECP) на 2021–2030 годы с более долгосрочной перспективой до 2050 года.

5. Регламент по электроэнергии, который устанавливает принципы для внутреннего рынка электроэнергии ЕС.

6. Директива, которая устанавливает правила для производства, передачи, распределения, поставки и хранения электроэнергии.

7. Регламент готовности к рискам, который требует, чтобы государства-члены подготовили планы действий в отношении потенциальных будущих энергетических кризисов.

8. Регламент, который обновляет роль и принципы функционирования Агентства Европейского Союза по сотрудничеству органов регулирования энергетики (ACER). Пакет Чистой энергии также увеличивает компетенцию ACER в межстрановом сотрудничестве.

В конце 2019 г. был утвержден документ Европейской зеленой сделки (The European Green Deal), который представляет собой план по формированию углеродно-нейтрального пространства в странах ЕС к 2050 г. Основными целевыми показателями документа являются: углеродная нейтральность к 2050 г. и сокращение выбросов парниковых газов как минимум на 55% ниже уровня 1990 г. к 2030 г.

Национальные индикаторы и цели. Одной из основных целей для стран-членов ЕС является сокращение выбросов парниковых газов странами-членами ЕС к 2030 г. по сравнению с 2005 г., при этом у каждой из стран стоит индивидуальный целевой показатель (рис. 2).

При анализе и сопоставлении стран европейского региона по показателям целевого сокращения выбросов парниковых газов и текущей доли использования ВИЭ было выявлено формирование отдельных групп. Так, ряд стран (Германия, Финляндия, Швеция, Великобритания, Ирландия, Испания, Дания) на 2019 г. имели долю ВИЭ в энергопотреблении на уровне свыше 10%, при этом страны

перед странами стоят высокие целевые показатели по сокращению выбросов парниковых газов. Необходимо отметить, что в связи с выходом Великобритании из ЕС, ее политика в данной области может поменяться. Группа стран (Болгария, Польша, Румыния и т.д.) на данный момент характеризуется более низким уровнем потребления ВИЭ, однако, и цели по сокращению выбросов также находятся в умеренных пределах – до -15%. Третья группа стран (Бельгия, Франция, Австрия и др.), обладая достаточно низкой долей ВИЭ в энергопотреблении, ставит перед собой достаточно высокие цели по снижению выбросов парниковых газов – до -40%. С одной стороны, это отражает более высокий потенциал для замещения энергоносителей и возможности повышения энергоэффективности. С другой стороны, более низкая степень готовности к изменению структуры энергопотребления может стать препятствием в рамках среднесрочного реформирования [5, 6].

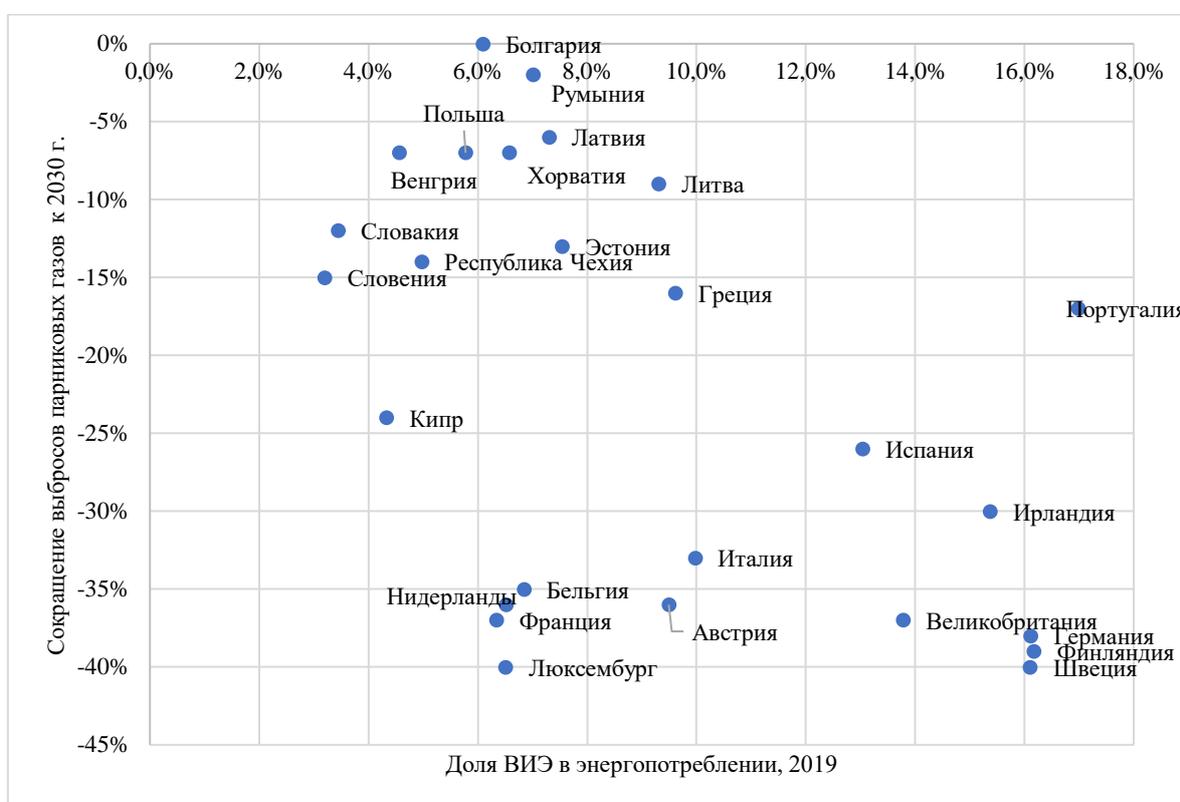


Рис.2 Сопоставление доли ВИЭ в энергопотреблении и целевого уровня сокращения выброса парниковых газов к 2030 г. странами европейского макрорегиона

Заключение

Климатическая и экологическая повестка остаются одними из ключевых вопросов для развития Евросоюза. В последние годы в макрорегионе был принят ряд важных стратегических документов, последовавших за подписанием Парижского соглашения.

Основными направлениями развития энергетического сектора ЕС является повышение доли ВИЭ в энергоносителях, а также энергоэффективность, в том числе энергоэффективность зданий. Отдельное внимание уделено институциональным аспектам развития энергетики, таким как роль и принципы функционирования основных государственных и общесоюзных органов, регулирующих энергетический сектор.

Был произведен переход к системе, включающей как стратегическое долгосрочное планирование, так и более среднесрочные интегрированные десятилетние национальные планы по энергетике и климату для всех стран ЕС.

Необходимо отметить, что несмотря на общую тенденцию суммарного снижения потребления энергии и повышения доли используемых ВИЭ, при межстрановом сравнении наблюдается значительные различия между отдельными участниками Европейского союза. Таким образом, необходимо более точечная проработка энергетической политики для каждой страны в соответствии с текущим уровнем экономического и энергетического развития.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ № НШ-2571.2020.6 и проекта № 0331-2019-0028 ИНГГ СО РАН в рамках государственной программы «Выполнение фундаментальных научных исследований»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров И. А., Чен Х., Пальцев С. В. Последствия Парижского климатического соглашения для экономики России // Вопросы экономики. – 2018. – №. 4. – С. 76-94.
2. Тётушкин В. А. Анализ трендов климатической политики как элемента экономической безопасности Российской Федерации: Международный аспект // Региональная экономика: теория и практика. – 2017. – Т. 15. – №. 6 (441). – С. 1173-1186.
3. Filimonova I. V., Provornaya I. V., Komarova A. V., Zemnukhova E. A., Mishenin, M. V. . Influence of economic factors on the environment in countries with different levels of development // Energy Reports. – 2020. – Т. 6. – С. 27-31.
4. Вуккерт М. А., Орлова Ю. М. Политика Европейского союза в области регулирования природных ресурсов критической важности: рамочное регулирование // Актуальные проблемы права. – 2020. – №. 7. – С. 34-44.
5. Nemov V. Y., Filimonova I. V., Komarova A. V. Assessment of the Mutual Influence of Energy Intensity of the Economy and Pollutant Emissions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. – Т. 459. – №. 6. – С. 062025.
6. Порфирьев Б. Н. Парадигма низкоуглеродного развития и стратегия снижения рисков климатических изменений для экономики // Проблемы прогнозирования. – 2019. – №. 2 (173). – С. 3-13.

REFERENCES

1. Makarov I. A., CHen H., Pal'cev S. V. Posledstviya Parizhskogo klimaticheskogo soglasheniya dlya ekonomiki Rossii // Voprosy ekonomiki. – 2018. – №. 4. – S. 76-94.
2. Tyotushkin V. A. Analiz trendov klimaticheskoy politiki kak elementa ekonomicheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federacii: Mezhdunarodnyj aspekt // Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika. – 2017. – Т. 15. – №. 6 (441). – S. 1173-1186.

3. Filimonova I. V., Provornaya I. V., Komarova A. V., Zemnukhova E. A., Mishenin, M. V. . Influence of economic factors on the environment in countries with different levels of development //Energy Reports. – 2020. – T. 6. – S. 27-31.

4. Vukkert M. A., Orlova YU. M. Politika Evropejskogo soyuza v oblasti regulirovaniya prirodnyh resursov kriticheskoj vazhnosti: ramochnoe regulirovanie // Aktual'nye problemy prava. – 2020. – №. 7. – S. 34-44.

5. Nemov V. Y., Filimonova I. V., Komarova A. V. Assessment of the Mutual Influence of Energy Intensity of the Economy and Pollutant Emissions //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. – T. 459. – №. 6. – S. 062025.

6. Porfir'ev B. N. Paradigma nizkouglerodnogo razvitiya i strategiya snizheniya riskov klimaticheskikh izmenenij dlya ekonomiki // Problemy prognozirovaniya. – 2019. – №. 2 (173). – С. 3-13.

© *A. B. Комарова, 2021*

АНАЛИЗ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМИССИИ CO₂ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Валерия Михайловна Кузенкова

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, студент 4 курса бакалавриата.e-mail: v.kuzenkova@g.nsu.ru

Василий Юрьевич Немов

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

В статье рассмотрены нормативные акты, регулирующие климатические политики стран. Описаны принципиальные отличия соглашений с целью снизить деградацию окружающей среды. Поскольку эмиссия CO₂ определена объёмом потребления энергии, в статье представлен анализ потребления по энергоресурсам в разрезе макрорегионов.

Ключевые слова: выбросы углекислого газа, эмиссия CO₂, потребление энергии, Киотский протокол, Парижское соглашение, Зелёная сделка

ANALYSIS OF THE ADVERSE IMPACT OF CO₂ EMISSIONS ON THE ENVIRONMENT

Valeria M. Kuzenkova

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, st. Pirogova 2, 4th year undergraduate student.e-mail: v.kuzenkova@g.nsu.ru

Vasiliy Y. Nemov

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

The article discusses the regulations governing climate policies of countries. The fundamental differences between agreements with the aim of reducing environmental degradation are described. Since CO₂ emissions are determined by the volume of energy consumption, the article presents an analysis of energy consumption in the context of macroregions

Keywords: carbon dioxide emissions, CO₂ emissions, energy consumption, Kyoto Protocol, Paris Agreement, Green Deal

Введение

Проблема глобального изменения климата с точки зрения влияния на мировую экономику представляет собой не только масштабную угрозу для природы, но и является катализатором различных изменений во многих отраслях хозяйственной деятельности. Изменение климата оказывает влияние на глобальные экономические процессы, то есть непосредственно ведёт к, неравномерно рас-

пределённым по всей территории, потерям для мировой экономики. При разработке экономической политики, следует учитывать особенности современной системы международных отношений [1].

Глобализация нежелательных природных катаклизмов, связанных с парниковым эффектом, дает повод предполагать, что при дальнейшем возрастании энергопотребления за счет сжигания органического топлива степень загрязнения атмосферы может стать критической. Это послужило причиной создания необходимого механизма для борьбы с вышеперечисленными процессами [2].

Нормативное регулирование

Первым шагом послужил *Киотский протокол* (КП) – международное соглашение, которое было принято в 1997 г. Целью которого являлось обязать развитые и развивающиеся страны, сократить или стабилизировать выбросы углерода в атмосферу [Досаев, 2012]. Был создан механизм международной торговли квотами на выбросы CO₂, который заключался в том, что участники соглашения осуществляют совместные проекты, в результате которых снижается эмиссия CO₂. Эти сокращения добавляются на счета сторон и служат выполнению их обязательств по соглашению. КП оказался не эффективным, основной проблемой которого послужил принцип общей, но не дифференцированной ответственности. Вся ответственность за снижение выбросов ложилась на страны с развитой и переходной экономикой [3].

Причины несостоятельности КП:

- Сокращение эмиссии CO₂ касалось всех отраслей промышленности, что привело бы к снижению объёмов производства и к масштабным убыткам.
- Национальные интересы для стран оказались выше наднациональных.
- Альтернативные источники не смогут удовлетворить потребность в энергии в большинстве отраслей.

В декабре 2015 года на смену Киотскому протоколу пришло *Парижское соглашение* (ПС). Концепция соглашения заключалась в самостоятельном определении собственных целей по сокращению выбросов, отталкиваясь от своих планов развития углеродоемких отраслей и экономики в целом. Основной целью о предотвращении изменения климата, в соглашении заявлено – не допустить повышения глобальной средней температуры на 2°C, а по возможности – добиться ограничения ее роста величиной 1,5°C до 2100 г. [4].

Рассмотрим итоги Парижского соглашения:

- Переход к новому международному климатическому режиму, который заключается в том, чтобы международные институты были сосредоточены на адаптации к изменениям климата.
- Достижение консенсуса мирового сообщества в необходимости перехода мировой экономики на низкоуглеродное развитие. Очевидно, что данный переход – это не обратимая тенденция [4].

Каждая из стран имеет свою стратегию развития, мотивом которой лишь отчасти послужила проблема глобального потепления. В основном они направ-

лены на снижение энергетической зависимости, формирование новых рабочих мест, сокращение локальных загрязнений. Поэтому способность приспособиться к этому будущему будет основным фактором определения конкурентоспособности каждой страны.

В настоящий момент самым активным участником Парижского соглашения является Европейский союз, который задаёт темп остальным государствам. Это обусловлено стремлением стать первым климатически нейтральным континентом, который позиционирует себя как лидер снижения деградации окружающей среды.

В 2019 г. был утверждён план действий под названием «*Европейская зелёная сделка*» с целью увеличения эффективности использования ресурсов путём перехода к чистой, круговой экономике, восстановлению биоразнообразия и снижению загрязнения окружающей среды к 2050 г.[5]. В сентябре 2020 года был представлен новый *Европейский климатический закон*. Согласно которому экономика и общество Евросоюза должны стать нейтральными с точки зрения климата к 2050 году. В свою очередь «Институты ЕС и государства-члены обязаны принять необходимые меры на уровне ЕС и на национальном уровне для достижения этой цели» [6].

В соответствии с Парижским соглашением ЕС «продолжает выполнять ведущую роль путем установленных целевых показателей» [7], путём сокращения потребления ископаемых ресурсов до полной декарбонизации энергосистем стран ЕС. Это повлияет на торговые отношения, связанные с топливом, заключаемые ЕС с внешними участниками, поскольку союз будет внедрять свои стандарты повсеместно. Также энергетические проекты станут не актуальными. Это станет причиной высокого темпа развития инновационных технологий в ЕС, которые в дальнейшем позволят стать Евросоюзу независимым лидером от стран-экспортёров карбоноёмкого топлива на глобальной арене.

Равно как и Евросоюз, достижение декарбонизации энергосистем к 2050 г. было определено для себя Японией и Южной Кореей, Китаем – к 2060 г. Что касается США, после возвращения в Парижское соглашение, сохранили намерение по «экологизации» экономики. Страна намерена возобновить работу по существующим обязательствам [8].

Российская федерация долго придерживалась «слабой» климатической политики, но в 2019 г. ратифицировала Парижское соглашение. Определяющим фактором доктрины по борьбе с глобальным изменением климата страны является план снижения к 2030 г. эмиссии CO₂ до 70% от уровня 1990 г. с учётом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем [Трифонов, 2020]. Упор делается на развитие экосистем, способных поглощать выбросы CO₂ из воздуха, а не на замещении карбоноёмких энергоносителей и развитии «чистых» технологий. Это может негативно сказаться на экономике страны, в связи с повсеместной декарбонизацией энергосистем [8].

Экономический кризис, спровоцированный пандемией COVID-19, несмотря на ожидаемое торможение, наоборот поспособствовал данному направлению. Экономика после кризиса не будет восстанавливаться по прежней мо-

дели. Момент ЕЗС для развития Европы и мира момент ЕЗС может стать драйвером изменений [5].

Анализ динамики потребления энергии по макрорегионам

Основополагающей тенденцией в усиливающейся динамике потребления является развитие экономики, которое стимулирует производство. Топливо-энергетический комплекс вносит значительный вклад в государственный бюджет добывающих стран, в связи с этим главной целью устойчивого развития представляется обеспечение непрерывного растущего спроса на энергию и одновременно сокращению количества выбросов CO₂ от ископаемых источников. К 2019 году объём выбросов достиг рекордного значения в 34 169 млн. т., что объём потребленной энергии почти в 2,5 раза. С 2010 – 2016 гг. происходит снижение скорости роста потребления и соответственно выбросов, что обусловлено введением Парижского соглашения. Прирост потребляемой энергии к 2019 г. составил 0,8 % или 278 млн. т., что на 112 млн. т. меньше прошлогоднего прироста (Рис.1). Выработка энергии, в основном осуществляется за счёт использования ископаемых источников. Из структуры потребления энергоресурсов видно (Рис. 2), что основной источник – нефть, в период с 1970–2019 гг. доля которой составляет более одной трети. Динамика с 1970–1985 гг. связана с энергетическим и нефтяным кризисом, а также с неустойчивой политической ситуацией в мире. В результате нефтяного эмбарго 1973 года цены на нефть значительно выросли, что повлекло сокращение спроса на нефть, впоследствии перепроизводство нефти повлияло на падение потребления ресурса.



Рис. 1. Соотношение выбросов и совокупной энергии

До 1985 года доля нефти составляла почти 50% всех ресурсов, а в 2019 году – 33,1%, что на 0,5% ниже 2018 г. Вторым наиболее карбоноёмким источником энергии является уголь. Доля потребления угля в структуре за весь рассматриваемый период находится на уровне одной трети от общего потребления – 27,21 %. Положительный тренд имеет динамика потребления природного газа, доля ре-

сурса в совокупной структуре потребления энергии увеличилась и к 2019 году достигла 24,2%, что на 0,4% выше 2018 г.

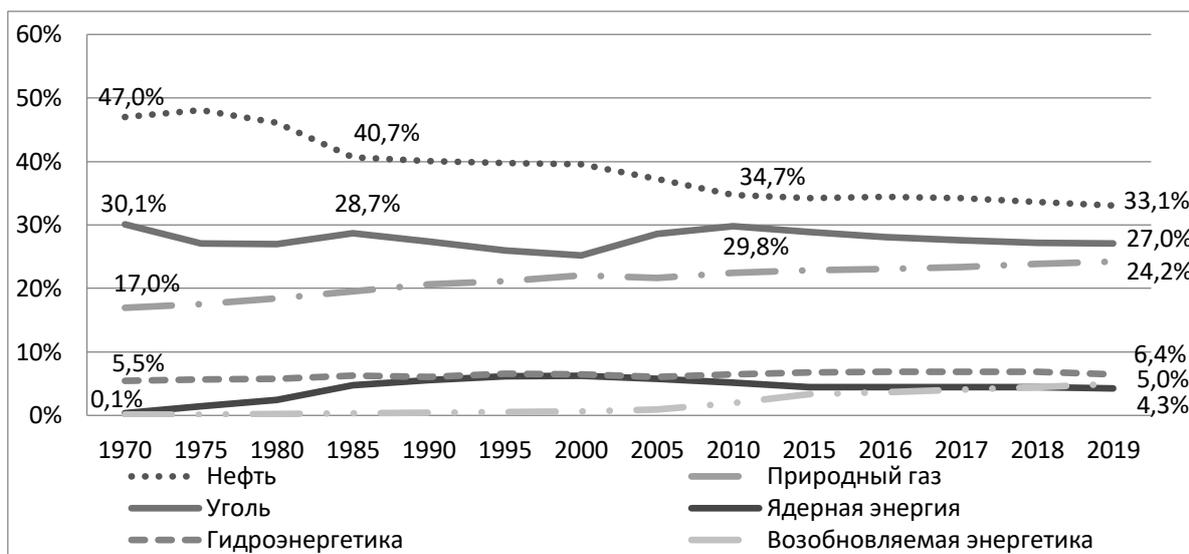


Рис. 2. Динамика потребления по источникам энергии

Для полноты анализа необходимым представляется рассмотреть структуру и динамику потребления энергии по макрорегионам (Рис. 3). Лидером потребления энергии последние 10 лет являются страны Тихоокеанского региона. Регион активно наращивает потребление и сейчас определяет почти 45% совокупного потребления. Высокий темп роста экономики Китая с 2000-х годов стимулировал спрос на энергию, производство которой обеспечивалось за счёт добычи угля, причём уголь – наиболее карбоноёмкий ископаемый энергоноситель.

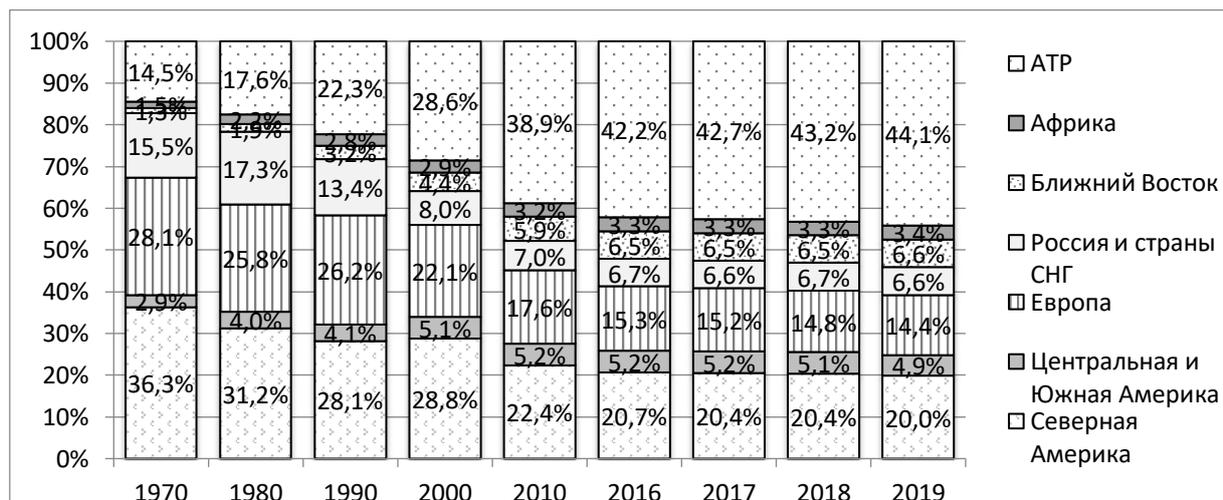


Рис.3. Региональная структура потребления энергии

Доля потребления Китая в совокупном объёме в 2019 г. составляет 24%, при этом доля угля в структуре потребления страны составила 58%, что на 1,2% ниже значения 2018 г. С 2005 г., АТР также является лидером потребления энергии от нефти. На 2019 г. доля региона составила 37%, где основные потребители - Китай(39%), Индия(14%) и Япония(11%). Значительный вклад в эмиссию CO₂ стал драйвером развития альтернативных источников энергии и увеличения использования газа в энергосистемах стран АТР, что составило 50% с 2010 г. С 2010 г. производство энергии из альтернативных источников выросло более чем в 5,5 раз, на данный момент доля которой составила 4%.

Северная Америка – второй регион по потреблению энергии, который составляет 1/5 часть совокупного объёма. В отличие от АТР, Северная Америка наоборот активно снижает потребление, что обусловлено ростом эффективности производства стран данного региона. Вторая причина - замещение потребления угля газом и альтернативными источниками. Использование газа выросло с 2005 г. на 40%. Спрос на альтернативные источники вырос примерно в 6 раз. Доля нефти находится на высоком уровне, благодаря росту спроса на нефть в США, но сдерживается снижением потребления в Мексике, что затормозило общий прирост (3% с 2000г.). В 2019 г. доля США составила 82% потребления нефти в регионе (19% в мире), 80% потребления природного газа в регионе (27% в мире), 91 % потребления угля в регионе (8 % в мире).

Европа и страны СНГ тоже снижают потребление энергии. В Европе на данный момент преобладают традиционные источники энергии: нефть(36%), газ(23%), уголь(15%). С 2005 года потребление по всем трём снизилось. Сокращение потребления угля регион компенсирует альтернативной энергетикой, которая является наиболее развитой в данном регионе. В период с 2000-2019 г. спрос на уголь упал на 32%, а производство альтернативной энергетики выросло почти в 10 раз. Особенностью потребления возобновляемой энергетики в Европе является высокая доля атомной энергетики – 10%, основной потребитель Франция(40%).

Доля стран СНГ и России снизилась почти в 3 раза с 1980г. В России уже более 30 лет преобладает потребление газа, доля которого равна более 50% с 2000 года, и продолжает расти. Россия обеспечила почти 80% потребления региона. Второй по потреблению является нефть. Значительное падение спроса на данный ресурс с 1980–2000 гг.(на 55%), за счёт перепроизводства ресурса, которое связано с нефтяным эмбарго 1973 г. и исламской революцией в Иране 1979 г. Сейчас спрос на нефть достаточно устойчив и доля ресурса в регионе сократилась на 10 п.п. Также с 2000 г. упал спрос на уголь на 17%. С 2010 г. потребление электрической и тепловой энергии на основе атомных станций возросло на 20%. В целом среднегодовой объём выработки энергии на ГЭС за период с 2010 г. вырос на 3,5% относительно среднегодовой выработки 2000–2009 гг. На долю альтернативных источников энергии приходится 0,04%, но они обладают наибольшим темпом роста. Так, с 2013г. объём потребления вырос в 2,5 раза.

Центральная и Южная Америка(ЦиЮА), Африка и Ближний восток наращивают потребление, однако они не существенны в совокупной структуре

потребления. Основной энергоноситель в ЦиЮА - нефть, доля которой составляет почти 45%. В 2015 г. потребление достигает своего пика 329 млн. т. и начинает снижаться. Сокращение спроса на нефть в данный период составило почти 4%. Основной потребитель - Бразилия (44%). Потребление угля в регионе осуществляется на очень низком уровне. Суммарное потребление в регионе не превышает и 1% от мирового уровня. На долю природного газа приходится 20,6% потребления региона. Рост спроса на ресурс соответствовал общемировым тенденциям до 2015г., после чего наметилась тенденция к сокращению потребления. В рассматриваемом регионе особенностью структуры энергоносителей является значительная доля гидроэнергетики. По объёмам потребления данный возобновляемый источник занимает второе место в регионе (24% и 17% в мире). Для развития гидроэнергетики послужило стимулом наличие большого объёма водных ресурсов и в связи с этим развития строительства генерирующих мощностей. В период 1965–2011 гг. объём потребления гидроэнергии вырос в 19 раз. За последние 20 лет потребление данной энергии выросло в 10 раз.

Доля потребления Ближнего Востока за рассматриваемый период увеличилась до 6,6%(Рис.3). За 2000-2019 гг. потребление энергии выросло более чем в 2 раза. Основные потребители - Иран (32%), Саудовская Аравия (29%). В структуре потребления преобладают нефть и природный газ, на долю которых приходится 98,3%. Регион находится на третьем месте в мире по уровню потребления нефти, его доля в региональной структуре в 2019 г. составляет 9,2 %, что на 0,4% выше предыдущего года. С момента начала промышленной добычи газа спрос на энергоресурс вырос в 3 раза. За тот же период потребление нефти увеличилось только на 66%. С 2014 г. темп прироста спроса на нефть значительно снизился и за последние два года прирост был отрицательным. Потребление угля в данном регионе очень низкое, на 2019 г. не превысило и 1%, при этом продолжает снижаться. С 2010 -2019 гг. спрос на уголь сократился почти на 20%. Совокупное потребление от альтернативных источников энергии за 2019 г. сократилось на 11%, это связано снижением потребления гидроэнергетики в Иране на 40%, который является основным потребителем гидроэнергии (70%).

Доля Африки составляет 3,4% (Рис.3). Низкое потребление энергии в данном регионе обусловлено низким уровнем жизни и слабым развитием экономики большинства стран. Однако с 2000г., потребление увеличилось почти на 70%. В данном регионе энергия обеспечивается традиционными источниками, при этом спрос на газ вырос на 56% с 2000г. и с 2012 г. ресурс стал замещать уголь в регионе. Гидроэнергетика занимает 6,5%, а на долю альтернативной энергетики приходится 1,6 % энергопотребления. Это наиболее динамично развивающийся сектор энергетики в Африке, который вырос более чем в 5 раз.

Заключение

Большинство регионов, например, Северная Америка, Европа, Россия и страны СНГ снижают потребление нефти и угля за счёт роста потребления природного газа, который обладает менее вредными свойствами относительно дру-

гих ископаемых источников. К тому же газ стал более доступен благодаря вводу новых мощностей СПГ.

Необходимым представляется развитие и увеличение доли альтернативных источников энергии, что будет способствовать повышению оптимизации потребления энергии и декарбонизации производства. Но быстро перестроиться с традиционных источников на альтернативные будет затруднительно. Совокупно доля альтернативных источников увеличилась до 5% за счёт следующих видов альтернативной энергетики: гидроэнергетика, солнечная энергетика, ядерная и ветряная. Основным является гидроэнергетика, на долю которого приходится 44% всего потребления. Несмотря на это, данный тип энергетики является менее перспективным, поскольку характеризуется высоким износом генерирующих мощностей. И в силу экономических, политических и природных условий рост данных мощностей не будет выгодным. Спрос на атомную энергетику стагнирует. Это связано с необходимостью раннего прекращения деятельности на атомных реакторах США, в силу сланцевой революции и достаточно быстрого развития новых технологий, связанных с альтернативной энергетикой. Наиболее заметное ускорение ежегодного прироста наблюдаются в ветряной и солнечной энергии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-1819.2020.6

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров И.А. Глобальное изменение климата как вызов мировой экономике и экономической науке // Экономический журнал ВШЭ. – 2013. – №3.
2. Макаров И.А. Международное регулирование выбросов парниковых газов в атмосферу Земли: Киотский протокол // Глобальные институты регулирования / Под ред. В.Н. Зуева. М.: Магистр, 2016 б. С. 436–454.
3. Макаров И. А., Степанов И. А. Парижское соглашение по климату: влияние на мировую энергетику и вызовы для России // АПЕ. 2018. №1.
4. Досаев Н. Т. Киотский протокол как фактор стабилизации экологической ситуации в энергетике // Российское предпринимательство. – 2012. – №14.
5. Трифонова И. А. Подходы к реализации первых этапов Парижского соглашения // Образование и право. – 2020. – №12. – С. 329-332.
6. The European Green Deal (Европейская зеленая сделка) // Официальный сайт Европейской Комиссии, URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
7. European Climate Law (Европейский климатический закон). // Официальный сайт Европейской Комиссии. 2020. URL: [European Climate Law Climate Action \(europa.eu\)](https://european-climate-law-climate-action.europa.eu)
8. Paris agreement (Парижское соглашение) // Официальный сайт ООН. URL: [adoption of the Paris agreement - Paris Agreement text English \(unfccc.int\)](https://unfccc.int/paris_agreement).

REFERENCES

1. Makarov I.A. Global'noe izmenenie klimata kak vyzov mirovoj ekonomike i ekonomicheskoy nauke // Ekonomicheskij zhurnal VSHE. – 2013. – №3.
2. Makarov I.A. Mezhdunarodnoe regulirovanie vybrosov parnikovyh gazov v atmosferu Zemli: Kiotskij protokol // Global'nye instituty regulirovaniya / Pod red. V.N. Zueva. M.: Magistr, 2016 b. S. 436–454.

3. Makarov I. A., Stepanov I. A. Parizhskoe soglashenie po klimatu: vliyanie na mirovuyu energetiku i vyzovy dlya Rossii // APE. 2018. №1.
4. Dosaev N. T. Kiotskij protokol kak faktor stabilizacii ekologicheskoy situacii v energetike // Rossijskoe predprinimatel'stvo. – 2012. – №14.
5. Trifonova I. A. Podhodu k realizacii pervuh etapov Parizhskogo soglasheniya // Obrazovanie i pravo. – 2020. – №12. – P. 329-332.
6. The European Green Deal (Evropejskaya zelenaya sdelka) // Oficial'nyj sajt Evropejskoj Komissii, URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
7. European Climate Law (Evropejskij klimaticeskij zakon). // Oficial'nyj sajt Evropejskoj Komissii. 2020. URL: European Climate Law Climate Action (europa.eu)
8. Paris agreement (Parizhskoe soglashenie) // Oficial'nyj sajt OON. URL: adoption of the Paris agreement - Paris Agreement text English (unfccc.int).

© *B. M. Кузенкова, В. Ю. Немов, 2021*

АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕГИОНОВ РЕСУРСНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПАНЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Дарья Сергеевна Милосердова

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, студент, тел. (905)9068405, e-mail: dsmloserdova@mail.ru

Ирина Викторовна Проворная

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Проспект ак. Коптюга, 3, к.э.н., с.н.с, тел. 8(383)333-28-14, e-mail: provornayaiv@gmail.com

В работе проводится исследование влияния ресурсного статуса регионов на формирование бюджета страны на основе анализа социально-экономических показателей с помощью инструментов модели панельных данных. В статье проведен обзор российской и зарубежной литературы, систематизированы методические подходы к понятию «ресурсного региона», а также определены наиболее существенные факторы, которые оказывают воздействие на социально-экономическую жизнь каждого региона, где ВРП был выбран в качестве зависимой переменной. В результате работы было показано, как характеристики регионов меняются от их принадлежности.

Ключевые слова: ресурсные регионы, валовый региональный продукт, формирование бюджета, панельные данные

ANALYSIS OF ECONOMIC INDICATORS OF RESOURCE-TYPE REGIONS BASED ON THE PANEL DATA MODEL

Darya S. Miloserdova

Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Faculty of Economics Student, phone: (905)9068405, e-mail: dsmloserdova@mail.ru

Irina V. Provornaya

Institute of petroleum Geology and Geophysics. A. A. Nikolay, SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, PR. AK. Koptuyuga 3, candidate of economic Sciences, senior researcher, tel. 8-(383)-333-28-14, e-mail: ProvornayaIV@gmail.com

The article studies the influence of the resource status of regions on the formation of the country's budget based on the tools of the panel data model. The article reviews the Russian and foreign literature, systematizes methodological approaches to the concept of "resource-type region", and identifies the most significant factors that affect the socio-economic life of the regions where GRP was selected as a dependent variable. As a result of the work, it was shown how the characteristics of the regions change depending on their affiliation.

Keywords: resource-type region, gross regional product, budget formation, panel data

Введение

Актуальность темы основывается на том, что Россия является одной из крупнейших стран, чья территория богата природными ресурсами. Анализ экономических показателей регионов нашей страны в полной мере может отразить влияние нефтегазового комплекса на экономическое положение страны и разви-

тие отраслей экономики. Существующая дифференциация в распределении природных ресурсов по регионам страны может являться причиной неравномерности развития регионов, которые богаты полезными ископаемыми, и регионов, которые ими обделены. Целью исследования является изучение влияния ресурсного статуса регионов на формирование бюджета страны на основе анализа социально-экономических показателей с помощью инструментов модели панельных данных.

Определение региона ресурсного типа относительно слабо изучено в литературе. В трудах многих отечественных и зарубежных исследователей поставлены проблемы ресурсной экономики и ресурсных регионов, которые актуальны и сегодня. В результате проведения анализа литературы по этой теме в работе выделяется классификация регионов ресурсного типа с качественной и количественной стороны (табл. 1).

Исходя из такой классификации, в этой работе при рассмотрении ресурсных регионов будем придерживаться количественной составляющей, т.к. большинство авторов отдают предпочтение именно этому способу, также преимуществом этого способа является точность исследования. Таким образом, мы будем понимать в исследовании под ресурсными регионами регионы с большими показателями добычи полезных ископаемых, долей НДПИ и долей валовой добавленной стоимости в структуре ВРП.

Таблица 1

Классификация определений к понятию ресурсного региона

Тип	Описание ресурсного региона	Работы/публикации
Количественный	Доля валовой добавленной стоимости по добыче полезных ископаемых в структуре ВРП на уровне 10,5-10,8% и выше; более 50% отгруженной продукции региона составляют полезные ископаемые; большие показатели добычи нефти и газа; значительная доля рабочих в горнодобывающей промышленности; налоговые поступления в бюджет региона более 50%	С.В. Белоусова [1], Н.Н. Михеева [2], В.П. Орлов [3], Р. Оти [4], Л.А. Толстолесова [5], Джеффри Д. Сакс, Эндрю М. Уорнер [6], Ying Fang, Li Qi, Yang Zhao [7]
Качественный	Рассматривается анализ воздействия ресурсного богатства на темп инфляции, дефицит бюджета, накопление иностранных инвестиций; экономика региона основывается на экспортно-ориентированной и добывающей отрасли; большая степень ресурсной зависимости экономики от добывающего сектора; характеризуются высоким «уровнем обеспеченности региона ресурсно-сырьевым потенциалом»	В. Полтерович, В. Попов, А. Тонис [8], С. Н. Левин [9], Курбатова М. В., Левин С. Н., Каган Е. С., Кислицын Д. В [10], Польшин А.О [11]
Смешанный	Объединяют характеристики качественной и количественной классификации.	Е.С. Каган, Е.В. Гоосен [12], Крюков В. А., Севастьянова А. Е., Токарев А. Н., Шмат В. В. [13], О.А. Ломовцева [14]

Методы и материалы

В статье проводится исследование 85 регионов России за период 2006-2019 гг. Для разделения регионов на группы проводится кластерный анализ. Кластерный анализ - способом разбиения объектов, который основывается на представлении итогов наблюдений точками геометрического пространства с выделением в последующем групп – кластеров. В качестве метода анализа используется евклидово расстояние, так как данный метод точнее всего распределяет объекты в кластеры. В качестве алгоритма был выбран метод Уорда для предоставления кластеров нормального размера. В качестве данных для кластеризации были взяты приведенные выше показатели, характеризующие ресурсные регионы.

В результате кластерного анализа было получено 4 группы регионов: нефтегазовые ресурсные регионы лидеры (обладают большими объемами добычи нефти и газа), углеводородные ресурсные регионы (отличаются большими запасами нефти и газа, относительно высокими показателями НДПИ и доли добавленной стоимости в структуре ВРП), неуглеводородные ресурсные регионы (характеризуются большой долей добавленной стоимости в структуре ВРП и низким показателем НДПИ) и нересурсные регионы.

К регионам первой группы относятся Ханты-Мансийский автономный округ (преимущественно добыча нефти) и Ямало-Ненецкий автономный округ (добыча газа). Наиболее перспективными регионами добычи нефти признаются Сибирский (Иркутская область, Красноярский край) и Дальневосточный федеральные округа (Республика Саха (Якутия), Сахалинская область), также особое внимание привлекают шельфовые зоны (Сахалинская область с шельфом). В структуре регионов более 80% газа добываются на территории Западной, остальные 20% распределены в Восточной Сибири, Дальнем Востоке и в европейской части России. Такие регионы добычи нефти и газа вошли в число углеводородного ресурсного кластера.

Следующим этапом исследования является изучение влияния ресурсного статуса регионов на формирование бюджета страны с помощью инструментов модели панельных данных. В качестве эндогенной переменной, характеризующей уровень экономического развития региона, был рассмотрен *валовой региональный продукт (ВРП)*. Наиболее существенные факторы, которые могут оказывать воздействие на социально-экономическую жизнь регионов, были определены в ходе анализа литературы и разделены на группы (Табл. 2).

Также предлагаем в качестве ресурсных факторов включить в рассмотрение налог на добычу полезных ископаемых (МЕТ), который в полной мере сможет охарактеризовать ресурсный потенциал региона.

В статье оценивается панельная модель следующего вида:

$$GRP_{it} = \alpha + X_{it}^T \beta + u_{it},$$

где i - номер объекта (пространственная составляющая), t – время (составляющая временных рядов), α - свободный член, β - вектор коэффициентов, X_{it}^T - вектор-строка матрицы K объясняющих переменных, а u_{it} является однокомпонентной моделью ошибки.

Выбор факторов для проведения панельного анализа

Группа Факторов	Фактор (обозначение)	Описание фактора	Работы
Инвестиционные	Инвестиции в основной капитал (InFC)	Представляют собой совокупность расходов, направленных на строительные работы, реконструкцию и сооружение основных фондов.	Панкова С.В., Цыпин А.П. [15]; Селиверстова Т.П., Кузьмин П.И., Селиверстов С.И., Шаповалова С.В. [16]
	Поступление прямых иностранных инвестиций (FDI)	Инвестиции из других стран, которые направлены на долговременный контроль над хоз. операциями.	Кудымов В.М. [17]
Производственные	Основные фонды в экономике (ФА)	Основные фонды представляют собой средства производства, которые функционируют много лет и частями переносят свою стоимость на готовые изделия.	Айвазян С.А., Афанасьев М.Ю., Кудров А.В [18]; Горидько Н.П., Рослякова Н.А. [19] ; Пьянкова А.В., Дорохова Е.И.[15] ; Селиверстова Т.П., Кузьмин П.И., Селиверстов С.И., Шаповалова С.В. [16]
	Индекс промышленного производства (IPI)	Показывает динамику объема промышленного производства, рассчитывается как отношение текущего объема производства к объему базисного года.	Бакуменко Л.П., Костромина Е.В. [20]; Волкова Е.Н., Карманов М.В. [21]; Климова Н.И., Гафарова Е.А. [22]
Торгово-ценовой	Оборот розничной торговли (RTT)	Представляет собой доходы от продажи товаров населению для личного потребления или использования в домашнем хозяйстве.	Бакуменко Л.П., Костромина Е.В.; [20] Волкова Е.Н., Карманов М.В. [21]; Климова Н.И., Гафарова Е.А. [22]
Человеческие	Среднегодовая численность занятых (NofPE)	Определяется суммированием среднесписочной численности работников и делением полученной суммы на 12.	Айвазян С.А., Афанасьев М.Ю., Кудров А.В [18]; Горидько Н.П., Рослякова Н.А. [19]; Пьянкова А.В., Дорохова Е.И. [15]; Климова Н.И., Гафарова Е.А. [22]; Волкова Е.Н., Карманов М.В. [21]; Ивченко Ю.С. [23]
	Среднемесячная номинальная начисленная з/п (AmNS)	Рассчитывается с помощью отношения фонда начисленной з/п к среднесписочной численности работников с учетом количества месяцев в отчетном периоде.	Климова Н.И., Гафарова Е.А. [22]; Панкова С.В., Цыпин А.П. [15]; Селиверстова Т.П., Кузьмин П.И., Селиверстов С.И., Шаповалова С.В. [16]
Транспортный	Густота железнодорожных путей общего пользования (DRw)	Плотность ж/д путей на 10000 кв.км.. Влияет на доступность и сформированность транспортной сети, является основополагающим фактором, определяющим развитость предпринимательской деятельности.	Линева Е.Л., Нотченко В.В. [24]; Горидько Н.П., Рослякова Н.А. [19]
Фискальный	Доходы консолидированного бюджета РФ (CBR)	Включает налоги и сборы, устанавливаемые Налоговым кодексом Российской Федерации и обязательные к уплате на всей территории Российской Федерации	Кудымов В.М. [17]

Составлено по: Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://www.gks.ru> (дата обращения: 02.04.2021).

Были рассмотрены три типа моделей для трех групп регионов (ресурсные регионы-лидеры были отнесены к углеводородным): общая модель регрессии, модель с фиксированными эффектами, модель со случайными эффектами. Выбор наилучшей модели проводился с помощью тестов Вальда, Хаусмана, Бройша-Пагана.

Результаты и обсуждение

В результате исследования были выбраны наилучшие модели для каждой группы регионов: для углеводородных и неуглеводородных ресурсных регионов значимыми оказались модели со случайными эффектами, для нересурсных регионов – с фиксированными временными эффектами. Результаты оформлены в таблицу (табл. 3):

Таблица 3

Результаты анализа панельных данных

Фактор	Углеводородные ресурсные регионы		Неуглеводородные ресурсные регионы		Нересурсные регионы	
	Коэфф.	t-стат.	Коэфф.	t-стат.	Коэфф.	t-стат.
MET	0.00099***	0.00005	-	-	-	-
IinFC	0.62***	0.11	-	-	0.31***	0.08
RTT	0.82***	0.11	1.64***	0.11	0.71***	0.06
FA	-	-	-	-	0.05***	0.00
AmNS	3.62***	0.86	-	-	-	-
FDI	-	-	-	-	9.20*	3.89
CBR	3.27***	0.33	2.58***	0.31	3.86***	0.28
const	-123366.84	30127.1	-32671.45	15780.45	-104495.4	8355.07
R ² , %	95		94		94	

Составлено по: Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://www.gks.ru> (дата обращения: 02.04.2021); Федеральная налоговая служба. URL: <https://www.nalog.ru> (дата обращения: 02.04.2021).

Примечание: *** - значим на уровне 0,001, * - значим на уровне 0,05.

Важно отметить, что углеводородные ресурсные регионы характеризуются зависимостью ВРП от НДПИ. является основным элементом системы налогообложения природных ресурсов, и зависимость регионального продукта от этого показателя может свидетельствовать о пополнении бюджета в большей степени от нефтегазовых доходов. Такая зависимость обуславливает особое внимание государства к устойчивому развитию регионов этой группы, которое выражается в виде различных субсидий, льгот, а также инвестиций в промышленность, на которой специализируется данный кластер.

Как отмечалось выше, неуглеводородные регионы характеризуется низким показателем НДПИ, и на первоначальном этапе он был исключен из рассмотрения по причине слабой зависимости ВРП от этого показателя.

Региональный продукт углеводородных и неуглеводородных регионов находится в зависимости от оборота розничной торговли и показателя доходов

консолидированных бюджетов. Появление показателя оборота розничной торговли не кажется удивительным, так как эти группы регионов характеризуются развитой добывающей и обрабатывающей промышленностью.

Нересурсные регионы отличаются зависимостью ВРП от показателя основных фондов, причиной такого воздействия является высокая фондоемкость производства (регионы характеризуются наличием важных отраслей экономики – пищевая, легкая, деревообрабатывающая, машиностроение и др.). Прослеживается влияние отечественных и иностранных инвестиций, что оказывает положительный эффект на уровень развития нересурсных регионов.

Региональный продукт всех кластеров формируется за счет поступления доходов в консолидированные бюджеты, что еще раз подчеркивает фискальный фактор образования ВРП.

Заключение

В результаты работы можно сделать вывод, что формирование валового регионального продукта меняется в зависимости от принадлежности к группе регионов. Ресурсным углеводородным регионам свойственна ресурсная составляющая в формировании регионального продукта. Исходя из этого можно сказать, что развитие нефтегазового сектора может обусловить еще большую зависимость бюджета страны от нефтегазовых доходов, а колебания цен на энергоресурсы могут привести к негативным последствиям для экономики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ-2571.2020.6

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусова С.В. Ресурсные регионы: экономические возможности и финансовая справедливость // ЭКО. – 2015. – № 6 (492). – С. 40-48.
2. Михеева Н.Н. Двухсекторная модель развития ресурсодобывающих регионов // Регион: экономика и социология. – 2009. – № 2. – С. 23-42.
3. Орлов В.П. Минерально-сырьевой комплекс в долгосрочной стратегии развития экономики России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2007. – № 2. – С. 2-3.
4. Оти Р. Устойчивое развитие в экономике минеральных ресурсов: Тезис о Ресурсном проклятии / Лондон: Рутледж, 1993.
5. Толстосоева Л.А. Финансово-инвестиционные ресурсы развития территорий сырьевой специализации // Финансово-кредитная система. – 2017. – С. 189-192.
6. Сакс Д.Д., Уорнер Э.М. Изобилие национальных ресурсов и экономический рост // Национальное бюро экономических исследований, Рабочий документ 5398. 1995.
7. Ин Фан, Ли Ци, Ян Чжао. Пересмотр "Проклятия ресурсов": Другая история из Китая // Китайское экономическое обозрение. – 2012. – 23(3).
8. Полтерович В., Попов В., Тонис А. Механизмы «ресурсного проклятия» и экономическая политика // Вопросы экономики. – 2007. – № 6. – С. 9.
9. Левин С.Н. Регионы «ресурсного типа» в современной российской экономике // Журнал институциональных исследований. – 2015. – Т. 7. – № 3. – С. 92-101.

10. Курбатова М.В., Левин С.Н., Каган Е.С., Кислицын Д.В. Регионы ресурсного типа в России: определение и классификация // *Terra Economicus*. – 2019. – 17(3). – С. 89–106.
11. Полынев А.О. Конкурентные возможности регионов. Методология исследования и пути ее повышения. / М.: КРАСАНД, 2010. – 208 с.
12. Каган Е.С., Гоосен Е.В. К вопросу об идентификации регионов ресурсного типа // Институциональная трансформация экономики: пространство и время. Сборник докладов V Международной научной конференции: в 2-х томах. Кемерово: Кемеровский государственный университет. – 2017. – С. 57-64.
13. Крюков В. А., Севастьянова А.Е., Токарев А.Н., Шмат В. В. Эволюция подходов к анализу альтернатив развития регионов ресурсного типа // *Материалы Международной конференции «Пространственный анализ социально-экономических систем: история и современность»*, посвященной 80-летию со дня рождения академика А. Г. Гранберга. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН. – 2017. – С. 39-51.
14. Ломовцева О. А. Совокупный ресурсный потенциал региона: методология определения и измерения // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*. – 2012. – №1-1 (120).
15. Панкова С.В., Цыпин А.П. Моделирование влияния социально-экономических факторов на валовой региональный продукт // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2015. – № 45. – С. 2–14.
16. Селиверстова Т.П., Кузьмин П.И., Селиверстов С.И., Шаповалова С.В. Анализ факторов роста ВРП Алтайского края с помощью эконометрических моделей // *Управление экономическими системами: электронный научный журнал*. – 2017. – № 5(99).
17. Кудымов В.М. Взаимосвязь социально-экономических процессов с показателем ВРП // *Региональная экономика: теория и практика*. – 2007. – С. 42-51.
18. Айвазян С.А., Афанасьев М.Ю., Кудров А.В. Модели производственного потенциала и оценки технологической эффективности регионов РФ с учетом структуры производства // *Экономика и математические методы*. – 2016. – Т. 52. – № 1. – С. 28–44
19. Горидько Н.П., Рослякова Н.А. Факторы развития российских регионов: роль инноваций и транспортной инфраструктуры: монография. Под ред. Р.М. Нижегородцева. / М.: Национальный институт бизнеса, 2014. – 440 с.
20. Бакуменко Л.П., Костромина Е.В. Эконометрическое моделирование экономического роста республики Марий Эл // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. – 2016. – № 12. – С. 30–36.
21. Волкова Е.Н., Карманов М.В. Моделирование социально-экономического развития регионов // *Статистика и Экономика*. – 2016. – № 3. – С. 55–59.
22. Климова Н.И., Гафарова Е.А. Выбор параметров управления экономикой региона с использованием моделей панельных данных // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2016. – № 1 (448). – С. 183–196.
23. Ивченко Ю.С. Определение основных факторов уровня валового регионального продукта методами эконометрического моделирования по совокупности регионов Российской Федерации // *Статистика и экономика*. – 2019. – Т. 16. – №6. – С. 4-17.
24. Линева Е.Л., Нотченко В.В. Оценка состояния транспортной инфраструктуры региона как необходимого условия развития предпринимательства // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. – 2015. – №1 (211). – С. 172-181.
25. Пьянкова А.В., Дорохова Е.И. Методические подходы к оценке влияния отдельных факторов на состояние и тенденции социально-экономического развития региона // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 5. – С. 386–394.

REFERENCES

1. Belousova S.V. Resursnye regiony: ekonomicheskie vozmozhnosti i finansovaya spravedlivost' // *ЕКО*. – 2015. – № 6 (492). – С. 40-48.

2. Miheeva N.N. Dvuhsektornaya model' razvitiya resursodobyvayushchih regionov // Region: ekonomika i sociologiya. – 2009. – № 2. – S. 23-42.
3. Orlov V.P. Mineral'no-syr'evoj kompleks v dolgosrochnoj strategii razvitiya ekonomiki Rossii // Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie. – 2007. – № 2. – S. 2-3.
4. Oti R. Ustojchivoe razvitie v ekonomike mineral'nyh resursov: Tezis o Resursnom proklyatii / London: Rutledzh, 1993.
5. Tolstosoeva L.A. Finansovo-investicionnye resursy razvitiya territorij syr'evoj specializacii // Finansovo-kreditnaya sistema. – 2017. – S. 189-192.
6. Saks D.D., Uorner E.M. Izobilie nacional'nyh resursov i ekonomicheskij rost // Nacional'noe byuro ekonomicheskikh issledovanij, Rabochij dokument 5398. 1995.
7. In Fan, Li Ci, YAn CHzhao. Peresmotr "Proklyatiya resursov": Drugaya istoriya iz Kitaya // Kitajskoe ekonomicheskoe obozrenie. – 2012. – 23(3).
8. Polterovich V., Popov V., Tonis A. Mekhanizmy «resursnogo proklyatiya» i ekonomicheskaya politika // Voprosy ekonomiki. – 2007. – № 6. – S. 9.
9. Levin S.N. Regiony «resursnogo tipa» v sovremennoj rossijskoj ekonomike // ZHurnal institucional'nyh issledovanij. – 2015. – T. 7. – № 3. – S. 92-101.
10. Kurbatova M.V., Levin S.N., Kagan E.S., Kislicyn D.V. Regiony resursnogo tipa v Rossii: opredelenie i klassifikaciya // Terra Economicus. – 2019. – 17(3). – S. 89–106.
11. Polynev A.O. Konkurentnye vozmozhnosti regionov. Metodologiya issledovaniya i puti ee povysheniya. / M.: KRASAND, 2010. – 208 s.
12. Kagan E.S., Goosen E.V. K voprosu ob identifikacii regionov resursnogo tipa // Institucional'naya transformaciya ekonomiki: prostranstvo i vremya. Sbornik dokladov V Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii: v 2-h tomah. Kemerovo: Kemerovskij gosudarstvennyj universitet. – 2017. – S. 57-64.
13. Kryukov V. A., Sevast'yanova A.E., Tokarev A.N., SHmat V. V. Evolyuciya podhodov k analizu al'ternativ razvitiya regionov resursnogo tipa // Materialy Mezhdunarodnoj konferencii «Prostranstvennyj analiz social'no-ekonomicheskikh sistem: istoriya i sovremennost'», posvyashchennoj 80-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A. G. Granberga. Novosibirsk: IEOPP SO RAN. – 2017. – S. 39-51.
14. Lomovceva O. A. Sovokupnyj resursnyj potencial regiona: metodologiya opredeleniya i izmereniya // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. – 2012. – №1-1 (120).
15. Pankova S.V., Cypin A.P. Modelirovanie vliyaniya social'no-ekonomicheskikh faktorov na valovoj regional'nyj produkt // Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika. – 2015. – № 45. – S. 2–14.
16. Seliverstova T.P., Kuz'min P.I., Seliverstov S.I., SHapovalova S.V. Analiz faktorov rosta VRP Altajskogo kraja s pomoshch'yu ekonometricheskikh modelej // Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyj nauchnyj zhurnal. – 2017. – № 5(99).
17. Kudymov V.M. Vzaimosvyaz' social'no-ekonomicheskikh processov s pokazatelem VRP // Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika. – 2007. – S. 42-51.
18. Ajvazyan S.A., Afanas'ev M.YU., Kudrov A.V. Modeli proizvodstvennogo potenciala i ochenki tekhnologicheskoy effektivnosti regionov RF s uchetom struktury proizvodstva// Ekonomika i matematicheskie metody. – 2016. – T. 52. – № 1. – S. 28–44
19. Gorid'ko N.P., Roslyakova N.A. Faktory razvitiya rossijskih regionov: rol' innovacij i transportnoj infrastruktury: monografiya. Pod red. R.M. Nizhegorodceva. / M.: Nacional'nyj institut biznesa, 2014. – 440 s.
20. Bakumenko L.P., Kostromina E.V. Ekonometricheskoe modelirovanie ekonomicheskogo rosta respubliki Marij El // Intellekt. Innovacii. Investicii. – 2016. – № 12. – S. 30–36.
21. Volkova E.N., Karmanov M.V. Modelirovanie social'no-ekonomicheskogo razvitiya regionov // Statistika i Ekonomika. – 2016. – № 3. – S. 55–59.

22. Klimova N.I., Gafarova E.A. Vybor parametrov upravleniya ekonomikoj regiona s ispol'zovaniem modelej panel'nyh dannyh // Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika. – 2016. – № 1 (448). – S. 183–196.

23. Ivchenko YU.S. Opredelenie osnovnyh faktorov urovnya valovogo regional'nogo produkta metodami ekonometricheskogo modelirovaniya po sovokupnosti regionov Rossijskoj Federacii // Statistika i ekonomika. – 2019. – T. 16. – №6. – S. 4-17.

24. Lineva E.L., Notchenko V.V. Ocenka sostoyaniya transportnoj infrastruktury regiona kak neobhodimogo usloviya razvitiya predprinimatel'stva // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki. – 2015. – №1 (211). – S. 172-181.

25. P'yankova A.V., Dorohova E.I. Metodicheskie podhody k ocenke vliyaniya otдел'nyh faktorov na sostoyanie i tendencii social'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 5. – S. 386–394.

© Д. С. Милосердова, И. В. Проворная, 2021

ДИНАМИКА ДОБЫЧИ НЕФТИ ИЗ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ В РОССИИ

Михаил Владимирович Мишенин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.э.н., с.н.с., e-mail: MisheninMV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент каф. Политической экономики.

В статье выполнено комплексное исследование современного состояния и перспектив развития трудноизвлекаемых запасов. Рассмотрена роль трудноизвлекаемых запасов в структуре сырьевой базы нефти по категориям запасов и федеральным округам, а также на шельфе Российской Федерации. Выполнен анализ общеотраслевых тенденций воспроизводства минерально-сырьевой базы с дифференциацией по месторождениям и компаниям-недропользователям. Исследованы вопросы современного состояния объёма финансирования геологоразведочных работ и стоимость подготовки запасов углеводородов. Проанализирована динамика распределение извлекаемых запасов нефти, объёмов и эффективность геологоразведочных работ на месторождениях, открытых за последние годы. Исследована характеристика и динамика добычи отдельных категорий трудноизвлекаемой нефти по регионам.

Ключевые слова: трудноизвлекаемые запасы, воспроизводство запасов, Восточная Сибирь, баженовская свита, тюменская свита, битуминозная нефть, высокосернистая нефть, низкопроницаемые коллектора, сверхвязкая нефть

DYNAMICS OF OIL PRODUCTION FROM HARD RESERVES IN RUSSIA

Mikhail V. Mishenin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., PhD, Senior Researcher, e-mail: MisheninMV@ipgg.sbras.ru
Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, st. Pirogova 2, associate professor of the department. Political economy.

The article presents a comprehensive study of the current state and development prospects of hard-to-recover reserves. The role of hard-to-recover reserves in the structure of the crude oil base by categories of reserves and federal districts, as well as on the shelf of the Russian Federation is considered. The analysis of industry-wide trends in the reproduction of the mineral resource base with differentiation by deposits and companies-subsoil users is carried out. The issues of the current state of the volume of financing for geological exploration and the cost of preparing hydrocarbon reserves have been investigated. The dynamics of the distribution of recoverable oil reserves, volumes and efficiency of geological exploration at fields discovered in recent years have been analyzed. The characteristics and dynamics of production of certain categories of hard-to-recover oil by region have been investigated.

Keywords: hard-to-recover reserves, replacement of reserves, Eastern Siberia, Bazhenov formation, Tyumen formation, bituminous oil, high-sulfur oil, low-permeability reservoirs, super-viscous oil

Устойчивость работы добывающих отраслей в значительной мере зависит от объёмов подготовки и качества минерально-сырьевой базы (МСБ), параметров процесса воспроизводства запасов. Однако в последние десятилетия в России наблюдается устойчивое ухудшение качественных и горно-геологических характеристик сырьевой базы [1]. Стратегически важным для инновационного развития РФ является разработка и освоение трудноизвлекаемых запасов нефти.

Динамика добычи нефти из трудноизвлекаемых запасов в России

Битуминозная нефть

Одной из важных характеристик качества нефти, оказывающих принципиальное влияние на эффективность её извлечения является плотность. В зависимости от плотности нефть можно классифицировать на группы: легкая (0,831–0,850 г/куб. см), средняя (0,851–0,870 г/куб. см), тяжелая (0,871–0,895 г/куб. см) и битуминозная с плотностью более 0,895 г/куб. см.

Наиболее известные примеры освоения битуминозной нефти в мире связаны с разработкой битуминозных песков на площади Атабаски в Канаде и в районе реки Ориноко в Венесуэле. Развитие технологий добычи битуминозной нефти до уровня, обеспечивающего рентабельную разработку, позволили Канаде в 1999 г. увеличить запасы нефти в 2,6 раза и стать второй страной в мире после Саудовской Аравии по этому показателю. А после переоценки запасов в период 2005–2010 гг. Венесуэлла увеличила запасы битуминозной нефти в 4 раза и до настоящего времени остаётся первой страной в мире по этому показателю (BP Statistical Review of World Energy).

Добыча битуминозной нефти в России в 2019 г. составила 75,8 млн т, или 14,3 %, от общего уровня добычи нефти в России. Объем добычи битуминозной нефти увеличился за последние пять лет на 15,2 млн т, или более чем на 25 %, а доля в структуре добычи нефти по стране в целом выросла с 12,1 до 14,3 % за соответствующий период (рис. 1).

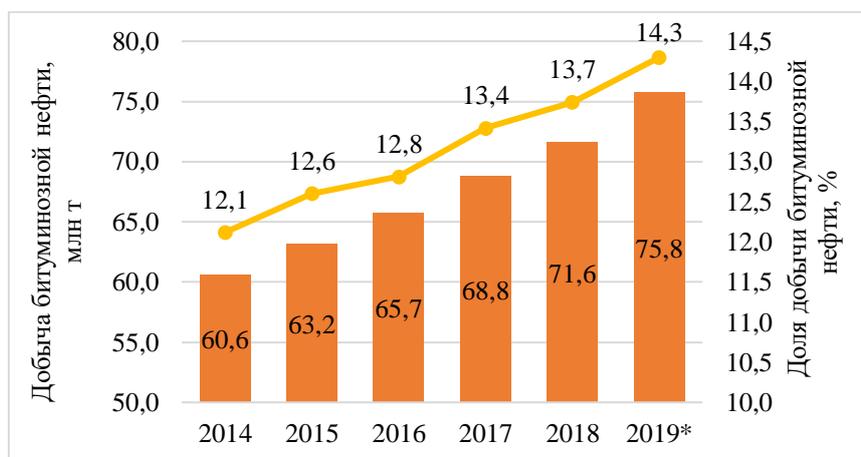


Рис. 1. Объем добычи битуминозной нефти (плотность более 0,895 г/куб. см), млн т

В региональной структуре большой объём битуминозной нефти добывается в Приволжском федеральном округе – 35,7 млн т (47,1 %), а также Уральском – 13,5 млн т (17,9 %) и Сибирском – 13,2 млн т (17,4 %) федеральных округах.

В Приволжском федеральном округе основной вклад в добычу битуминозной нефти вносит Республика Татарстан – 19,1 млн т, или более половины в республике. Нефть этой категории добывается преимущественно на Ромашкинском, Ново-Елховском, Ашальчинском и Соколкинском месторождениях [4].

В Уральском федеральном округе добыча битуминозной нефти ведётся в основном в Ханты-Мансийском автономном округе – 7,7 млн т, преимущественно с месторождений Лянторское, Федоровское и Вачимское. Также значительный вклад вносит Ямало-Ненецкий автономный округ, где добывается 5,8 млн т битуминозной нефти на Восточно-Мессояхском нефтегазоконденсатном месторождении.

В Сибирском федеральном округе почти вся битуминозная нефть добывается в Красноярском крае – 13,2 млн т, преимущественно на Ванкорском нефтяном месторождении (рис. 2).

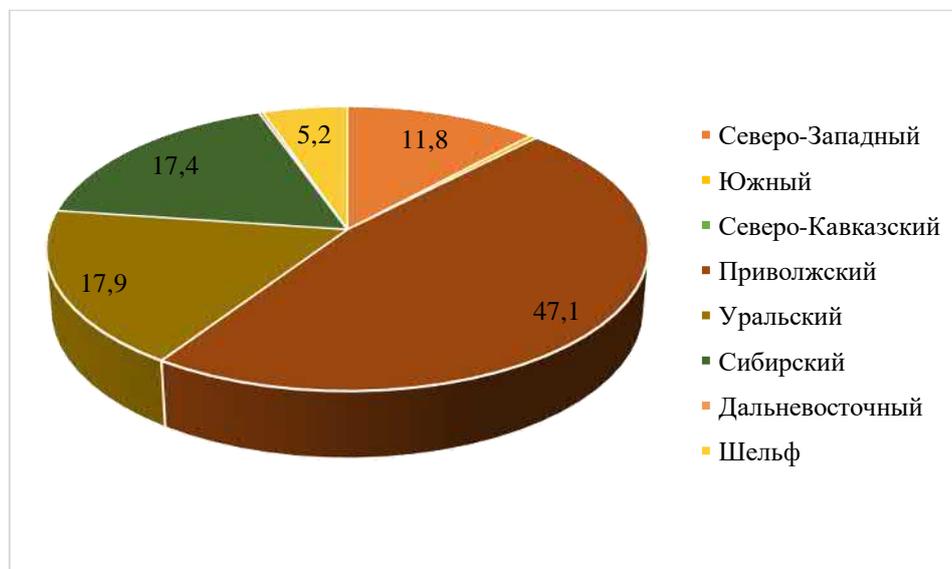


Рис. 2. Распределение добычи битуминозной нефти (плотность более 0,895 г/куб. см) по федеральным округам, %

Сверхвязкая нефть

Вязкостная характеристика нефти имеет большое значение при обосновании выбора метода добычи, способа транспортировки и технологии переработки нефти. В зависимости от вязкости нефть классифицируется на группы: с незначительной вязкостью (менее 0,5 мПа·с), маловязкая (5,1–10,0 мПа·с) с повышенной вязкостью (10,1–30,0 мПа·с), высоковязкая (30,1–200 мПа·с), сверхвязкая (более 200 мПа·с).

Нефть с вязкостью более 10 000 мПа·с относится к природным битумам, которые принято называть нетрадиционными углеводородами. В основном добыча сверхвязкой нефти связана с применением технологий термического (в том

числе парового) и химического воздействия на пласт, внутрислоевого горения и других методов, направленных на повышение текучести нефти и её притока к добывающим скважинам.

По этой качественной характеристике нефти при расчёте налога на добычу полезных ископаемых (НДПИ) предусмотрены существенные льготы. Коэффициент, характеризующий регион добычи и свойства нефти (K_{KAN}), принимается равным 0 в отношении сверхвязкой нефти (более 200 мПа·с и менее 10 000 мПа·с). Также при добыче нефти с вязкостью более 10 000 мПа·с уменьшается в 10 раз коэффициент, учитывающий влияние экспортной пошлины на нефть (K_{MAN}).

Добыча сверхвязкой нефти в России в 2019 г. составила 10,9 млн т, или 2,1 %, от общего уровня добычи нефти в России. Объем добычи сверхвязкой нефти увеличился за последние пять лет на 3,9 млн т, или более чем на 50 %, а доля в структуре добычи нефти по стране в целом выросла с 1,4 до 2,1 % за соответствующий период (рис. 3).

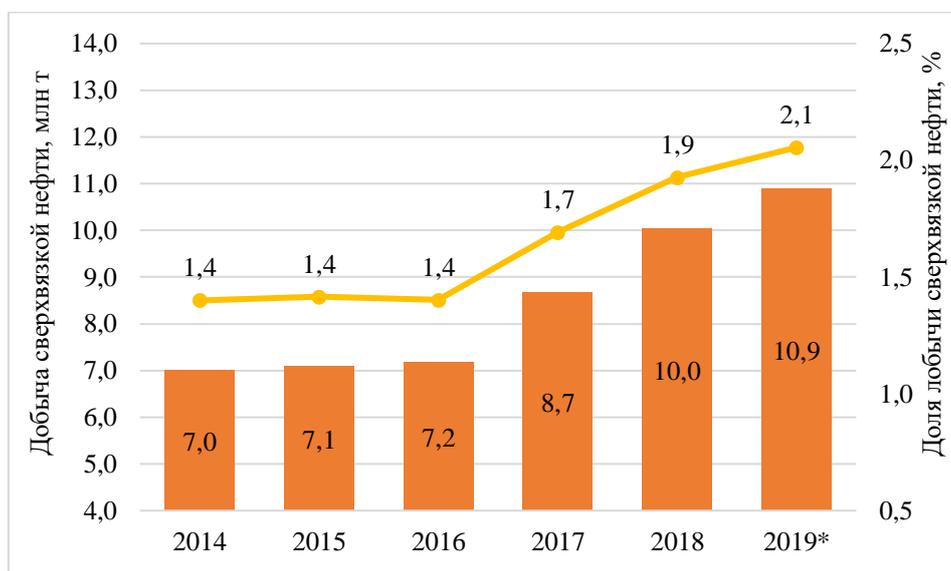


Рис. 3. Объём добычи сверхвязкой нефти (более 200 мПа·с), млн т

В региональной структуре большой объём сверхвязкой нефти добывается в Приволжском федеральном округе – 5,6 млн т (51,5 %) и в Северо-Западном федеральном округе – 4,8 млн т (44,3 %).

В Приволжском федеральном округе основной вклад в добычу сверхвязкой нефти вносит Республика Татарстан – 4,7 млн т, что составляет почти четверть от общего уровня добычи нефти в республике. Нефть этой категории добывается преимущественно на Ашальчинском, Мордово-Кармальском, Зюзеевском, Степноозерском, Пионерском, Черемшанском и Черемуховском месторождениях.

В Северо-Западном федеральном округе добыча сверхвязкой нефти ведётся в основном в Республике Коми – 4,7 млн т, что составляет около трети от общего

уровня добычи нефти в республике. Преимущественно добыча ведётся на Усинском и Ярегском месторождениях (рис. 4).

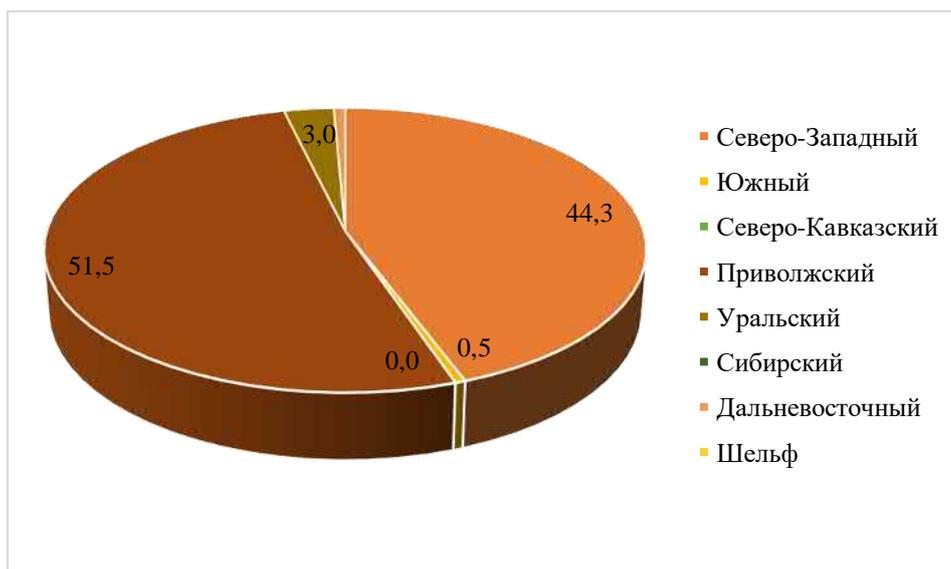


Рис. 4. Распределение добычи сверхвязкой нефти (более 200 мПа·с) по федеральным округам, %

Нефти из малопроницаемых коллекторов

Добыча нефти из малопроницаемых коллекторов (менее 0,05 кв. мкм) в России в 2019 г. составила 227,3 млн т, или 42,9 %, от общего уровня добычи нефти в России. Объем добычи нефти из малопроницаемых коллекторов увеличился за последние пять лет на 18,3 млн т, или на 8,7 %, доля в структуре добычи нефти по стране в целом выросла незначительно – с 41,8 до 42,9 % за соответствующий период (рис. 5).

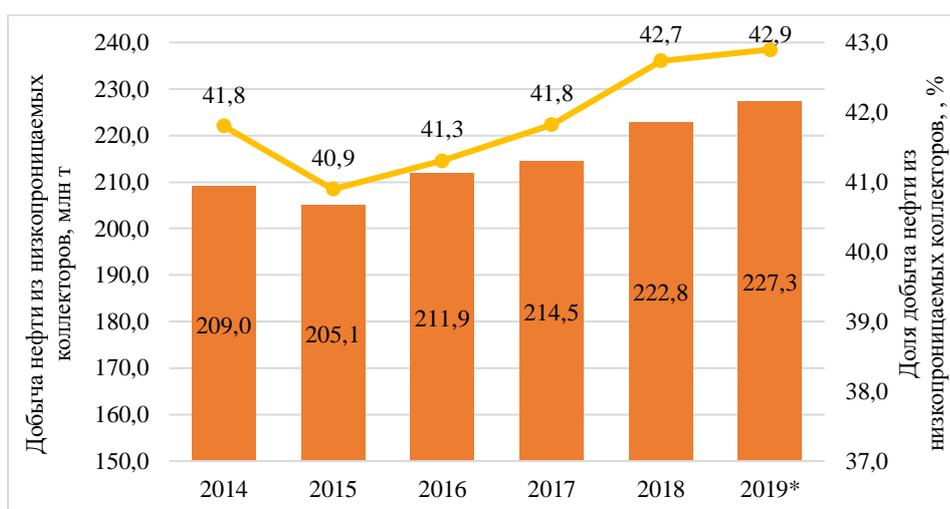


Рис. 5. Объем добычи нефти из низкопроницаемых коллекторов (менее 0,05 кв. мкм), млн т

В региональной структуре большой объём нефти из малопроницаемых коллекторов добывается в Уральском федеральном округе – 173,9 млн т (76,3 %), в Приволжском федеральном округе – 26,9 млн т (17,9 %) и в Сибирском федеральном округе – 16,0 млн т (7,1 %).

В Уральском федеральном округе основной вклад в добычу нефти из малопроницаемых коллекторов вносит Ханты-Мансийский автономный округ – 160,5 млн т. Нефть этой категории добывается преимущественно на крупнейших месторождениях округа – Приобском, Приразломном, Малобалыкском, Самотлорском, Федоровском и Красноленинском.

Для стимулирования добычи и повышения рентабельности разработки месторождений с низкой проницаемостью в формуле НДСИ применяется понижающий коэффициент, характеризующий степень сложности добычи (КД). Коэффициент равен 0,2 и 0,4 при добыче нефти из залежи с проницаемостью не более $2 \cdot 10^{-3}$ и эффективной нефтенасыщенной толщиной пласта не более 10 м и более 10 м соответственно.

Высокосернистая нефть

Добыча высокосернистой нефти (более 3 %) в России в 2019 г. составила 27,0 млн т, или 5,1 % от общего уровня добычи нефти в России. Объём добычи высокосернистой нефти увеличился за последние пять лет на 3,8 млн т, или на 16,4 %, а доля в структуре добычи нефти по стране в целом выросла с 4,6 до 5,1 % за соответствующий период (рис. 6).

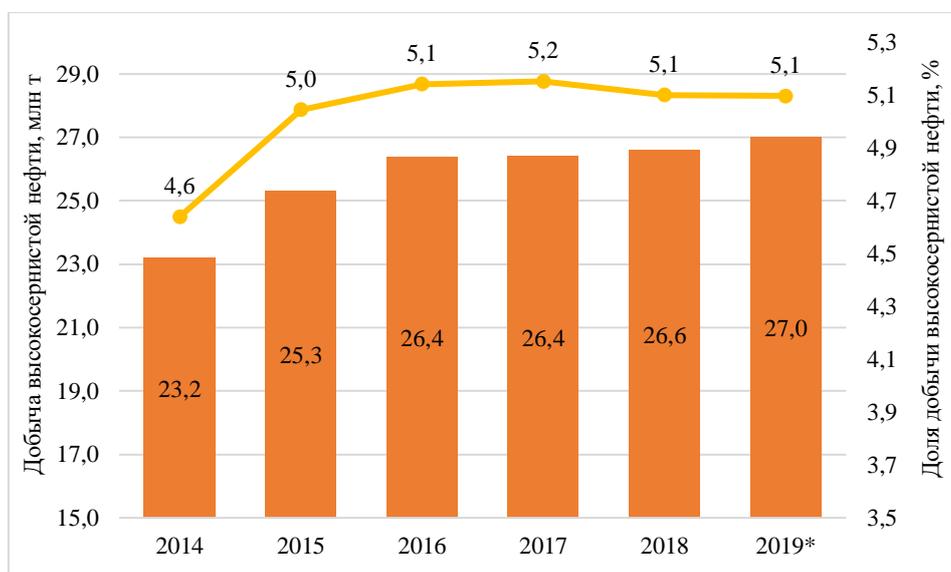


Рис. 6. Объём добычи высокосернистой нефти (более 3 %), млн т

В региональной структуре большой объём высокосернистой нефти добывается в Приволжском федеральном округе – 24,3 млн т (90,1 %), в Северо-Западном федеральном округе – 1,4 млн т (5,2 %) и в Уральском федеральном округе – 1,3 млн т (4,8 %). Также высокосернистая нефть добывается в Самарской области (3,0 млн т), Удмуртской Республике (2,7 млн т), Республике Башкортостан

(2,7 млн т), Пермском крае (1,5 млн т), Оренбургской области (1,0 млн т) и Ульяновской области (0,4 млн т).

В Северо-Западном федеральном округе основной вклад в добычу высокосернистой нефти вносят Ненецкий автономный округ – 1,2 млн т и Республика Коми – 0,1 млн т.

Заключение

В настоящее время происходит очевидное ухудшение условий добычи нефти как по горно-геологическим параметрам, так и по качественным характеристикам. Эта тенденция приводит к необходимости дифференциации институциональных условий работы компаний нефтегазовой отрасли, прежде всего в области налоговой политики. Однако спектр задач, которые необходимо решать для поддержания устойчивой добычи нефти в условиях роста трудноизвлекаемых запасов намного шире и требует изменений в ряде других нормативных документах, а также выстраивания новых целевых индикаторов развития отраслей и регионов.

Исследование выполнено в рамках базового проекта НИР № 0266-2019-0008 лаборатории 1105

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филимонова И.В., Немов В.Ю., Проворная И.В., Мишенин М.В., Комарова А.В., Шумилова С.И., Кожевин В.д., Земнухова Е.А., Дзюба Ю.А., Бурштейн Л.М., Моисеев С.А., Казаненков В.А., Фомин М.А., Юркевич Н.В., Рыжкова С.В., Фомин А.М., Копцева П.И., Бекренёва Е.В. Нефтегазовый комплекс России - 2018 : в 4-х частях / научный редактор А. Конторович ; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирский государственный университет. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2019. – Часть 1: Нефтяная промышленность - 2018: долгосрочные тенденции и современное состояние. – 84 с. [Электронный ресурс] URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/files/publications/ibc/book-2019-filimonova.pdf?action=download> (Дата обращения: 17.11.2020).

2. Филимонова И.В., Немов В.Ю., Мишенин М.В., Проворная И.В. Нефтяная промышленность России. анализ итогов 2018 г. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2019. – № 4 (167). – С. 52-62.

3. Сурова Д.К. Стимулирование разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов в России через налоговый режим // Бурение и нефть. – 2016. – № 10. – С. 55 – 59.

4. Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Лившиц В.Р., Рыжкова С.В. Главные направления развития нефтяного комплекса России в первой половине XXI века // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89. – № 11. – С. 1095-1104.

5. Казаненков В.А., Филимонова И.В., Немов В.Ю. Главные направления и задачи поисков нефти и газа в Западной Сибири на ближайшие десятилетия // Бурение и нефть. – 2019. – № 10. – С. 10-18.

REFERENCES

1. Filimonova I.V., Nemov V.YU., Provornaya I.V., Mishenin M.V., Komarova A.V., Shumilova S.I., Kozhevin V.d., Zemnuhova E.A., Dzyuba YU.A., Burshtejn L.M., Moiseev S.A., Kazanenkov V.A., Fomin M.A., YUrkevich N.V., Ryzhkova S.V., Fomin A.M., Kopceva P.I., Bekrenyova E.V. Neftegazovyy kompleks Rossii - 2018 : v 4-h chastyah / nauchnyj redaktor A. Kon-

- torovich ; Institut neftegazovoj geologii i geofiziki im. A.A. Trofimuka SO RAN, Novosibirskij gosudarstvennyj universitet. – Novosibirsk: INGG SO RAN, 2019. – CHast' 1: Neftyanaya promyshlennost' - 2018: dolgosrochnye tendencii i sovremennoe sostoyanie. – 84 s. [Elektronnyj resurs] URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/files/publications/ibc/book-2019-filimonova.pdf?action=download> (Data obrashcheniya: 17.11.2020).Surova D.K. Stimulirovanie razrabotki trudnoizvlekaemyh zapasov uglevodorodov v Rossii cherez nalogovyj rezhim // Burenie i nef't'. – 2016. – № 10. – S. 55 – 59.
2. Kontorovich A.E., Burshtejn L.M., Livshic V.R., Ryzhkova S.V. Glavnye napravleniya razvitiya neftyanogo kompleksa Rossii v pervoj polovine XXI veka // Vestnik Rossijskoj akademii nauk. – 2019. – T. 89. – № 11. – S. 1095-1104.
3. Kazanenkov V.A., Filimonova I.V., Nemov V.YU. Glavnye napravleniya i zadachi poiskov nef'ti i gaza v Zapadnoj Sibiri na blizhajshie desyatiletija // Burenie i nef't'. – 2019. – № 10. – S. 10-18.

© М. В. Мишенин, 2021

АНАЛИЗ ЛИЦЕНЗИРОВАНИЯ НЕДР ЗА 2000-2021 ГОДЫ В ЗАПАДНЫХ РАЙОНАХ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Сергей Александрович Моисеев

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

Елена Викторовна Белова

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

Алевтина Олеговна Гордеева

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

Елена Николаевна Кузнецова

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

Лариса Николаевна Константинова

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

Рассмотрено лицензирование западных районов Республики Саха (Якутия) по состоянию на 01.03.2021 г. На этой территории распределено 76 участков недр и зарегистрировано 23 компании, занимающихся геологическим изучением, разведкой и добычей углеводородного сырья. Наибольший объем геологоразведочных работ выполнили ПАО «Сургутнефтегаз» и «Роснефть». В период с 2009 по 2020 гг. было открыто 15 месторождений нефти и газа.

Ключевые слова: Лено-Тунгусская НПП, Республика Саха (Якутия), нефтегазоносность, лицензирование

ANALYSIS OF LICENSING OF MINERAL RESOURCES FOR 2000-2021 IN THE WESTERN REGIONS OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

Sergej A. Moiseev

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

Elena V. Belova

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

Alevtina O. Gordeeva

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

Elena N. Kuznecova

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

Larisa N. Konstantinova

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

Licensing of the western regions of the Republic of Sakha (Yakutia) was considered as of 03.01.2021. 76 subsoil plots were allocated on this territory and 23 companies engaged in geological exploration, exploration and production of hydrocarbons were registered. The largest volume of exploration work was carried out by PJSC Surgutneftegas and Rosneft. In the period from 2009 to 2020, 15 oil and gas fields were discovered.

Лицензирование недр на территории Республики Саха (Якутия) было начато ещё в начале 90-х годов прошлого столетия. В то время лицензии выдавались преимущественно на разведку и эксплуатацию уже открытых месторождений или блоков месторождений (Мастахское, Среднеботуобинское, Центральный блок Среднеботуобинского, Средневилуйское, Иреляхское и др.).

В начале 2000-х годов геологоразведочные работы на территории Республики Саха (Якутия) активизировались благодаря разработке Государственной Программы геологического изучения и предоставления в пользование месторождений УВ-сырья Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия). Первая редакция «Программы...» вышла в 2005 г., вторая – в 2007 г. [1, 2, 3]. «Программа...» ориентирована на ресурсное обеспечение трубопроводной системы ВСТО на уровне 80 млн т нефти в год. В неё вошли так же документы по лицензированию недр Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия).

Основные положения лицензирования недр и перспективы развития сырьевой базы региона были разработаны в ИНГГ СО РАН в 2004–2006 гг. [4, 5].

После ввода в действие в 2019 г. магистрального газопровода «Сила Сибири» значительно активизировались геологоразведочные работы на территориях Северо-Алданской и Алдано-Майской НГО, что нашло отражение в состоянии и особенностях лицензирования нефтегазоносных территорий западных районов Республики Саха (Якутия).

При анализе состояния недропользования была использована информация, полученная из официальных источников: бюллетени «Недропользование в России» за 2010-2021 гг., материалы Российского федерального геологического фонда, сайтов компаний-недропользователей (см. <https://rfgf.ru/license/index.php>, <https://www.surgutneftegas.ru/>, <https://www.rosneft.ru/>, <https://www.gazprom.ru/>, <http://yatec.ru/>, <https://irkutskoil.ru/>, <https://krasnoyarsk.dk.ru/wiki/vostochno-sibirskaya-neftegazovaya-kompaniya> и др.).

По состоянию на 01.03.2021 г. на территории западных районов Республики Саха распределено 76 участков недр, зарегистрировано 23 компании, занимающихся геологическим изучением, разведкой и добычей углеводородного сырья (рис. 1).

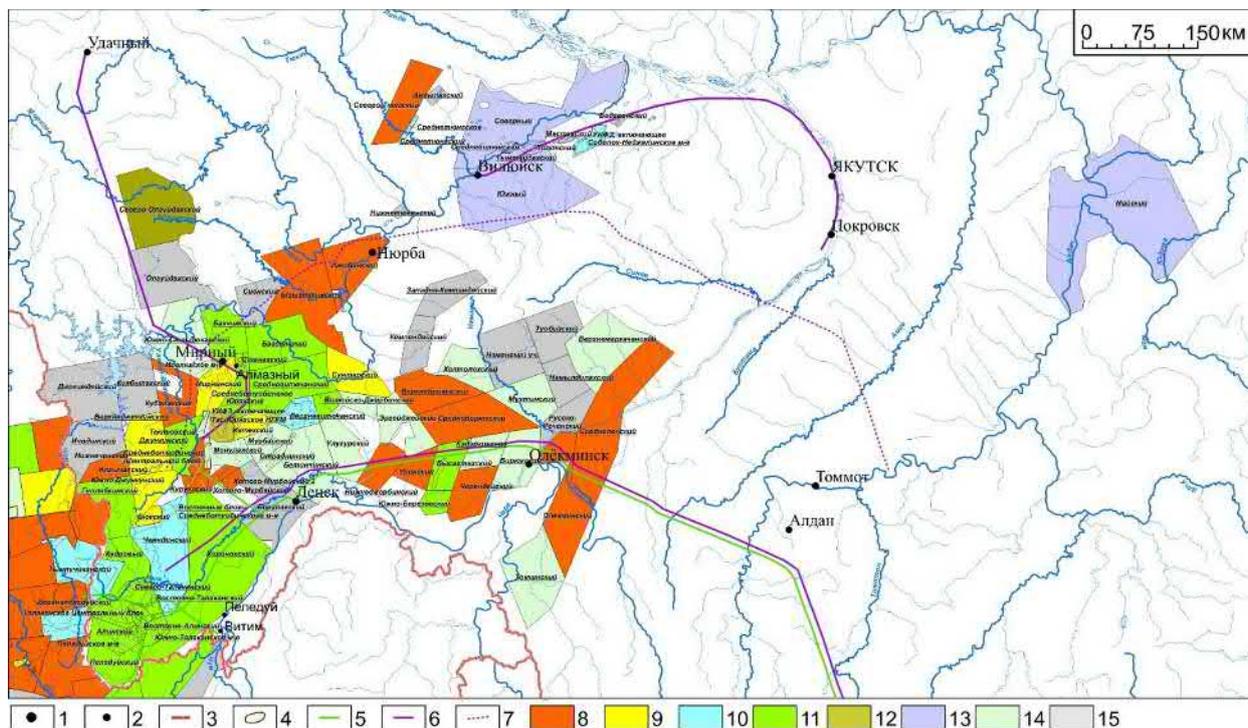


Рис. 1. Обзорная карта лицензирования западных районов Республики Саха (Якутия) по состоянию на 01.03.2021 г.

1 – города, 2 – поселки городского типа, 3 – границы субъектов, 4 – контуры месторождений, 5 – нефтепроводы, 6 – газопроводы, 7 – проектируемый газопровод, 8-13 – головные компании-недропользователи участков распределенного фонда недр: 8 – ПАО «НК «Роснефть», 9 – ООО «Иркутская нефтегазовая компания», 10 – ПАО «Газпром», 11 – ПАО «Сургутнефтегаз», 12 – ПАО «НОВАТЭК», 13 – ОАО «Якутская топливно-энергетическая компания», 14 – другие недропользователи, 15 – участки нераспределенного фонда недр.

За все годы лицензирования (1992 по 2021 гг.) на территории Республики Саха (Якутия) было выдано 100 лицензий. Из них 17 лицензий на геологическое изучение, разведку и добычу углеводородного сырья (НР), 53 на геологическое изучение недр (НП), 30 на разведку и добычу нефти и газа (НЭ).

За этот период на территории Республики Саха (Якутия) 16 участков из распределённого фонда недр (РФН) были возвращены в нераспределённый фонд недр (НФН). Некоторые участки (Южно-Березовский, Нюйский, Борулахский и Нижнетюкянский) переходили из распределённого в нераспределённый фонды недр и обратно по нескольким раз.

Целый ряд участков неоднократно выставлялись на аукцион, но лицензии на них так и не были получены. В частности, Кемпендяйский и Джекимдейский

участки были включены в план лицензирования в 2011 и 2013 гг. соответственно. Западно-Кемпендяйский участок выставлялся на аукцион в 2006 и 2011 гг. В 2012, 2016, 2017, 2018 гг. на аукцион выставлялся Андылахский участок, на котором расположено Андылахское месторождение. Аукционы признаны несостоявшимися в связи с отсутствием заявок.

Лицензия на геологическое изучение, разведку и добычу полезных ископаемых Борулахского участка была выдана «УДС Энерджи» в 2016 г., но в этом же году участок был возвращён в НФН. Геологоразведочные работы на участке не проводились. В 2017 г. участок вновь выставлялся на аукцион на право пользования недрами с целью геологического изучения (поиски и оценки), разведки и добычи углеводородного сырья. Аукцион не состоялся по причине его отмены.

На Нижнетюкянский участок лицензия на геологическое изучение недр на нефть и газ была выдана ГГП «Вилуйское». В связи с окончанием срока действия лицензии в 1998 г. было прекращено право пользования. В 2009, 2010, 2012 и 2017 гг. участок выставлялся на аукцион которые были. признаны несостоявшимися. В настоящее время участок находится в НФН.

Максимальное количество лицензий (11) было выдано в 2008 г. В 2009–2017 гг. количество выданных лицензий менялось от двух до девяти. В 2018–2020 гг. не было выдано ни одной лицензии (рис. 2). На аукцион были выставлены Нижнетюкянский, Борулахский и Андылахский участки, но аукционы не состоялись. В 2021 г. ОАО «Якутская топливно-энергетическая компания» получила лицензии на поиски, разведку и добычу полезных ископаемых на Майском, Северном и Южном лицензионных участках. После этого ОАО «Якутская топливно-энергетическая компания» стало второй после ПАО «Сургутнефтегаз» по суммарной площади распределенного фонда недр на территории Республики Саха (Якутия) (рис. 2).

Наибольшее количество лицензий выдано на геологическое изучение, включающее поиски и оценку месторождений полезных ископаемых, разведку и добычу полезных ископаемых (НР) – 41 штук, что составляет 53,9 % от общего количества действующих лицензий. Одиннадцать лицензий или 14,5 % выдано на геологическое изучение, поиски и оценку месторождений полезных ископаемых (НП. На разведку и добычу полезных ископаемых (НЭ) выдано 24 лицензии (31,6 %).

Наиболее крупным недропользователем является ПАО «Сургутнефтегаз», ему принадлежат лицензии на 21 участок из 76, которые занимают 23,7% всей площади распределенного фонда недр на этой территории. ПАО «НК «Роснефть» и ОАО «Якутская топливно-энергетическая компания» владеют 14 лицензиями на участки недр – по семь каждая. ООО «Восточно-Сибирская нефтегазовая компания» и ООО «Иркутская нефтяная компания» принадлежит по шесть лицензионных участков, ПАО «Газпром» – пять, а АО «Туймаданефтегаз» – четыре. Остальные недропользователи владеют одним или двумя лицензионными участками (рис. 3, 4).

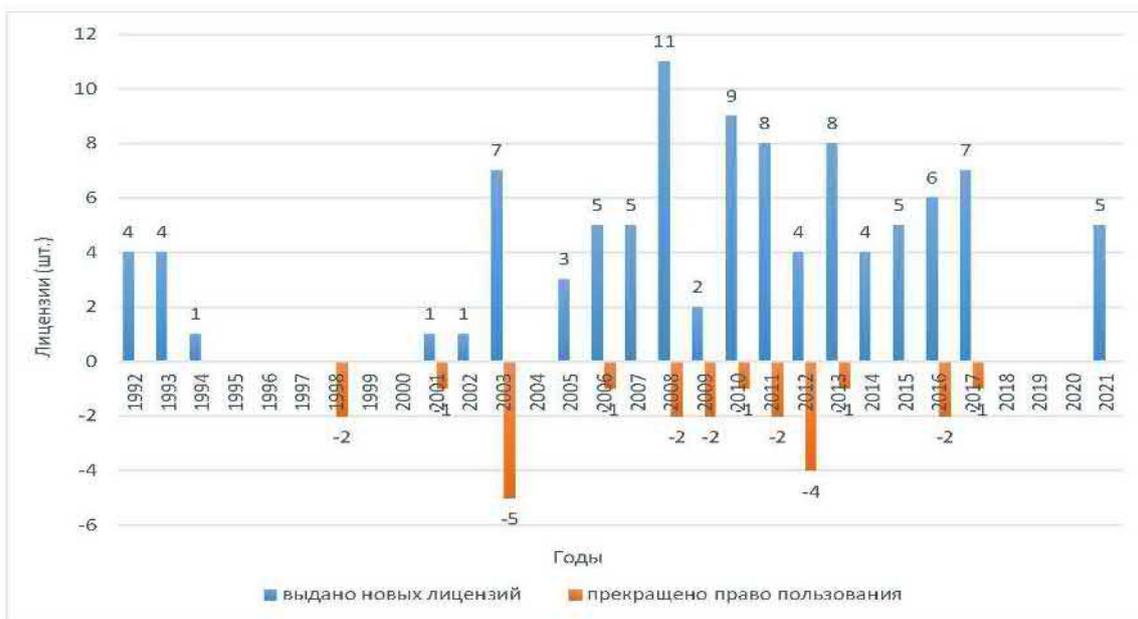


Рис. 2. Динамика лицензий, выданных и прекративших право пользования в период с 1992 по 2021 гг. в западных районах Республики Саха (Якутия)

Объёмы геологоразведочных работ выполненных за счёт средств недропользователей на территории западных районов Республики Саха (Якутия) за период с 2006 по 2021 гг. приведены в таблице 1.

Объёмы глубокого бурения закономерно увеличиваются, начиная с 2009 г.

Сейсморазведочные работы 3D в наибольших объёмах выполнялись в 2012–2014 гг., что связано с проведением значительных объёмов этих работ компанией ПАО «Газпром» на Чаяндинском месторождении.

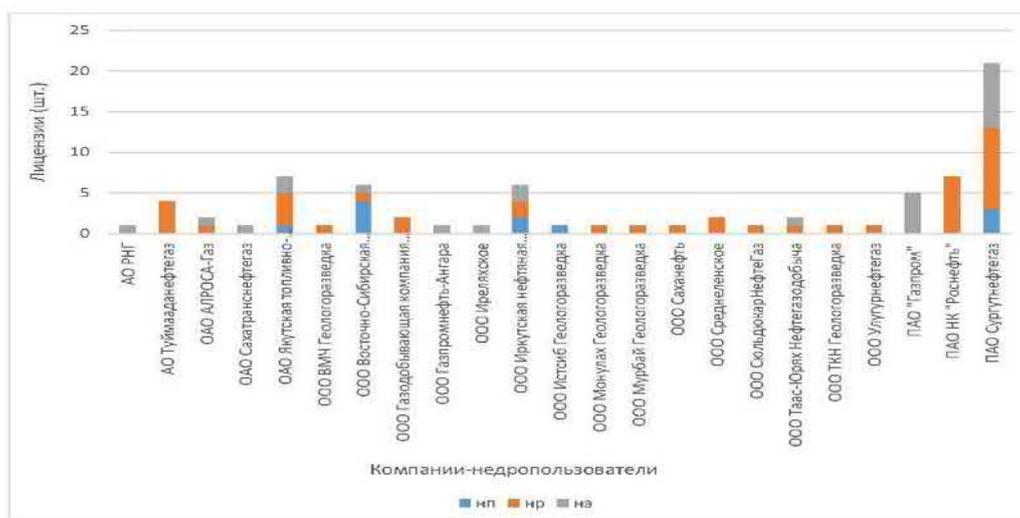


Рис. 3. Распределение количества действующих лицензий на территории западных районов Республики Саха (Якутия) по недропользователям на 01.03.2021 г.

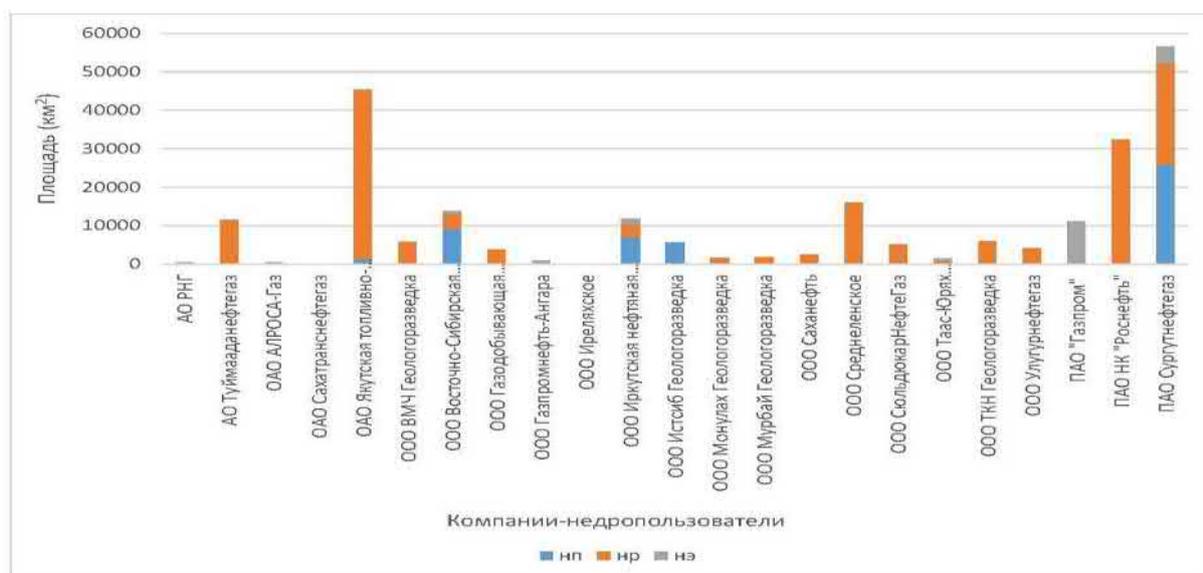


Рис. 4. Распределение площадей участков распределённого фонда недр на территории западных районов Республики Саха (Якутия) по недропользователям на 01.03.2021 г.

Таблица 1

Объёмы геологоразведочных работ выполненных за счёт средств недропользователей на территории западных районов Республики Саха (Якутия)

Год	Сейсморазведка 2D (км)	Сейсморазведка 3D (км ²)	Количество скважин	Объём бурения (м)
2007	100	0	1	1 200
2008	387	100	8	14 700
2009	3 810	434	6	10 700
2010	3 581	1 075	8	13 800
2011	4 314,5	1 576	27	49 100
2012	3 118	3 186	37	66 483
2013	2 779,5	3 152	37	64 197
2014	4 279	3 517	23	42 198
2015	4 580	2 894	37	73 719
2016	3 709	1 579	42	84 750
2017	3 070	2 300	30	60 193
2018	2 890	1 750	49	96 695
2019	3 040	1 050	29	59 170
2020	2 700	350	15	32 800
всего	42 358	22 963	349	669 705

ПАО «Сургутнефтегаз» является лидером по объёмам выполненных сейсморазведочных работ 2D. Ею за период с 2006-2020 гг. отработала порядка 12 200 км, что составило 29 % от общих объёмов. ПАО «Сургутнефтегаз» за период 2006–2020 гг. пробурила около 250 скважин объёмом 470 000 м, что состав-

ляет порядка 72 % от объёма глубокого бурения, проведённого в западных районах Республики Саха (Якутия).

На территории Республики Саха (Якутия) на начало 2021 г. учтены 42 месторождения углеводородного сырья (одно нефтегазовое, одно газонефтяное, два нефтяных, семь газовых, 14 газоконденсатных, 17 нефтегазоконденсатных).

За годы действия программы лицензирования недр было открыто 15 месторождений, из них 5 месторождений было открыто до 2009 г. (Верхнепеледуйское 2005 г., Северо-Талаканское – 2007 г., Восточно-Алинское – 2007 г., Пеледуйское – 2009 г., Южно-Талаканское – 2009 г.). В 2009 – 2015 гг. не было открыто ни одного месторождения. После 2015 года было открыто 10 месторождений (Бюкское – 2015 г., Илгычахское – 2016 г., Бетинчинское – 2017 г., Сюльдюкарское – 2017, Хамакинское – 2018, Курунское – 2019 г., Ленское – 2019 г.). В 2020 г. были открыты месторождения Кыттыгасское, им. Меньшикова и им. Кульбертинова.

Открытия месторождений в 2005-2009 гг. базировались на ГРП, выполненных в конце 80 х годов XX столетия. Начиная с 2015 г. открытию месторождений предшествовало проведение ГРП на современном уровне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Программа геологического изучения и предоставления в пользование месторождений углеводородного сырья Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия). – Новосибирск-Москва, 2005-2008. – 55 с.

2. Приказ № 219 МПР РФ от 29 июля 2005 года «Об утверждении программы геологического изучения и предоставления в пользование месторождений углеводородного сырья Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия)».

3. Герт А.А., Ефимов А.С., Мельников П.Н., Старосельцев В.С., Старосельцев К.В., Супрунчик Н.А. Программа геологического изучения и предоставления в пользование месторождений углеводородного сырья Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия): основные показатели и ход реализации // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25-27 апреля 2007 г.). – Новосибирск: СГГА, 2007. – Т. 5, ч. 1. – С. 3-8.

4. Конторович А.Э., Еремин Ю.Г., Лившиц В.Р., Моисеев С.А., Филимонова И.В. Некоторые вопросы методики геолого-экономической оценки перспектив наращивания сырьевой базы и эффективности освоения ресурсов углеводородов Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия) // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Пути повышения эффективности геологоразведочных работ на нефть и газ в восточной Сибири и республике САХА (Якутия)». Новосибирск, 2006а. – С. 273-275.

5. Конторович А.Э., Коржубаев А.Г., Моисеев С.А., Шемин Г.Г., Еремин Ю.Г., Изаров В.Т., Мандельбаум М.М., Санеев Б.Г., Платонов Л.А., Сафронов А.Ф. Нефтегазовый комплекс Восточной Сибири и Дальнего Востока: сырьевая база, перспективы развития // ГЕО-Сибирь-2006. Т. 5. Недропользование. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки. – Новосибирск: СГГА, 2006б. – С. 76-82.

REFERENCES

1. Programma geologicheskogo izucheniya i predostavleniya v pol'zovanie mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ya Vostochnoj Sibiri i Respubliki Saha (Yakutiya). – Novosibirsk-Moskva, 2005-2008. – 55 s.

2. Prikaz № 219 MPR RF ot 29 iyulya 2005 goda «Ob utverzhdanii programmy geologicheskogo izucheniya i predostavleniya v pol'zovanie mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ya Vostochnoj Sibiri i Respubliki Saha (Yakutiya)».

3. Gert A.A., Efimov A.S., Mel'nikov P.N., Starosel'cev V.S., Starosel'cev K.V., Suprunchik N.A. Programma geologicheskogo izucheniya i predostavleniya v pol'zovanie mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ya Vostochnoj Sibiri i Respubliki Saha (YAkutiya): osnovnye pokazateli i hod realizacii // GEO-Sibir'-2007. III Mezhdunar. nauch. kongr.: sb. materialov v 6 t. (Novosibirsk, 25-27 aprelya 2007 g.). – Novosibirsk: SGGA, 2007. – T. 5, ch. 1. – S. 3-8.

4. Kontorovich A.E., Eremin YU.G., Livshic V.R., Moiseev S.A., Filimonova I.V. Nekotorye voprosy metodiki geologo-ekonomicheskoy ocenki perspektiv narashchivaniya syr'evoy bazy i effektivnosti osvoeniya resursov uglevodorodov Vostochnoj Sibiri i Respubliki Saha (YAkutiya)» //Materialy vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Puti povysheniya effektivnosti geologorazvedochnyh rabot na neft' i gaz v vostochnoj Sibiri i respublike SAHA (YAkutiya)». Novosibirsk, 2006a. – S. 273-275.

5. Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Moiseev S.A., SHemin G.G., Eremin YU.G., Izarov V.T., Mandel'baum M.M., Saneev B.G., Platonov L.A., Safronov A.F. Neftegazovyj kompleks Vostochnoj Sibiri i Dal'nego Vostoka: syr'evaya baza, perspektivy razvitiya // GEO-Sibir'-2006. T. 5. Nedropol'zovanie. Novye napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki. – Novosibirsk: SGGA, 2006b. – S. 76-82.

© С. А. Моисеев, Е. В. Белова, А. О. Гордеева, Е. Н. Кузнецова,
Л. Н. Константинова, 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ МИРОВЫХ РЫНКОВ СБЫТА, СПОСОБОВ И УСЛОВИЙ ПОСТАВОК МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ИЗ РЕГИОНОВ АРКТИКИ

Василий Юрьевич Немов

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

В статье представлены результаты исследования перспективных направлений и способов поставок энергетических ресурсов из арктической зоны Российской Федерации. Проведен обзор и выполнена количественная оценка рынков энергетических ресурсов Азиатско-Тихоокеанского региона. Показана значимость развития высокотехнологичных отраслей перерабатывающей промышленности на востоке страны и ориентация на рынок стран АТР.

Ключевые слова: арктическая зона, экспорт, нефть, газ

RESEARCH OF WORLD MARKETS OF ENERGY RESOURCES, OPTIONS AND CONDITIONS OF SUPPLY OF MINERAL RESOURCES FROM THE ARCTIC REGIONS

Vasily Y. Nemov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD, Senior Researcher, e-mail: Nemovvu@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, assistant professor

The article presents the results of a study of promising directions and methods of supplying energy resources from the Arctic zone of the Russian Federation. Reviewed and quantified the energy markets in the Asia-Pacific region. The importance of the development of high-tech industries of the processing industry in the east of the country is shown. The importance of the Asia-Pacific region market for the Russian processing industry has been substantiated.

Keywords: arctic zone, export, oil, gas

В настоящее время одним из основных стратегических направлений развития России является освоение арктической зоны. Особенности региона, делающими его освоение нетривиальной задачей, являются:

- суровые природно-климатические условия, ледовый покров
- низкая плотность населения
- неразвитость инфраструктуры
- удаленность региона от промышленных центров
- высокая ресурсоемкость хозяйственной деятельности
- высокая уязвимость экосистемы от техногенных воздействий.

В тоже время высокий ресурсный потенциал региона и выгодное географическое положение могут сделать освоение региона не только политически, но и

экономически оправданным. Освоение Арктической зоны целесообразно начинать с освоения запасов энергетических ресурсов с ориентацией на мировой рынок [1]. Используя потенциал Северного морского пути недропользователи получают выход как на традиционный европейский рынок, так и на растущий премиальный рынок Азиатско-Тихоокеанского региона.

Долгосрочные интересы Российской Федерации, состоящие в создании экономики инновационного типа, интегрированной в мировое технологическое и экономическое пространство, определяют особую роль для будущего страны восточных территорий России и прилегающих акваторий Тихого океана и Арктики в силу их географического положения и наличия значительных природных, в том числе энергетических, ресурсов [2].

В условиях возрастания геополитической и экономической роли Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) в мире для укрепления внешнеэкономических и внешнеполитических позиций России становится все более необходимым наращивание своего присутствия, экономического и политического веса именно в этой части Евразийского континента.

Россия располагает самым крупным в мире энергетическим потенциалом. Доля экспорта в общем объеме добычи нефти в России составляет 47 %, экспорт произведенных нефтепродуктов составляет 50 %, благодаря поэтапному вводу в эксплуатацию завода «Ямал СПГ» доля экспортируемого газа выросла с 34 % в 2018 г. до 37 % в 2019 г.

Основная часть энергетического потенциала в России сконцентрирована в Азиатской части страны. Развитие транспортной инфраструктуры на востоке страны в последнее десятилетие способствует росту поставок энергетических товаров на рынок стран АТР. Так закончено формирование магистральной нефтепроводной системы «Восточная Сибирь – Тихий океан», развивается газопроводная инфраструктура (2 декабря 2019 г. начаты поставки по газопроводу «Сила Сибири»), расширяются мощности по перевалке грузов в портах, реализуются новые проекты СПГ [3]. В настоящее время на рынок АТР приходится 34 % экспорта нефти, 15 % экспорта нефтепродуктов и 6 % экспорта газа (рис. 1). Крупнейшие торговые партнеры на этом рынке – Китай, Япония и Корея.

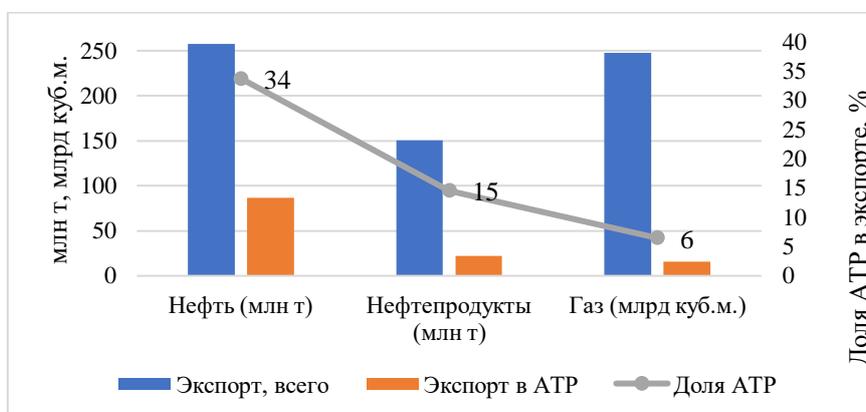


Рис. 1. Роль АТР в экспорте энергоносителей из России в 2018 г.

Вместе с тем сохраняются факторы, сдерживающие рост поставок российских энергетических ресурсов на Азиатско-Тихоокеанский рынок: отсутствие развитой транспортной инфраструктуры, заводов по переработке сырья, низкий уровень геологической изученности территории и акватории Восточной Арктики, а также неурегулированность ряда институциональных вопросов (законодательных, организационных, инвестиционных, ценовых) [4].

Рынок энергетических ресурсов Азиатско-Тихоокеанского региона

Страны АТР на протяжении последних 40 лет являются центром роста потребления энергетических ресурсов. В период с 1980 г. по 2018 г. доля этого региона в структуре энергопотребления выросла с 17,6 % до 43,2 %. При этом среднегодовой темп прироста потребления энергоносителей в странах АТР составил 4,4 %. По итогам 2018 г. потребление энергоносителей выросло на 4,1 %, или на 237,8 млн т н.э. Крупнейшие потребители энергетических ресурсов в регионе – Китай (23,6 % мирового энергопотребления), Индия (5,8 %), Япония (3,3 %) и Южная Корея (2,2 %).

К ключевым факторам роста энергопотребления в АТР можно отнести увеличение энергопотребления на душу населения, увеличение численности населения, а также рост числа транспортных средств. Это ведет к дальнейшему уверенному увеличению спроса на все энергоносители для удовлетворения растущих потребностей населения и развития промышленного потенциала.

Стоит отметить, что Азиатско-Тихоокеанский регион является не только крупнейшим потребителем энергетических ресурсов, но с 2000-х гг. и крупнейшим производителем ископаемых энергоносителей: на долю региона приходится 32,1 % мирового производства (рис. 2).

Несмотря на высокий уровень добычи ископаемых энергоносителей, объём чистого импорта в АТР составляет более 1,4 млрд т н.э., что соответствует 27,7 % общего объема внутреннего потребления в регионе. Крупнейшими импортерами энергетических ресурсов являются как страны с развивающейся экономикой (Китай, Индия), так и с развитой (Япония, Южная Корея, Сингапур).

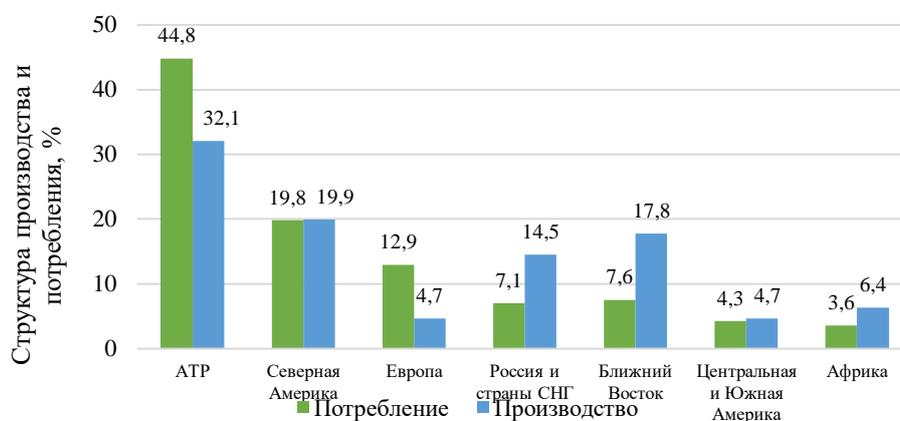


Рис. 2. Структура производства и потребления ископаемых энергоносителей

В структуре энергопотребления в АТР доминирует уголь, доля которого составляет 48 %. Второй по объёму потребления энергоноситель – нефть, спрос на которую характеризуется стабильным ростом. С 2010 г. потребление нефти в АТР выросло на 26 %, а среднегодовой темп прироста составил 3,4 %. Основными потребителями нефти в регионе являются Китай (38 %), Индия (14 %) и Япония (11 %). При этом в Японии с 2012 г. потребление нефти стабильно сокращается средним темпом 3,4 % в год.

На природный газ приходится 11,9 % энергопотребления. С 2010 г. потребление выросло на 43 %, а среднегодовой темп прироста составил 5,2 %. Быстрее всего спрос растёт в Китае, где за период 2010–2018 гг. потребление выросло в 2,6 раза. Также высоким темпом потребление газа растёт в Австралии, Японии, Южной Корее.

Крупнейший импортер нефти – Китай, закупающий на международном рынке 465 млн т нефти, или 74 % от внутреннего потребления. Поставки нефти в Китай достаточно диверсифицированы (рис. 3). Крупнейшими поставщиками нефти в Китай являются Россия (15,4 % от общего объёма импорта), Саудовская Аравия (12,2 %), Ирак (9,7 %). Всего страны Ближнего Востока обеспечивают 44 % поставок нефти. Из стран Западной Африки поставляется 15,5 % нефти, из Южной и Центральной Америки – 13,3 %.

Высокими темпами растёт потребление нефти в Индии, при этом с 2011 г. сокращается собственная добыча. Объём международных поставок нефти в Индию составляет 227,5 т, что соответствует 96,2 % внутреннего потребления. Чистый импорт в Индию составляет 83,3 % внутреннего потребления. Основные объёмы нефти поставляются из Ирака (21 %), Саудовской Аравии (17,3 %) и других стран Ближнего Востока (14,2 %).

Четвертая страна по объёму импортируемой нефти – Япония. Крупнейшие поставщики нефти на японский рынок – Саудовская Аравия (38,1 % от общего объёма импорта), Объединённые Арабские Эмираты (24,7 %), Кувейт (7,7 %), Россия (4,7 %). Всего Япония импортирует 150,8 млн т нефти.

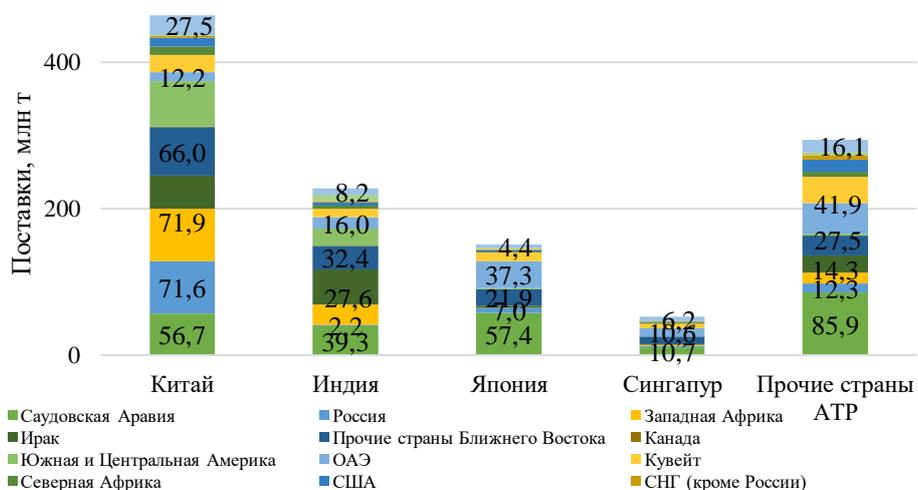


Рис. 3. Источники поставок нефти на рынок стран АТР

Заключение

Основой сотрудничества России со странами АТР на протяжении многих лет остается экспорт сырья, прежде всего углеводородов и металлов. Но большинство восточносибирских месторождений содержат нефть, газ, конденсат, а в составе природного газа выделяется высокое содержание гомологов (метан, этан, пропан, бутаны) и гелий. Это так называемый «жирный газ», который требует переработки и выделения ценных компонентов, являющихся сырьём для нефтегазохимических производств. Поэтому если на востоке страны будут созданы мощности по переработке «жирного газа», то Россия сможет решить сразу несколько стратегически важных задач – укрепление приграничной территории, увеличение численности населения за счёт повышения уровня и качества жизни, создания новых рабочих мест, а также дифференцировать доходы от экспорта за счёт реализации продукции с высокой добавленной стоимостью [5].

Таким образом, значительный потенциал энергетических ресурсов на востоке страны создаёт инвестиционную привлекательность региона в сфере развития сотрудничества со странами Азиатско-Тихоокеанского региона. Эффективное освоение энергетического потенциала востока страны на этой основе развитие высокотехнологичных отраслей перерабатывающей промышленности – важное условие сохранения национального суверенитета России над обширными восточными территориями, увеличения численности и повышения уровня жизни населения на востоке страны, проведение не дискриминационной интеграции в экономическое пространство АТР.

Формирование новых крупных центров нефтегазового комплекса в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, развитие производственной (добывающей, перерабатывающей) и транспортной инфраструктуры становится все более важной задачей не только социально-экономического развития регионов и обеспечения энергетической безопасности России, но и служит реализации российских геополитических интересов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-010-00699.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казаненков В.А., Немов В.Ю. Обоснование перспективных направлений развития минерально-сырьевой базы углеводородов Арктики // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVI международной научной конференции (г. Новосибирск, 20-24 апреля 2020 г.). – 2020. – С. 805-815
2. Filimonova I., Komarova A., Nemov V., Provornaya I. Sustainable development of Russian energy sector: Hydrocarbons of Eastern Siberia // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management (SGEM 2020) (16th to 25th August 2020, Albena, Bulgaria): Conference Proceedings. – 2020. – Т. 2020-August. – № 1.2. – С. 777-783
3. Филимонова И.В., Немов В.Ю., Проворная И.В., Мишенин М.В. Экспортная стратегия России. Структура и динамика поставок нефти и нефтепродуктов из РФ // Нефтегазовая вертикаль. – 2020. – № 18. – С. 8-17

4. Проворная И.В., Филимонова И.В., Эдер Л.В., Немов В.Ю. Региональная структура экспорта нефти из России с дифференциацией по направлениям поставок // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. – 2019. – № 5. – С. 89-93

5. Eder L., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Nemov V.U., Mishenin M.V. Sustainable innovative development of russian oil and gas industry in view of global trends // 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2018 (Albena, Bulgaria., 2-8 July 2018): Conference Proceedings. – 2018. – Т. 18. – № 5.3. – С. 791-798

REFERENCES

1. Kazanenkov V.A., Nemov V.YU. Obosnovanie perspektivnyh napravlenij razvitiya mineral'no-syr'evoy bazy uglevodorodov Arktiki // Interekspo GEO-Sibir' - "Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Ekonomika. Geoekologiya": Materialy XVI mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (g. Novosibirsk, 20-24 aprelya 2020 g.). – 2020. – S. 805-815

2. Filimonova I., Komarova A., Nemov V., Provornaya I. Sustainable development of Russian energy sector: Hydrocarbons of Eastern Siberia // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management (SGEM 2020) (16th to 25th August 2020, Albena, Bulgaria): Conference Proceedings. – 2020. – Т. 2020-August. – № 1.2. – S. 777-783

3. Filimonova I.V., Nemov V.YU., Provornaya I.V., Mishenin M.V. Eksportnaya strategiya Rossii. Struktura i dinamika postavok nefiti i nefteproduktov iz RF // Neftegazovaya vertikal'. – 2020. – № 18. – S. 8-17

4. Provornaya I.V., Filimonova I.V., Eder L.V., Nemov V.YU. Regional'naya struktura eksporta nefiti iz Rossii s differenciaciej po napravleniyam postavok // Nauchno-tekhnicheskie razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov. – 2019. – № 5. – S. 89-93

5. Eder L., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Nemov V.U., Mishenin M.V. Sustainable innovative development of russian oil and gas industry in view of global trends // 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2018 (Albena, Bulgaria., 2-8 July 2018): Conference Proceedings. – 2018. – Т. 18. – № 5.3. – S. 791-798

© В. Ю. Немов, 2021

ИННОВАЦИОННЫЕ И РЕСУРСНЫЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ РОССИИ

Александр Юрьевич Новиков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, лаборант, тел. (952)948-99-89, e-mail: a.novikov2@g.nsu.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, студент

С середины XX века стали активно изучаться инновационный и ресурсный фактор развития экономики. На данный момент актуальна проблема учета инновационного фактора в регрессионном анализе. Инновационному фактору соответствует несколько эмпирических показателей, но они не могут до конца отразить значение инноваций, используемое в теоретических моделях. Это порождает необходимость выбрать показатель наименее искажающий суть научно технического прогресса. С помощью панельных регрессий на данных по регионам России за 2014-2018 годы показано, что ресурсный фактор оказывает положительное влияние на экономический рост, а инновационный незначим.

Ключевые слова: ресурсные регионы, факторы экономического роста, научно-технический прогресс

INNOVATIVE AND RESOURCE FACTORS OF DEVELOPMENT IN RUSSIAN REGIONS

Alexander Yu. Novikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., laboratory assistant, phone: (952)948-99-89, e-mail: a.novikov2@g.nsu.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st., 2, Student,

The innovation and resource factor of economic development has been studied actively, since the middle of the 20th century. The problem of taking into account the innovative factor in regression analysis is urgent now. Several empirical indicators correspond to the innovation factor, but they cannot fully reflect the meaning of innovation used in theoretical models. There is a need to choose the indicator that would least distort the essence of the scientific and technical progress. We use panel regressions and data about Russian regions for 2014-2018. It was shown, that that the resource factor has a positive effect on economic growth, and the innovation factor is insignificant.

Keywords: resource regions, factors of economic growth, scientific and technological progress

Введение

На сегодняшний день выявлено множество факторов, влияющих на экономический рост регионов. Первоначально в экономической теории были выделены труд и капитал, однако полностью объяснить рост они не могли и ученые начали выделять другие факторы [1]: институциональный, фактор человеческого капитала, экологический, ресурсный [2,3] и др. Одним из ключевых факторов, наряду с трудом и капиталом, на данный момент принято считать научно-технический прогресс (НТП). НТП — это поступательное движение науки и техники,

эволюционное развитие всех элементов производительных сил общественного производства на основе широкого познания и освоения внешних сил природы.

Модели, включающие инновационные факторы впервые построили Роберт Солоу [4] и Тревор Сван [5], рассматривавшие инновации как экзогенный фактор. После того, как было обращено внимание на важность технологического прогресса, появились и модели роста с эндогенным подходом к учету инноваций, разработанные З. Грилихесом [6] или Д. Джоргенсоном [7]. Несмотря на множество разработанных математических моделей, включение НТП в регрессионные модели до сих пор остается затруднительным.

Цель работы – отобрать наиболее объективные численные показатели НТП и проверить влияние инновационного и ресурсного фактора на экономическое развитие регионов.

Методика и информационная база

Для сравнения характеристик показателей НТП использовались общенаучные методы качественного и количественного анализа, обобщение, сравнительный, а также логический анализ.

Для исследования численного влияния показателей на экономическое состояние регионов использовались панельные регрессии с фиксированными и случайными эффектами, и сквозная. Тестировались гипотезы о влиянии инновационного и ресурсного фактора на ВРП на душу населения. Выявление лучшей модели осуществлялось с помощью тестов Хаусмана, Бройша-Пагана и F-теста.

Информационной базой исследования являются: ежегодный статистический сборник «Регионы России 2019» и данные федеральной службы государственной статистики. Использовались данные за 2014-2018 годы.

Результаты.

Обзор показателей, отражающих влияние инновационного фактора

Достаточно часто факторы, рассматриваемые в экономической теории, являются сильно обобщенными, и трудно сопоставить им реальный показатель, что наблюдается и в случае с НТП. Не существует единой методологии, позволяющей из собираемых экономических данных рассчитать показатель научного прогресса, объективно соответствующий определению. Таким образом, появляется противоречие между теоретическим фактором и показателями, его описывающими. Тем не менее можно выделить некоторые статистические показатели, приближенно отражающие степень научного прогресса: внутренние затраты на научные исследования и разработки; объем (доля) инновационных товаров, работ и услуг; численность персонала, занятого научными разработками (возможно с уточнением степени квалификации); организации, занимающиеся исследованиями и разработками; количество патентов.

Основными достоинствами данных показателей являются простота измерения, сбора и доступность, но имеется и ряд недостатков. Во-первых, имеет место обезличенность показателей. Организации не различаются по масштабу, затраты

по направленности и т.п. Невозможно выделить исследования, которые точно повлияют на увеличение производительности труда и накопление знаний, поэтому приходится учитывать все при предположении, что эффективность исследований везде одинаковая. Во-вторых, можно выделить временные противоречия. Условно можно считать, что данные показатели являются отражением НТП в текущий момент времени. Фактически же, проводимые сейчас исследования повлияют на прогресс с некоторым временным лагом, т.к. даже от момента получения патента, до начала повсеместного использования технологии проходит длительный период времени. В-третьих, проблемы учета взаимодействия между акторами, как на межрегиональном, так и на межстрановом уровне. Отдельная страна или регион может не проводить большое количество исследований или просто фокусироваться на определенных отраслях, но при этом все равно может происходить переток знаний и поставка современного оборудования из-за рубежа. Таким образом, влияние инновационного фактора, выраженного числом организаций или научных сотрудников, для отдельных регионов может быть занижено.

Формирование инноваций и технологий чаще всего происходит в основных научных центрах (г. Москва и г. Санкт-Петербург). Наукоемкое производство выгоднее размещать рядом с такими центрами для налаживания взаимодействия. Удаленным от центра ресурсным регионам зачастую труднее наладить наукоемкие производства, и выгоднее сконцентрироваться на добывающей промышленности, что в долгосрочной перспективе негативно сказывается на диверсификации их экономики. Для отражения данного явления можно использовать показатель произведенной инновационной продукции или её доли в общей стоимости товаров и услуг. Из всех перечисленных он обладает наименьшим количеством недостатков.

Регрессионный анализ

Для проверки влияния инновационного и ресурсного фактора на экономический рост регионов была построена регрессия:

$$LN(GRP_{per}) = \alpha_1 LN(L) + \alpha_2 LN(OF) + \alpha_3 LN(Inov) + \alpha_4 pOF + e, \quad (1)$$

где GRP_{per} – объясняемая переменная, ВВП на душу населения (рублей); L – трудовой фактор, численность рабочей силы в регионе (тыс. чел.); OF – фактор капитала, объем основных фондов в регионе (млн. руб.); $Inov$ – инновационный фактор, объем отгруженной инновационной продукции (млн. руб.); pOF – ресурсный фактор, доля основных фондов добывающих отраслей. $LN()$ – означает применение логарифмирования к показателю для устранения гетероскедастичности и перехода к эластичностям факторов. К pOF логарифмирование не применялось из-за наличия нулевых значений.

Для сбалансированности панели в регрессии использовались только 82 региона, т.к. не хватало данных по республикам Крым и Хакасия, а также г. Сева-

стополи. В результате проведенных тестов лучшей оказалась модель с фиксированными эффектами (табл. 1).

Инновационный фактор оказался не значим, ресурсный значим на 1% уровне. Ресурсный фактор положителен, что говорит об отсутствии негативного проявления ресурсной зависимости регионов. Классические факторы оказались значимы на 0,1% уровне, однако коэффициент при логарифме численности рабочих отрицателен. Это можно объяснить тем, что ресурсные регионы, особенно северные, за счет добычи имеют большой ВРП при сравнительно намного меньшем населении, что и выявляется в регрессии.

Таблица 1

Оценка параметров, влияющих на ВРП на душу населения по регионам РФ, четыре объясняющих фактора

	<i>Коэфф.</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>
LN(L)	-0.9414	0.1611	-5.84	1.25e-08
LN(OF)	0.7434	0.0255	29.11	2.2e-16
LN(Inov)	-0.0003	0.0042	-0.08	0.9384
pOF	0.0028	0.0010	2.85	0.0047
Количество наблюдений (N)			82	
Значимость F			2.22e-16	
R ²			0.79263	
Скорректированный R ²			0.73789	

Обсуждение

Таким образом, было показано положительное влияние ресурсного фактора на экономику регионов, что согласуется с другими исследованиями по России и Китаю [8,9]. Однако в данном исследовании влияние ресурсов на ВРП незначительно. Повышение доли добывающих отраслей в структуре OF при прочих равных приводит к увеличению ВРП на душу населения всего на 0,28%.

Отсутствие влияния инновационного фактора можно объяснить либо незначительной долей инновационной продукции в целом, ведь целевых индикаторов инновационной стратегии РФ до 2020 достичь не удалось [10], либо проблемами с показателем, описанными ранее. В любом случае, практический результат расходится с теоретической концепцией положительного влияния инноваций [11].

Заключение

В данной работе был описан ряд противоречий между теоретическим учетом инновационного фактора и включением эмпирических показателей в регрессионный анализ. Ключевыми из них стали: обезличенность показателей, про-

блема не учета временного лага, проблема учета обмена информацией между акторами.

С помощью регрессионного анализа на панельных данных было продемонстрировано положительное влияние ресурсного фактора на экономику, однако инновационный фактор оказался незначим, что в частности может объясняться описанными недостатками. Проблема учета НТП в регрессионном анализе остается открытой.

Исследование выполнено в рамках проекта № 0331-2019-0028 ИНГТ СО РАН в рамках государственной программы «Выполнение фундаментальных научных исследований»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономарева Е.А. Божечкова А.В., Кнобель А.Ю. Факторы экономического роста – М.: Издательский дом ДЕЛО. – 2012. – 185с.
2. Шалаева А.А. Влияние наличия природных ресурсов на экономический рост стран – М.: Мир новой экономики. – 2015. – № 4. – с 41-47.
3. Gelb A. and Associates. Oil Windfalls: Blessing or Curse? - New York, World Bank: Oxford University Press. –1988. – 357р.
4. Solow R. A Contribution to the Theory of Economic Growth // Quarterly Journal of Economy. – 1956. – P.65-94.
5. Swan T. W. Economic Growth and Capital Accumulation // Economic Record. – 1956. – Vol. 32. – Is. 2 – P.334–361.
6. Griliches Z. The Sources of Measured Productivity Growth: United States Agriculture, 1940–1960 // The Journal of Political Economy. – Vol. 71. – No. 4. – 331-346р.
7. Jorgenson D. W. The embodiment Hypothesis. // The Journal of Political Economy. – 1966. – V. 74. – No. 1. – P.1-17.
8. Xiangyan Qian, Di Wang, Jia Wang, Sai Chen, Resource curse, environmental regulation and transformation of coal-mining cities in China // Resources Policy. – 2019.
9. Filimonova, I. V., Eder, L. V., Komarova, A. V., Provornaya, I. V., Nemov, V. Yu. Resource regions of Russia: Socio-economic indicators and innovative development. // В: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Том 206. – № 1.
10. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года. . [Электронный ресурс] – 2011. – URL: <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm>
11. Баширова З.А., Исхакова Э.И. Влияние инноваций на экономический рост. // Экономика Профессия Бизнес. – 2019. – No. 1. – С.19-23.

REFERENCES

1. Ponomareva E.A. Bozhechkova A.V., Knobel' A.YU. Faktory ekonomicheskogo rosta – М.: Izdatel'skij dom DELO. – 2012. – 185s.
2. SHalaeva A.A. Vliyanie nalichiya prirodnyh resursov na ekonomicheskij rost stran – М.: Mir novoj ekonomiki. – 2015. – № 4. – s 41-47.
3. Gelb A. and Associates. Oil Windfalls: Blessing or Curse? - New York, World Bank: Oxford University Press. –1988. – 357r.
4. Solow R. A Contribution to the Theory of Economic Growth // Quarterly Journal of Economy. – 1956. – P.65-94.
5. Swan T. W. Economic Growth and Capital Accumulation // Economic Record. – 1956. – Vol. 32. – Is. 2 – R.334–361.
6. Griliches Z. The Sources of Measured Productivity Growth: United States Agriculture, 1940–1960 // The Journal of Political Economy. – Vol. 71. – No. 4. – 331-346р.

7. Jorgenson D. W. The embodiment Hypothesis. // The Journal of Political Economy. – 1966. – V. 74. – No. 1. – P.1-17.
8. Xiangyan Qian, Di Wang, Jia Wang, Sai Chen, Resource curse, environmental regulation and transformation of coal-mining cities in China // Resources Policy. – 2019.
9. Filimonova, I. V., Eder, L. V., Komarova, A. V., Provornaya, I. V., Nemov, V. Yu. Resource regions of Russia: Socio-economic indicators and innovative development. // V: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Tom 206. – № 1.
10. Strategiya innovacionnogo razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2020 goda. . [Elektronnyj resurs] – 2011. – URL: <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm>
11. Bashirova Z.A., Iskhakova E.I. Vliyanie innovacij na ekonomicheskij rost. // Ekonomika Professiya Biznes. – 2019. – No. 1. – S.19-23.

© A. Ю. Новиков, 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ТАРИФООБРАЗОВАНИЯ НА ТРУБОПРОВОДНЫЕ ПОСТАВКИ РОССИЙСКОЙ НЕФТИ

Алина Олеговна Першина

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, студент, тел (913)753-79-26, e-mail: alina_pershina@bk.ru

Екатерина Андреевна Земнухова

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

Адекватный и взвешенный выбор модели регулирования тарифов на поставки углеводородов по трубопроводам оказывает определяющее влияние на уровень издержек участников процесса транспортировки, прибыли хозяйствующих субъектов. Приводится классификация методов определения тарифов на транспортировку нефти, особенности формирования тарифов в США и России, а также сравнительный анализ стоимости транспортировки различными видами транспорта для этих стран. Выбор в работе американского и российского рынков обусловлен тем, что наиболее близким по масштабам развития нефтяной отрасли, а также степени развитости трубопроводной системы к РФ является нефтетранспортная инфраструктура США.

Ключевые слова: тарифы на транспортировку нефти, методика определения тарифа, стоимость транспортировки нефти

RESEARCH OF TARIFF FORMATION FOR PIPELINE DELIVERIES OF RUSSIAN OIL

Alina Ol. Pershina

Novosibirsk National Research State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova str. 2, student, phone: (913)753-79-26, e-mail: alina_pershina@bk.ru

Ekaterina A. Zemnukhova

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

An adequate and balanced choice of a model for regulating tariffs for the supply of hydrocarbons through pipelines has a decisive impact on the level of costs of participants in the transportation process, and the profits of economic entities. The classification of methods for determining tariffs for oil transportation, the specifics of the formation of tariffs in the United States and Russia, as well as a comparative analysis of the cost of transportation by various modes of transport for these countries are presented. The choice in the work of the American and Russian markets is due to the fact that the US oil transportation infrastructure is the closest in terms of the scale of development of the oil industry, as well as the degree of development of the pipeline system to the Russian Federation.

Keywords: oil transportation tariffs, tariff determination methodology, cost of oil transportation

Введение

В России в соответствии с ФЗ «О естественных монополиях» от 17.08.1995 №147-ФЗ транспортируемая нефть по трубопроводам находится в области функционирования естественных монополий и регулируется государством [1].

Но при этом, существует проблематика в области регулирования естественных монополий, транспортирующих нефть по трубопроводам, начинает становиться крайне важной. Считается, что условия, в которых формируются методы регулирования естественных монополий могут быть фактором, который определяет дальнейший ход развития топливно-энергетического комплекса. Аналогичная ситуация встречается в крупных и развитых странах в сфере промышленности, такие как США.

В связи с этими особенностями топливно-энергетического комплекса России необходимо разрабатывать особенные модели в сфере регулирования естественных монополий. Так как ПАО «Транснефть» находится в руках государства, то оно и регулирует всю систему магистральных трубопроводов. Этот контроль проявляется в праве доступа к нефтепроводам, принятии решений об инвестициях и изменении уровня тарифной величины.

Тогда, главным вопросом в таком положении становится проблематика в установлении и регулировании уровня объема и цены нефти, которая транспортируется по магистральным трубопроводам, и государство здесь играет важную роль в определении величины тарифов транспортировки нефти. Компания, транспортирующая нефть, в свою очередь, должна правильно установить величину грузооборота, тарифа и структуру его составляющих. И в таком случае, от того насколько точно установится уровень тарифа зависит эффективность деятельности комплекса трубопроводов в целом.

Актуальность обусловлена тем, что существует проблема в соответствии величины тарифа на транспортировку нефти производственным возможностям предприятий, транспортирующих нефть по трубопроводам.

Объектом исследования является система тарифообразования на транспортировку нефти в России и США.

Предметом исследования является формирование величины тарифа на поставки нефти на территории Российской Федерации.

Цель работы можно определить, как оценка формирования тарифов на транспортировку нефти по трубопроводам на российском и американском рынках.

В отечественной и зарубежной литературе широкое распространение получили работы, связанные с особенностями тарифообразования на транспортировку нефти. В таблице 1 представлен краткий обзор исследований и основных идей, вынесенных из них [2-5].

**Краткий обзор исследований на тему тарифообразования
на транспортировку нефти**

Название исследования	Основные выводы
«Тарифная политика США как опыт для России»	Рассмотрено тарифообразование на транспортировку нефти железнодорожным транспортом. Выявлен положительный опыт США для учета Россией в формировании тарифов.
«Формирование тарифов на транспортировку нефти», «Тарифное регулирование как фактор инвестиционных возможностей монополий трубопроводного транспорта нефтепродуктов» «Методические подходы и практика формирования тарифов на транспортировку нефти по магистральным трубопроводам»	Рассмотрены три основных метода формирования тарифов; Выявлены преимущества работы одного из них в США. Проведен анализ существующих нормативных документов в сфере регулирования тарифообразования; Определен оптимальный метод тарифообразования.
«Market power analysis for oil pipelines facing excess demand»	В статье предлагается несколько способов оценки конкурентоспособности тарифа на основе цен нетбэка и поставленных цен или на основе оценочной стоимости, и приводится пример.

В отношении статистики публикаций можно сказать, что в общем количестве было выпущено приблизительно 80 работ, а первая работа на тему тарифообразования поставок нефти была выпущена в 1937 году, наибольшее количество исследований было выпущено в США.

Особенности формирования тарифов в России и США

В США существует Федеральная Комиссия по регулированию в области энергетики (FERC). Она занимается регулированием цен, полноценного функционирования трубопроводов, которые транспортируют нефть. Другими словами, FERC занимается регулированием деятельности трубопроводных предприятий, но не регулирует те компании, чьи трубопроводы не находятся на федеральной земле. Абсолютно каждая компания имеет возможность свободного входа и выхода на рынок. Федеральная Комиссия по регулированию в области энергетики в первую очередь следит за тем, чтобы устанавливаемые тарифы были справедливыми и рациональными. В случае, если компании нарушают условия FERC, то комиссия имеет право самостоятельно установить тариф.

Начиная с января 1995 года, в США основным методом для установления тарифа является метод индексации. Когда происходит расчет сводного индекса используют изменение PPI-FG- индекса цен производителей на конечные продукты. Например в 2006 году сводный индекс рассчитывался по формуле: (PPI-FG)+1.3%. Тогда в США, после публикации Федеральная Комиссия считает сводный индекс, например, PPI-FG за 2003 год равен 143,3, а в 2004 году -148,5,

значит сводный индекс в промежутке с 1 июля 2005 года до 30 июня 2006 года будет равен: $1 + \frac{148,5-143,3}{143,3} = 1,036$. Повышение тарифов со стороны компаний происходят так, что они направляют заявку в FERC, в случае, если предлагаемый тариф ниже рабочего индекса, то тариф может быть введен в работу, если выше не может. Основное преимущество- компании сами следят за уровнем инфляции и по мере ее роста- корректируют тариф, прост в использовании.

В России существует Постановление Правительства Российской Федерации от 26.03.2019 №317 «О порядке определения индикативного тарифа на транспортировку нефти», которое подразумевает формирование тарифа на основе трех составляющих, таких как стоимость транспортировки нефти по территории России, стоимость перевалки нефти в российских портах, стоимость транспортировки нефти за рубежом [6]. Сейчас за основу расчета тарифа взят индекс потребительских цен и это не совсем рационально, так как необходимая продукция для закупки Транснефтью в продовольственном магазине не продается. Хотя Транснефть и выдвигало предложение брать за основу динамику цен в промышленности, строительстве и стоимости электроэнергии, ни к каким результатам это не привело и уже в октябре 2020 года правительство РФ утвердило принцип ежегодного роста тарифов по принципу «инфляция минус 0,1%» на 2021-2030 годы.

При рассмотрении сравнительной характеристики стоимости транспортировки нефти различными видами транспорта для России видно, что на рисунке 1 при росте расстояния транспортировки намного выгоднее поставлять нефть трубопроводами. В США складывается приблизительно такая же картина цен (Рисунок 2). На короткие и средние расстояния нефть транспортировать выгоднее танкерами, так как в Техас намного превышает уровни добычи нефти других районов, расходы на нефтетранспортировку низки именно потому, что ее можно транспортировать танкерами по Мексиканскому заливу. В конечном итоге нефть транспортировать трубами выгоднее не только с точки зрения сравнительно низких цен, но и из-за возможности создать кратчайший путь поставки, нет связи с климатом и временем года.

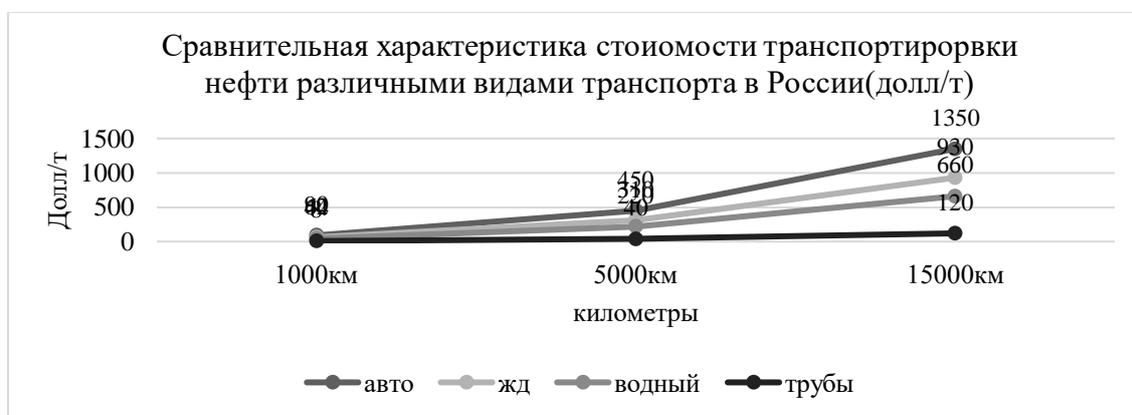


Рис. 1. Сравнительная характеристика видов транспортировки нефти в РФ (долл/т) на 2021 год (по курсу на 17 марта 2021)

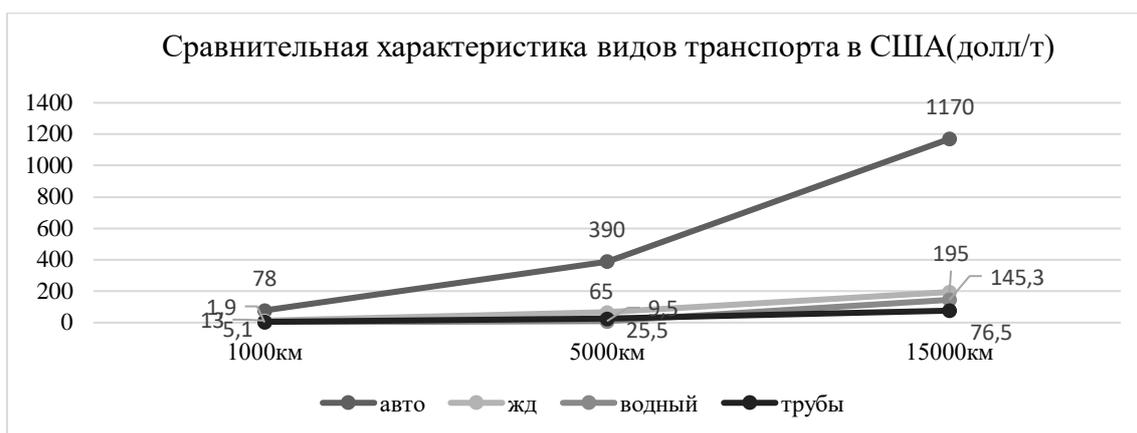


Рис. 2. Сравнительная характеристика видов транспортировки в США (долл/т) на 2021

Заключение

Таким образом, рассмотрев особенности трайфообразования в России и, сравнив его с опытом США, можно сделать следующие выводы:

1. В США функционирует большое количество частных компаний, занимающихся транспортировкой нефти по трубам. С одной стороны это затрудняет освоение новых районов с нефтью, с другой- создает конкурентные условия на рынке, есть возможность выбрать компанию с более низким тарифом.

2. Регулирование величины тарифов в США заключается только в разработке нормативных документов, определяющих методику, не влияя непосредственно на саму величину тарифа. В России применяется более суровый подход, интерес направлен больше на защиту нефтедобывающих компаний.

3. Так как в США многие компании, которые занимаются транспортировкой нефти еще и ее добывают, перерабатывают и продают. Это определенно облегчает задачу реализации инвестиционных проектов, так как существует более широкий финансовый инструментов, чем для российской компании ПАО «Транснефть».

4. Транспортировка трубами является наиболее выгодным способом как в России, так и в США. Опыт США, несомненно, полезен для России, например, с точки зрения большей свободы действий из-за более слабого государственного контроля.

Исследование выполнено при финансировании РФФИ в рамках научного проекта №20-310-90059

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон "О естественных монополиях" от 17.08.1995 N 147-ФЗ
2. Суханова А.В. Тарифная политика США как опыт для России // Перспективы науки. – 2016. – №10(85). – С. 20-23.

3. Гривцова И.И., Глызина Т.С. Формирование тарифов на транспортировку нефти. – 2016. – С. 1004-1006.
4. Глызина Т.С., Шарф И.В., Очиров С.Е. Тарифное регулирование как фактор инвестиционных возможностей монополий трубопроводного транспорта нефтепродуктов // Фундаментальные исследования. –2013. –№ 11-8. –С. 1689-1692.
5. Гончарова Н.В., Серикова И.П. Методические подходы и практика формирования тарифов на транспортировку нефти по магистральным трубопроводам // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. –2015. –№3(19). – С.69-77.
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 26.03.2019 № 317 "О порядке определения индикативного тарифа на транспортировку нефти"

REFERENCES

1. Federal Law «On Natural Monopolies» of 17.08.1995 N 147-FZ
2. Sukhanova A.V. US tariff policy as an experience for Russia // Prospects of science. – 2016. – №10(85). – P. 20-23.
3. Grivtsova I. I., Glyzina T. S. Formation of tariffs for oil transportation. -2016. - p. 1004-1006
4. Glyzina T. S., Sharf I. V., Ochirov S. E. Tariff regulation as a factor of investment opportunities of monopolies of pipeline transport of petroleum products / Fundamental Research. -2013. - No. 11-8. - pp. 1689-1692.
5. Goncharova N. In., Serikova I. P. Methodological approaches and practice of formation of tariffs for transportation of oil through pipelines // Science and technology of pipeline transport of oil and oil products. -2015. –№3(19). – P. 69-77.
6. Resolution of the Government of the Russian Federation dated 26.03.2019 № 317 "On the procedure for determining the indicative tariff for oil transportation"

© А. О. Першина, Е. А. Земнухова, 2021

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА В РОССИИ

Ирина Викторовна Проворная

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, тел. 8(383)333-28-14, e-mail: provornayaiv@gmail.com

В работе определены основные перспективные направления и условия повышения уровня эффективности использования попутного нефтяного газа в России. Показано, что государственная стратегия, направленная на обеспечение 95 % уровня утилизации ПНГ осуществима при разработке комплексной системы мер стимулирования компаний, в первую очередь, в применении новейших технологий и оборудования для переработки ПНГ, а также выполнения требований лицензионных соглашений.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ, добыча, потребление, утилизация, сжигание, государство, экология

PROBLEMS OF COMPLEX DEVELOPMENT OF THE RESOURCE REGIONS, FOR EXAMPLE THE UTILIZATION OF ASSOCIATED PETROLEUM GAS

Irina V. Provornaya

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., PhD, Senior Researcher, tel. 8-(383)-333-28-14, e-mail: ProvornayaIV@gmail.com

The paper identifies the main promising directions and conditions for increasing the level of efficiency in the use of associated petroleum gas in Russia. It is shown that the state strategy aimed at ensuring a 95% level of APG utilization is feasible in the development of a comprehensive system of incentives for companies, primarily in the use of the latest technologies and equipment for APG processing, as well as in fulfilling the requirements of licensing agreements.

Keywords: associated petroleum gas, production, consumption, resource regions, utilization, incineration, state, ecology

Введение

Вопрос выбора наиболее эффективной технологии утилизации или использования попутного газа стоит довольно остро в течение последних 10 лет. Тенденции снижения уровня выбросов в окружающую среду приводят к увеличению штрафов за самый простой способ утилизации ПНГ - факельное сжигание и увеличению мотивации к развитию других способов использования попутного нефтяного газа, имеющих меньшее негативное влияние на окружающую среду. Теперь компании вынуждены выбирать наиболее эколого-экономически эффективный способ утилизации попутного нефтяного газа с учетом возможных штрафов, ущерба окружающей среде, требуемых инвестиций для реализации выбранного метода. В настоящее время одной из основных задач, связанной с регули-

рованием процесса утилизации ПНГ, перед государством является создание налоговых, финансовых организационных, административных стимулов для развития нефтегазового комплекса России.

Целью научной работы является выявление особенностей использования попутного нефтяного газа в России. В соответствии с целью работы были поставлены задачи:

1. Показать тенденции изменения динамики добычи, потребления ПНГ по компаниям и регионам России;
2. Определить направления эффективного использования ПНГ в России;
3. Выявить основные причины, которые объясняют низкий уровень качественного использования ПНГ в России.

Теоретическая и практическая значимость научной работы заключается в разработке предложений и материалов по формированию научно-методического аппарата исследования проблем комплексного освоения ресурсных регионов на примере утилизации ПНГ.

Представленная научная работа может быть использовано в качестве:

1. Материалов при проведении государственной политики в области регионального развития, в том числе комплексного освоения ресурсных регионов с учетом повышения коэффициента эффективного использования ПНГ;
2. Учебно-методических разработок по вопросам эффективного использования ПНГ в ресурсных регионах России.

Для выявления проблем комплексного освоения ресурсных регионов на примере утилизации ПНГ предлагается использование совокупности методов системного анализа (функциональный, исторический, каузальный), а также методов классификации данных для выявления устойчивых тенденций и структурных сдвигов в развитии добычи и потребления ПНГ в России.

Методы и материалы

Для выявления особенностей использования попутного нефтяного газа предлагается использование совокупности методов системного анализа (функциональный, исторический, каузальный), а также методов классификации данных для выявления устойчивых тенденций и структурных сдвигов в развитии добычи и потребления ПНГ в России.

Для выявления и систематизации ключевых направлений повышения уровня эффективного использования ПНГ будут применены методы и инструменты стратегического менеджмента и экономического анализа.

Использованы статистические данные Федеральной службы государственной статистики, официальные документы Правительства Российской Федерации, статистические материалы и научные статьи по итогам развития нефтегазового комплекса России – «ТЭК России», «ИнфоТЭК», «Разведка и добыча», «Бурение и нефть», «Нефть России», «Нефтегазовая вертикаль». Рассмотрены отечественные и зарубежные научные работы, найденные в системах Scopus, Web of Science, «elibrary.ru».

Результаты и обсуждение

Производство попутного нефтяного газа в России в 2020 г. составила 114,8 млрд куб. м., в том числе 94,7 млрд куб. м или 82,5 % было добыто и использовано, а 20,1 млрд куб. м или 17,5 % – сожжено (Таблица 1) [2].

Добычей ПНГ на российском нефтяном рынке занимаются ВИНК (вертикально-интегрированные компании), независимые производители и операторы СРП (соглашение о разделе продукции). На долю ВИНК приходится около 74 % (69,8 млрд. куб. м) добычи ПНГ от общей структуры производства ПНГ в России.

В 2020 г. на 4 крупнейших компаний нефтегазового сектора («Роснефть», «Сургутнефтегаз», «ЛУКОЙЛ» и «Газпром нефть») пришлось почти 70 %.

Таблица 1

Добыча и использование ПНГ в России, млрд куб. м

Компании, предприятия	Сожжено на факелах			Использовано, всего			Добыча (с учетом сожжения), всего		
	2015	2020	2020/ 2019, %	2015	2020	2020/ 2019, %	2015	2020	2020 / 2019 , %
Нефтяные компании (ВИНК)	7,5	13,0	9,6	61,4	69,8	-2,6	68,9	82,7	-0,9
"ЛУКОЙЛ"	0,9	0,3	-11,5	10,2	11,3	-2,1	11,1	11,5	-2,3
"Роснефть"	4,4	9,6	19,2	31,2	30,3	-4,8	35,6	40,0	0,1
"Сургутнефтегаз"	0,1	0,0	-2,9	9,5	9,0	-5,0	9,6	9,1	-5,0
"Газпром нефть"	1,7	2,0	-23,9	6,5	15,4	9,0	8,2	17,3	4,0
"Татнефть"	0,1	0,0	-3,4	0,9	0,8	-18,3	1,0	0,8	-17,7
"Башнефть"	0,2	0,1	-42,8	0,6	0,5	-17,8	0,8	0,6	-21,0
"Нефтегазхолдинг"		0,0	140,0		0,1	5,4	0,0	0,1	8,4
"Славнефть"	0,1	0,9	53,2	0,9	0,6	-41,0	1,0	1,5	-5,4
"РуссНефть"	0,1	0,1	-37,1	1,5	1,8	-11,8	1,6	1,9	-12,9
Независимые производители	2,6	6,9	-8,4	7,1	12,8	14,6	9,7	19,7	5,3
Операторы СРП	0,2	0,2	-21,9	10,1	12,2	8,0	10,3	12,4	7,3
Всего по России	10,4	20,1	2,3	78,6	94,7	0,7	89,0	114,8	0,9

Источник: ТЭК России– № 1. – 2014–2021.

Способы утилизации ПНГ универсальны по миру, но применяются в разных соотношениях. Наиболее квалифицированным использованием ПНГ считается его переработка [3]. Практически на всех российских заводах по переработке попутного нефтяного газа разделяют ПНГ на легкие и тяжелые фракции. Легкие фракции отправляются в газопроводы. Тяжелые фракции транспортируются на газоперерабатывающие заводы, нефтехимические комплексы, где имеются газо-

фракционные установки с целью дальнейшего выделения бутана, пропана, пентана, гексана и их смеси [4].

По итогам 2020 г. уровень использования ПНГ в России составляет 83%. При этом 95 % уровень эффективной утилизации ПНГ в России смогли достичь: «Сургутнефтегаз», операторы СРП, РуссНефть», «ЛУКОЙЛ» «Нефтегазхолдинг». Основными причинами низкого уровня утилизации ПНГ у компаний стали срывы сроков строительства инфраструктуры для транспортировки и переработки ПНГ, аварии на перерабатывающих мощностях.

После резкого роста среднего коэффициента полезного использования ПНГ в 2015 г. (88,3%) этот показатель вновь сильно сократился в 2019 г. вследствие ввода в эксплуатацию новых месторождений с высоким содержанием газа и отсутствием необходимой инфраструктуры для утилизации ПНГ.

Крупнейшей компанией в России по переработке ПНГ является СИБУР – «Сибирско-Уральская нефтегазохимическая компания. В 2020 г. газоперерабатывающие заводы СИБУРа достигли рекордных значений (97 %) по глубине переработки ПНГ за всю историю компании, что стало возможным за счет реализации инвестиционной программы компании.

В качестве крупных компаний по переработке ПНГ можно отметить также компанию «Сургутнефтегаз», в 2020 г. которая переработала 5,8 трлн куб. м ПНГ и компания ЛУКОЙЛ, которая переработала в 2020 г. 4 трлн куб. м газа (Табл. 2).

Таблица 2

Переработки попутного нефтяного газа на ГПЗ в 2020 г. по компаниям

Предприятие	Объем переработки, млн. куб. м	%
СИБУР - Холдинг	21663	58,0
Газпромнефть	2019	5,4
ЛУКОЙЛ	4099	11,0
Сургутнефтегаз	5844	15,6
НК Роснефть	1801	4,8
Иркутская нефтяная компания	654	1,7
Татнефть	733	2,0
БерезкаГаз Компани	561	1,5
Итого	37374	100,0

Источник: ТЭЖ России – № 1. –2021

На данный момент уровень эффективной утилизации ПНГ в общем по России находится ниже 95 %. Основными причинами, которые объясняют низкий уровень качественного использования ПНГ в России является [6,7]:

- Недостойное количество мощностей по переработке ПНГ;
- Ограниченный доступ нефтяных компаний к единой системе газоснабжения;

- Существующие проблемы в нормативно-правовой базе;
- Незначительные штрафные санкции за выбросы продуктов горения попутного газа;
- Ценообразование на рынке ПНГ.

Несмотря на существующие трудности в сфере эффективной переработки ПНГ, в последние года наблюдается положительный тренд по сокращению уровня сжигания попутного нефтяного газа [8,9]. С 2010 г. этот показатель увеличился с 76 % до 83 % (2020 г.). Положительной тенденции в квалифицированной утилизации ПНГ удалось достичь благодаря применению административного и налогового механизмов, которые через систему штрафов и налоговых льгот стимулировали привлечение инвестиций в проблему утилизации и переработки ПНГ [10].

Уровень эффективной переработки ПНГ в малых нефтяных компаниях в настоящее время находится на низком уровне, что обусловлено отсутствием транспортной инфраструктурой и возможности равноправного доступа к ней, а также с низкими стимулами экономического характера [10-12]. Одним из вариантов повышения этого показателя является применение механизма государственно-частного партнерства – совместное (с государством) финансирование строительства производственной и транспортной инфраструктуры, а также обеспечение государственных гарантий при получении кредитов на развитие инновационных технологий [13-15]. Задачей государства является стимулирование и создание всего комплекса условий, необходимых для максимально полной утилизации ПНГ.

Заключение

Эффективное развитие ресурсных регионов России непосредственно связано с вопросами повышения уровня квалифицированного использования ПНГ и доведения этого показателя до 95 % по всем нефтегазовым компаниям и ресурсным регионам страны. Эта государственная программа осуществима при разработке комплексной системы мер стимулирования нефтегазовых компаний, в первую очередь, в применении новых технологий и нового оборудования для переработки ПНГ, а также выполнения требований лицензионных соглашений. Также необходимо разработать четкую методику ценообразования на попутный нефтяной газ, применить гибкую систему налогообложения, урегулировать взаимоотношения нефтегазовых компаний с компанией собственником ЕСГ.

Статья выполнена при финансировании базового проекта НИР лаборатории 349 ИНГГ СО РАН № 0331-2019-0028

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эдер Л.В., Проворная И.В., Филимонова И.В. Добыча и утилизация попутного нефтяного газа как направление комплексного освоения недр: роль государства и бизнеса, технологий и экологических ограничений // Бурение и нефть. – 2016. – № 10. – С. 8-15.

2. Итоги производственной деятельности отраслей ТЭК России// ТЭК России – № 1. – 2010-2018.
3. Конторович А.Э., Эдер Л.В. Новая парадигма стратегии развития сырьевой базы нефтедобывающей промышленности Российской Федерации // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2015. – № 5. – С. 8-17.
4. Презентация о компании, СИБУР – 2018.
5. Kontorovich A.E., Eder L.V., Filimonova I.V., Mishenin M.V., Nemov V.Y. Oil industry of major historical centers of the Volga-Ural petroleum province: past, current state, and long-run prospects // Russian Geology and Geophysics. – 2016. – Vol. 57. – I. 12. – P.1653-1667.
6. Kontorovich A.E., Eder L.V., Nemov V.Yu. Oil and gas in the Russian economics // Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry. – 2013. – P. 4-8
7. Eder L.V., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Nemov V.Y. The current state of the petroleum industry and the problems of the development of the Russian economy // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – 84(1). – P.012012.
8. Kontorovich A.E., Eder L.V., Filimonova I.V. Paradigm oil and gas complex of Russia at the present stage // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. –84(1). – P.012010.
9. Filimonova I.V., Eder L.V., Mishenin M.V., Mamakhatov T.M. Current state and problems of integrated development of mineral resources base in Russia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – 84(1). –P.012011
10. Eder L.V., Kontorovich A.E., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Goosen E.V. Regional innovation cluster: Environmental issues and efficient use of resources // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2017. – 17(53). – P. 719-726.
11. Korzhubayev A.G., Filimonova I.V., Eder L.V., Sokolova I.A. Strategy of Development of an Oil-And-Gas Complex Siberia // Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry. – 2009. – P.14-17.
12. Eder L.V., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Nemov V.U., Nikitenko S.M. Regional smart specialisations in fostering innovation development of resource regions of Russia // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2017. – 17(53). – P.727-734.
13. Eder L.V., Filimonova I.V., Kozhevnikov V.D. Analysis of efficiency of the largest oil and gas companies of Russia // Problems of economics and management of oil and gas complex. – 2016. – No. 3. – P. 9-18
14. Korzhubayev AG, Filimonova IV, Eder LV, Light future in hydrocarbon tones // Oil of Russia. – 2007. – № 7. – P. 37.
15. Filimonova I.V., Eder L.V., Provornaya I.V., Mochalov R.A., Sustainable trends and regularities of development of taxation of oil and gas complex of Russia // Subsoil use of the XXI century. – 2016. – № 5. – P. 34-47.

REFERENCES

1. Eder L.V., Provornaya I.V., Filimonova I.V. Dobycha i utilizatsiya poputnogo neftyanogo gaza kak napravlenie kompleksnogo osvoeniya neдр: rol' gosudarstva i biznesa, tekhnologij i ekologicheskikh ogranichenij // Burenie i neft'. – 2016. – № 10. – S. 8-15.
2. Itogi proizvodstvennoj deyatelnosti otraslej TEK Rossii// TEK Rossii – № 1. – 2010-2018.
3. Kontorovich A.E., Eder L.V. Novaya paradigma strategii razvitiya syr'evoj bazy neftedobyvayushchej promyshlennosti Rossijskoj Federacii // Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie. – 2015. – № 5. – S. 8-17.
4. Prezentatsiya o kompanii, SIBUR – 2018.

5. Kontorovich A.E., Eder L.V., Filimonova I.V., Mishenin M.V., Nemov V.Y. Oil industry of major historical centers of the Volga-Ural petroleum province: past, current state, and long-run prospects // *Russian Geology and Geophysics*. – 2016. – Vol. 57. – I. 12. – P.1653-1667.
6. Kontorovich A.E., Eder L.V., Nemov V.Yu. Oil and gas in the Russian economics // *Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry*. – 2013. – P. 4-8
7. Eder L.V., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Nemov V.Y. The current state of the petroleum industry and the problems of the development of the Russian economy // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – 84(1). – P.012012.
8. Kontorovich A.E., Eder L.V., Filimonova I.V. Paradigm oil and gas complex of Russia at the present stage // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. –84(1). – P.012010.
9. Filimonova I.V., Eder L.V., Mishenin M.V., Mamakhatov T.M. Current state and problems of integrated development of mineral resources base in Russia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – 84(1). –P.012011
10. Eder L.V., Kontorovich A.E., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Goosen E.V. Regional innovation cluster: Environmental issues and efficient use of resources // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. – 2017. – 17(53). – P. 719-726.
11. Korzhubaev A.G., Filimonova I.V., Eder L.V., Sokolova I.A. Strategy of Development of an Oil-And-Gas Complex Siberia // *Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry*. – 2009. – P.14-17.
12. Eder L.V., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Nemov V.U., Nikitenko S.M. Regional smart specialisations in fostering innovation development of resource regions of Russia // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. – 2017. – 17(53). – P.727-734.
13. Eder L.V., Filimonova I.V., Kozhevin V.D. Analysis of efficiency of the largest oil and gas companies of Russia // *Problems of economics and management of oil and gas complex*. – 2016. – No. 3. – P. 9-18
14. Korzhubaev AG, Filimonova IV, Eder LV, Light future in hydrocarbon tones // *Oil of Russia*. – 2007. – № 7. – P. 37.
15. Filimonova I.V., Eder L.V., Provornaya I.V., Mochalov R.A., Sustainable trends and regularities of development of taxation of oil and gas complex of Russia // *Subsoil use of the XXI century*. – 2016. – № 5. – P. 34-47.

© И. В. Проворная, 2021

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ УГОЛЬНЫХ КОМПАНИЙ С ПОЗИЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Екатерина Александровна Тимофеева

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, студент, e-mail: timofeeva.k.a@mail.ru

Михаил Владимирович Мишенин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.э.н., с.н.с., e-mail: MisheninMV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент каф. Политической экономики

В статье описан методический подход для оценки устойчивого развития угольных компаний, при помощи интегрального показателя с включением экологических показателей. Описаны значимость предложенной методики и критерии ее составления.

Ключевые слова: устойчивое развитие, экологические показатели, экологизация

IMPROVING METHODS FOR ASSESSING THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF COAL COMPANIES FROM THE PERSPECTIVE OF ENVIRONMENTAL INDICATORS

Ekaterina A. Timofeeva

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, student, e-mail: timofeeva.k.a@mail.ru

Mikhail V. Mishenin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., PhD, Senior Researcher, e-mail: MisheninMV@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, st. Pirogova 2, associate professor of the department. Political economy

The article describes a methodological approach for assessing the sustainable development of coal companies, using an integral indicator with the inclusion of environmental indicators. The significance of the proposed methodology and the criteria for its compilation are described.

Keywords: sustainable development, environmental indicators, greening

Топливо-энергетический комплекс является одной из главных частей экономики большинства стран. Значение ТЭК для развития экономики этих стран велико, так как возникает рост потребления электроэнергии предприятиями всех типов отраслей экономики. Комплекс является межотраслевым, он обладает наличием производственных связей с текстильной, химической промышленностью, а также металлургией, при этом обеспечивая их энергией. Одной из ведущих отраслей ТЭК является – угольная промышленность и по состоянию на

начало 2020-х годов угольное топливо пытается сохранить свою популярность в мире. В мировом топливно-энергетическом балансе уголь занимает третье место уступая свои позиции нефти и газу [Построение топливно-энергетического баланса РФ, электронный ресурс;2020]. И уголь по-прежнему играет значительную роль в экономике благодаря его многократному использованию в качестве источника энергии для производства электроэнергии, производства стали и цемента, углеродного волокна, мобильных телефонов и даже домашнего использования. Поэтому было важно создать международный признанный стандарт для угледобывающей промышленности, позволяющий как производителям, так и покупателям угля иметь уверенность и управлять рисками в своих цепочках поставок [1].

В современных условиях экономика России находится в состоянии преобразований, которые связаны с усилением процессов глобализации, ужесточением конкурентоспособности и управлением производственными системами. Одним из наиболее значимых секторов хозяйства России является топливно-энергетический комплекс. В России топливно-энергетический комплекс влияет на рост экономики, так как его доля в объеме ВВП равна около 30%, а поступления в доходную часть бюджета более 40 %. [Статистика в угольной промышленности; 2019] Общий объем добычи угля по Российской Федерации в 2019 г. составил 441 387 тыс.т. (темп роста к уровню 2016 г. – 114,4%, в 2016 г. добыча угля по РФ была равна 385 739 тыс. т.) [2]

Россия-это социальное государство, в котором политика ориентирована на создание условий, которые обеспечивают благоприятную жизнь и свободное развитие людей. Цели устойчивого развития еще быстрее включаются в политику Российской Федерации. Это проявляется во включении большинства показателей в программные документы страны, которые отражают степень достижения целей УР, а также демонстрируют продвижения РФ на мировом уровне. Достижение целей устойчивого развития на мировом уровне и анализ применения средств к степени решения поставленных целей, требуют определенных разработок критериев и показателей- индикаторов устойчивого развития. Тема устойчивого развития заняла особое место среди промышленных компаний, поскольку эффективное решение этой проблемы является одним из ключевых факторов обеспечения глобальной конкурентоспособности России.

Сегодня транснациональные компании начинают осознавать, что стратегия устойчивого развития стала насущной необходимостью, а также, что международный бизнес в силах оказать влияние на глобальную повестку в области устойчивого развития, для создания более инклюзивной экономики. Сталкиваясь со сложными социальными и экологическими проблемами на фоне общей нестабильности в бизнес-среде, промышленные компании все больше стремятся завоевать и сохранить доверие своих стейкхолдеров. Задачи бизнеса больше не сводятся лишь к получению прибыли. Сегодня компании расширяют собственные амбиции, нацеливаясь на получение долгосрочных преимуществ, связанных с реализацией возможностей в сфере экологического и социально-экономического устойчивого развития. В рамках глобальных новостей, одним из ключевых со-

бытий по усилению борьбы с изменениями климата стало принятие РФ Парижского соглашения в 2019г. Стопроцентное участие России в Парижском соглашении в приложении к уже рабочим международным механизмам (в том числе на уровне Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН), ПРООН, Всемирной метеорологической организации (ВМО)) обладает шансом на становление дополнительным катализатором увеличения энергетической эффективности национальной экономики и уменьшением углеродоемкости, что будет содействовать достижению целей УР в мировом масштабе. [1]

Благоприятное функционирование компаний во времена ужесточенных рыночных условий, образовании новых правил и включение новых компетенций для добывающих отраслей, невозможно без формирования механизма устойчивого развития. Он требует всестороннего анализа деятельности предприятия, который будет включать динамику ключевых показателей. В данном механизме рассматривается общая составляющая экономического, социального и экологического показателей промышленного предприятия, которая успела стать общепризнанной тенденцией науки и практики. На сегодняшний нету единой установленной методической оценки устойчивого развития, что объясняется разными взглядами на проблему (от теоретического до политического), а также поведением решаем задачи (объект исследования, масштаб, цель и т.д.). Множество зарубежных и российских авторов изучают преимущества, особенности и недостатки предлагаемых учеными методик. Результаты, которые получены в работе над исследованием, помогут расширить и внедрить новые методические подходы к формированию и реализации оценки устойчивого развития путем объединения статистического и динамического подходов к его оценке. Данный подход поможет не только комплексно произвести оценку устойчивого развития, а также доказать или опровергнуть результаты, которые получены при помощи применения статического или динамического подходов. При дальнейших разработках, возможна реализация комплексного показателя устойчивого развития, для конкретной отрасли.

Добывающая промышленность в долгосрочной перспективе остается главным драйвером роста развивающихся стран и оказывает влияние на дальнейшее развитие мировой экономики. За последнее время, в постиндустриальную эпоху, наблюдается значительный рост обрабатывающего сектора промышленности, который характеризуется высоким уровнем применения инновационных решений. Положение добывающих отраслей, как основа народного хозяйства, выполняет основную роль в обеспечении смежных отраслей экономики средствами производства.

За последнее время в угледобывающих компаниях, актуальной темой при предоставлении годовой отчетности, стал выпуск отчета о раскрытии «нефинансовой» информации, а именно отчетности, в которой экологические и социальные составляющие деятельности компаний отражаются в измеримых показателях. Комплекс социального и экологического аспектов деятельности компаний не находится в равном использовании и применении, по сравнению с традици-

онными показателями бухгалтерской отчетности, так как они недостаточно развиты (рис. 1).

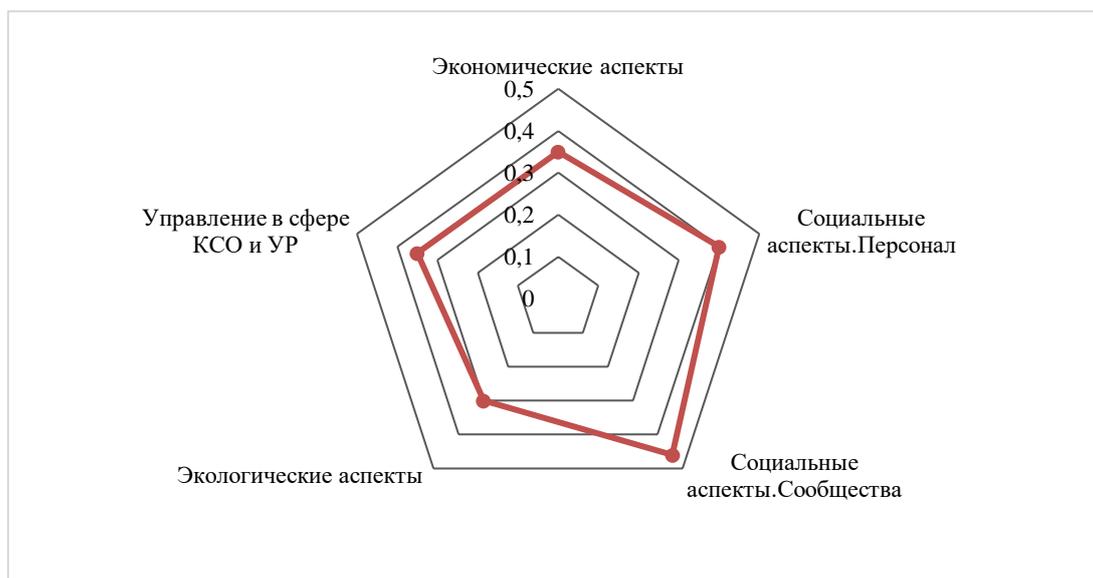


Рис.1. Специфика открытости угольной отрасли

При помощи УР компании должны реализовывать стратегии, которые обеспечат выигрыш для акционеров, и в целом для самой компании. Менеджмент предприятия несет полную ответственность за осуществление стратегий УР, как перспективного драйвера. Также еще одним положительным фактором являются тенденции на развитых рынках, которые связаны с нарастающей ролью нефинансовых факторов инвестиционной привлекательности, например, от 25% до 45% стоимости ее компании приходится на нематериальные активы, в том числе, открытость, репутацию и стратегию. [3]

В сфере стратегического менеджмента вопросам устойчивого развития посвящено множество работ. Расчет и оценка УР в России только начинает развиваться. Раскрытие и расчет конкретных показателей в нефинансовой отчетности горнодобывающих российских компаний в значительной мере соответствует данным запросам мировых тенденций. Об уровне зрелости нефинансовой отчетности свидетельствует и то, что она далеко ушла от декларативности, которая не берет за основу финансовые показатели. На сегодняшний день крупные компании довольно часто предлагают заинтересованным сторонам конкретные данные, которые могут служить развитию конструктивного диалога и сотрудничества с заинтересованными сторонами (таблица).

В большинстве предложенных методических подходах, как зарубежных, так и отечественных авторов было замечено неравномерное количество экологических и социальных показателей, по сравнению с экономическими. Ключевые экономические показатели определены уже давно, и на протяжении долгого времени применяются для оценки финансового состояния компании. Поэтому при

учете основных критериев, для мониторинга УР и будет предложен метод расчета, который учитывает набор показателей устойчивого развития, каждый из которых отражает состояние отдельной (узконаправленной) стороны объекта хозяйственной деятельности в равном отношении.

Зарубежные подходы к оценке устойчивого развития организации

Подход [Источник]	Критерии/Показатели
Методология SAM [Dow Jones Sustainability Indexes. URL: www.sustainability-index.com]	<ul style="list-style-type: none"> • Методология SAM используется при составлении группы индексов устойчивого развития – Dow Jones Sustainability Indexes (DJSI), которые считаются самыми надежными в мире. В соответствии с методологией SAM оценка деятельности компаний в области устойчивого развития основывается на трех имеющих одинаковый вес (33%) критериях (или направлениях) – социальном, экологическом и экономическом.
Методология GRI- Глобальной инициативы по отчетности [Global Reporting Initiative. URL: https://www.globalreporting.org]	<ul style="list-style-type: none"> • Показатели экономической результативности (отражение положительных и отрицательных аспектов деятельности); • Показатели социальной результативности (определенные подходы к организации труда, к правам сотрудников, а также условия работы); • Показатели экологической результативности (показатели, при помощи которых возможно охарактеризовать воздействие на окружающую среду, включая выбросы и отходы, биоразнообразие и нормативные требования);
Organizational Health Index (OHI) Initiative	<ul style="list-style-type: none"> • Крупная консалтинговая компания McKinsey разработала «Индекс жизнеспособности организации», который описывает жизнеспособность организации 9-тью элементами.
Международный подход критериев оценки ESG	<ul style="list-style-type: none"> • Оценка/рейтинг: Оценка эффективности ESG и составление рейтингов с учетом данного подхода для инвесторов.
Индексы РСПП	<ul style="list-style-type: none"> • Два взаимосвязанных индекса – «Ответственность и открытость» и «Вектор устойчивого развития» - инструменты комплексной оценки крупнейших российских компаний на основе их публичной отчетности (годовых отчетов и отчетов в области устойчивого развития)

На основе изученности зарубежной и отечественной информации о системе устойчивого развития и его составляющих, были выделены общие критерии, по которым отбираются показатели для расчета составляющих индикатора УР:

- интегральный показатель должен включать коэффициенты, связанные с отраслью компании, для которой будет рассчитываться индикатор;
- интегральный показатель должен основываться на статистических подходах с применением факторного анализа, что поможет продемонстрировать более точную зависимость факторов и точность в расчетах;
- показатели выбираются из отчетов, которые опубликованы в открытом доступе;
- показатели выбираются по значимости для конкретной промышленной компании.

Ознакомление с существующими методиками оценки УР предопределило некоторые требования для разработки авторского индикатора УР конкретно для угледобывающих компаний:

- баланс между экологическими, социальными и экономическими факторами;
- равномерное распределение показателей УР;
- применение коэффициентов по значимости каждого показателя;
- формирование шкалы оценок с установленным диапазоном и присвоение класса.

Заключение: в результате проведенного исследования методик устойчивого развития были определены требования при предложении авторской методики УР, а также определены критерии на основе, которых отбираются показатели для расчета индикатора. Также, чтобы определить критерии и показатели, был проведен анализ отечественной и зарубежной литературы. Показана значимость экологических показателей для угольных компаний. Таким образом, промышленным компаниям можно сохранить и улучшить свои позиции в межтопливной конкуренции, посредством устойчивого развития при помощи определенных показателей с экологической позиции. Поэтому, для решения проблем, которые возникают при добыче и переработке ископаемых, необходимо чтобы все субъекты экономики, занимающиеся деятельностью на территории Российской Федерации, интегрировали концепцию устойчивого развития в стратегию развития своего бизнеса и следовали ей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта № 0266-2019-0008 в рамках государственной программы «Выполнение фундаментальных научных исследований».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добровольный национальный обзор хода осуществления Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года [Электронный ресурс] URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file> (дата обращения 08.03.2021).
2. Макаров А. А., Митрова Т. А., Кулагин В. А. Долгосрочный прогноз развития энергетики мира и России. // Экономический журнал ВШЭ. – № 2. – 2012. – 150 с.

3. Российский уголь [Электронный ресурс]. –URL: https://www.rosugol.ru/news/news_company.php?ELEMENT_ID=28807 (дата обращения 09.02.2021).

REFERENCES

1. Dobvol'nyy natsional'nyy obzor khoda osushchestvleniya Povestki dnya v oblasti ustoychivogo razvitiya na period do 2030 goda [Elektronnyy resurs] URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file> (data obrashcheniya 08.03.2021).
2. Makarov A. A., Mitrova T. A., Kulagin V. A. Dolgosrochnyy prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii. // Ekonomicheskyy zhurnal VSHE. – № 2. – 2012. – 150s.
3. .Rossiyskiy ugol' [Elektronnyy resurs]. –URL: https://www.rosugol.ru/news/news_company.php?ELEMENT_ID=28807 (data obrashcheniya 09.02.2021).

© *Е. А. Тимофеева, М. В. Мишенин, 2021*

МЕХАНИЗМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

Ирина Викторовна Филимонова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, доктор экономических наук, профессор, заведующая Центром экономики недропользования нефти и газа, e-mail: FilimonovaIV@ipgg.sbras.ru
Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, заведующая кафедрой политэкономии экономического факультета

В статье описано одно из важных направлений повышения уровня инновационного развития нефтегазового комплекса России – освоение трудноизвлекаемых запасов углеводородов (ТРИЗ). Поиск, разведка и освоение трудноизвлекаемых запасов способно вывести отечественную нефтегазовую и смежные отрасли на новый уровень технологического развития, обеспечить существенный мультипликативный эффект сопутствующим производствам, организовать новые рабочие места и инфраструктуру. Авторами оценена доля ТРИЗ в современные добычи нефти, проанализированы динамика и структура особых по качеству и условиям залегания углеводородов.

Ключевые слова: трудноизвлекаемые запасы, доходы федерального бюджета, налоговые льготы, баженовская свита, инновационное развитие, нефтегазовый комплекс, добыча нефти

MECHANISMS AND DIRECTIONS FOR INCREASING THE LEVEL OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF THE OIL AND GAS COMPLEX OF RUSSIA

Irina V. Filimonova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Ave., 3, DSc, Professor, Head of the Center for Economics of Subsoil Use of Oil and Gas, tel.: +7 (913) 900-41-70, e-mail: FilimonovaIV@list.ru

The article describes one of the important directions of increasing the level of innovative development of the oil and gas complex of Russia - the development of hard-to-recover hydrocarbon reserves (HTR). The search, exploration and development of hard-to-recover reserves can bring the domestic oil and gas and related industries to a new level of technological development, provide a significant multiplier effect for related industries, and create new jobs and infrastructure. The authors estimated the share of HTR in modern oil production, analyzed the dynamics and structure of hydrocarbons of special quality and conditions.

Keywords: hard-to-recover reserves, federal budget revenues, tax incentives, Bazhenov formation, innovative development, oil and gas complex, oil production

Важнейшим событием развития нефтегазового комплекса России стало утверждение Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ от 13 мая 2019 г. № 216) и Энергетической стратегии и Российской Федерации на период до 2035 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. №1526-р). Документы обозначают стратегические

цели, принципы и задачи национальной энергетической политики, среди которых важное место занимают вопросы воспроизводства минерально-сырьевой базы и добычи углеводородов на уровнях, необходимых для устойчивого обеспечения потребителей энергоресурсами, укрепления позиций России на мировом энергетическом рынке и сохранении энергетической безопасности страны.

Одними из важнейших задач инновационного развития нефтегазового комплекса России в этих документах названы введение в экономический оборот трудноизвлекаемых запасов (в том числе баженовской свиты), а также создание технологических полигонов для отработки технологий рентабельной добычи углеводородного сырья из трудноизвлекаемых запасов [1].

Угрозой роста добычи трудноизвлекаемых запасов нефти является формирование «выпадающих» доходов из федерального бюджета, снижение ценовых конкурентных преимуществ реализуемого углеводородного сырья, повышение капиталоемкости проектов освоения новых нефтегазоносных территорий [2]. Но вместе с тем, поиск, разведка и освоение трудноизвлекаемых запасов способно вывести отечественную нефтегазовую и смежные отрасли на новый уровень инновационного развития, обеспечить существенный мультипликативный эффект сопутствующим производствам, организовать новые рабочие места и инфраструктуру.

Трудноизвлекаемые запасы – основа инновационного развития

В Стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 года, утвержденной Правительством РФ в декабре 2018 г. отмечено, что вовлечение в разработку именно трудноизвлекаемых запасов нефти способно обеспечить удержание уже достигнутого уровня добычи нефти после 2025 г. Так, за период с 2013 г. по 2019 г. добыча нефти из категории так называемой «трудноизвлекаемой» нефти составила 253 млн т, что соответствует 55 % от общей добычи нефти в России (рис. 1).

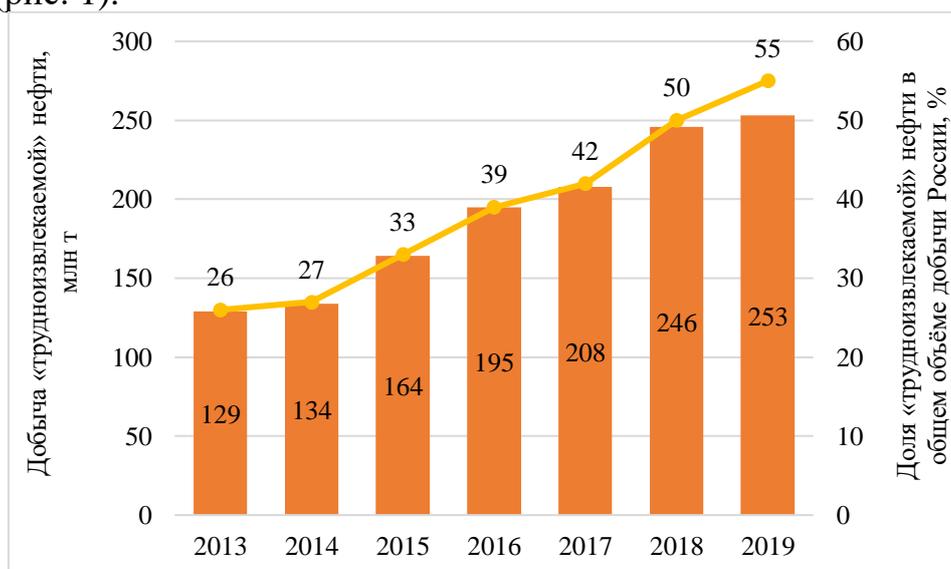


Рис. 1. Объем добычи трудноизвлекаемой нефти в России

Первое понятие трудноизвлекаемых запасов нефти было описано отечественными геологами ещё в 1960-70-х гг., в период поиска и разведки крупнейших запасов нефти, залегающих в баженовской, абалакской и фроловской свитах. Одна из первых классификаций трудноизвлекаемых запасов нефти была сформулирована в 1994 г. Н.Н. Лисовским и Э.М. Халимовым. Основанием для нее послужили граничные значения по геологическим и технологическим факторам, удаленность от существующих центров добычи – аномальная по характеристикам нефть, низкопроницаемые коллекторы, нефть выработанных месторождений, нефть низкопродуктивных пластов, удаленность от инфраструктуры. Позднее элементы данной классификации были отражены в системе льгот по налогу на добычу полезных ископаемых (НДПИ).

Приказ МПР РФ от 13 февраля 1998 г. № 41 сформулировал временные критерии отнесения запасов к трудноизвлекаемым. Так, трудноизвлекаемыми следует считать запасы, экономически эффективная (рентабельная) разработка которых может осуществляться только с применением методов и технологий, требующих повышенных капиталовложений и эксплуатационных затрат по сравнению с традиционно используемыми способами.

В настоящее время наиболее широкую трактовку понятия трудноизвлекаемых запасов даёт Налоговый кодекс РФ в части налога на добычу полезных ископаемых. Ставка по налогу на добычу нефти, с момента введения налога в 2002 г., рассчитывается на основе умножения базовой ставки на ряд коэффициентов, учитывающих изменение конъюнктурных, горно-геологических, физико-химических и промысловых характеристик и ухудшение условий добычи нефти. Первоначально, в расчёте ставки НДПИ принимался только коэффициент Кц, учитывающий изменения цены российской нефти на мировом рынке. Позднее, с 2007 г. были введены коэффициенты Кв и Кз, отражающие степень выработанности и величину запасов конкретного участка недр соответственно. С 2013 г. формула ставки НДПИ дополнена ещё двумя коэффициентами – Кд и Кдв, характеризующими степень сложности добычи нефти и степень выработанности конкретной залежи углеводородного сырья.

В 2015 г. был реализован так называемый «налоговый манёвр», который был направлен на перераспределение налоговой нагрузки с той части нефти, которая отправлялась на экспорт (около 50%) на всю добываемую нефть, таким образом произошло переложение налогового бремени с внешнего сектора на внутренний. Поэтому с 2015 г. был изменён сам алгоритм расчета ставки НДПИ, которая стала рассчитываться путём умножения базовой ставки на коэффициент, характеризующий динамику мировых цен на нефть (Кц), а полученное произведение уменьшается на величину показателя, характеризующего особенности добычи нефти (Дм).

На ряду с вышеперечисленными коэффициентами был дополнительно введён коэффициент Ккан, учитывающий трудноизвлекаемые запасы по региону добычи и свойствам нефти.

Для стимулирования освоения залежей баженовской свиты, абалакской свиты, доманиковой свиты, тюменской свиты, хадумской свиты, низкопроница-

емых залежей и сверхвысоковязких залежей нефти применяется понижающий коэффициент Кц.

Наибольший объём добычи «трудноизвлекаемой» нефти в 2019 г. пришёлся на месторождения с высокой степенью выработанности – 134,7 млн т, или 53,3 %, что на 11,8 млн т, или 10,0 %, больше значения 2018 г. (рис. 2). Основные регионы, в которых добывается нефть с применением данной льготы – ХМАО, Республика Татарстан, Республика Башкортостан, Оренбургская область и Самарская область [3, 4].

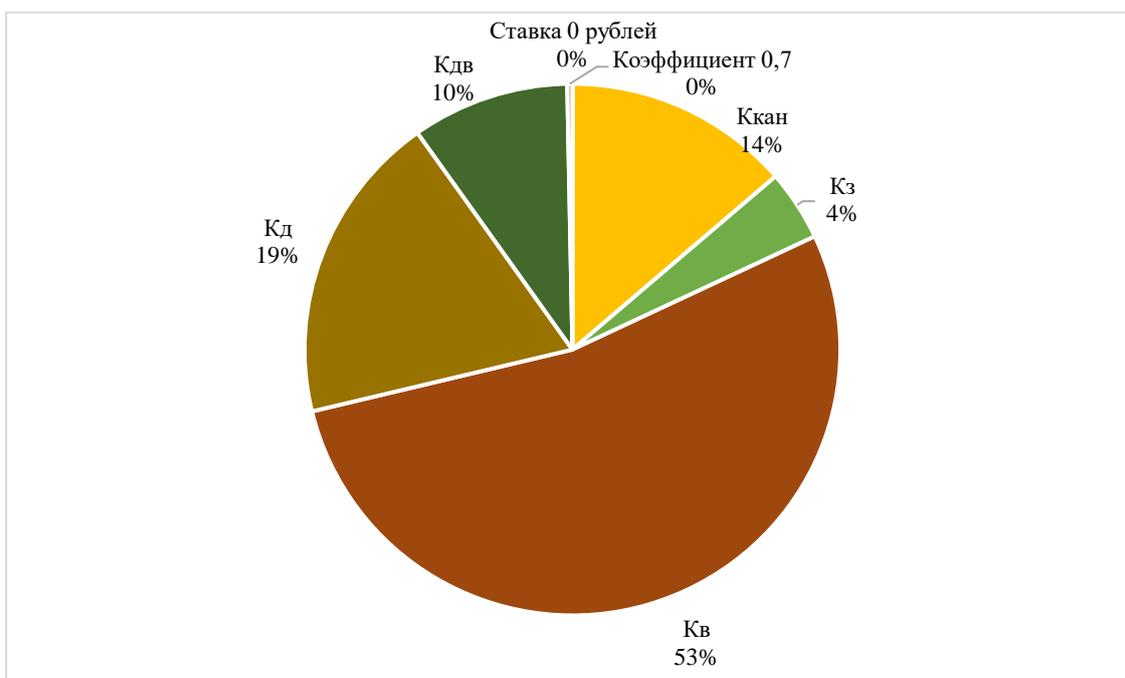


Рис. 2. Структура добычи трудноизвлекаемой нефти (по льготным коэффициентам НДС)

Значительный вклад в 2019 г. также внесла добыча нефти с применением коэффициента, характеризующего степень сложности добычи нефти – 47,9 млн т, или 18,9 %, что на 2,3 млн т, или 5,0 %, больше значения 2018 г. Сложность добычи нефти связана с низкой проницаемостью и эффективной нефтенасыщенной толщиной пласта (20,4 млн т), а также приуроченностью продуктивных отложений к тюменской свите (27,5 млн т). Основные регионы, в которых добывается нефть с применением данной льготы – ХМАО, ЯНАО, в меньшей степени Оренбургская и Тюменская области.

Несколько сократился в 2019 г. объём добычи нефти с применением коэффициента, характеризующего регион добычи и свойства нефти – 34,6 млн т, или 13,7 %, что на 8,6 млн т меньше значения 2018 г. Основные регионы, в которых добывается нефть с применением данной льготы – ЯНАО, Красноярский край, Ненецкий автономный округ и Республика Саха (Якутия).

Заключение

В настоящее время нефтегазовые налоги являются ключевым элементом формирования доходной части бюджета. До 2014 года доля нефтегазовых доходов в структуре доходной части бюджета неуклонно возрастала, что было связано с ростом цен на нефть и объемом добычи и экспорта сырья. Однако в период 2014-2017 гг. и настоящее время на фоне резкого падения цен на нефть доля нефтегазовых налогов существенно снизилась. Однако на текущем этапе и в долгосрочном периоде одним из значимых факторов, который будет определять снижения нефтегазовых доходов является ухудшение минерально-сырьевой базы и рост налоговых вычетов за счет добычи льготной трудноизвлекаемой нефти. За последние годы объем льготной трудноизвлекаемой нефти в России вырос в несколько раз [5].

В перспективе рост добычи нефти в России будет связана именно с трудноизвлекаемыми запасами, а в региональном разрезе роль Арктической зоны и Восточной Сибири будет только возрастать. В результате объем налоговых вычетов будет стремительно увеличиваться. Кроме того, в среднесрочной перспективе будут осваиваться запасы и ресурсы отложения баженовской, абалакской, хадумской и доманиковых свит, что несомненно снизит собираемость нефтегазовых налогов.

Такие тенденции влекут за собой несколько существенных обстоятельств, свидетельствующих, что акценты в нефтегазовой отрасли постепенно смещаются. До последнего времени нефтегазовая отрасль воспринималась, прежде всего, как источник бюджетных накоплений. Однако в настоящее время НГК всё больше рассматривается как инвестиционная отрасль, где освоение проектов углеводородов обеспечивает существенный мультипликативный эффект для смежных и сопутствующих производств, а также даёт новые рабочие места, возможность создания общехозяйственной и специализированной инфраструктуры.

С другой стороны, решение задач в области освоения трудноизвлекаемых запасов необходимо в большей мере решать не столько за счет регулирования и снижения налогообложения, сколько по средствам развития технологий и снижения издержек в области добычи, переработки, транспорта углеводородов и продукции их переработки. В этом отношении после резкого снижения цен на нефть в 2014 г. развитию американской сланцевой революции способствовало именно целенаправленное снижение себестоимости добычи.

Высокая волатильность цен на нефть, санкции в области поставок импортного нефтегазового оборудования, ухудшение сырьевой базы углеводородов – это новые вызовы и угрозы устойчивому развитию НГК страны, стабильности поступлений нефтегазовых доходов в бюджет, преодоление которых во многом зависит как от эффективной налоговой политикой государства и системы льгот, так и масштабных капиталовложений в технологическое и инновационное перевооружение отрасли.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ № НШ-2571.2020.6 и проекта № 0331-2019-0028 в рамках государственной программы «Выполнение фундаментальных научных исследований».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филимонова И.В. Концентрация компаний нефтегазовой отрасли России // экономика XXI века. сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию Сибирского университета потребительской кооперации (СибУПК). Новосибирск. – 2020. – С. 328-332.
2. Filimonova I., Komarova A., Nemov V., Provornaya I. Sustainable development of Russian energy sector: hydrocarbons of eastern siberia // 20th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM 2020. Sofia. – 2020. – С. 777-784.
3. Филимонова И.В., Немов В.Ю., Мишенин М.В., Проворная И.В. Нефтяная промышленность России: региональная и организационная структура добычи, переработки и экспорта // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2020. – № 4-5 (173). – С. 53-63.
4. Проворная И.В., Филимонова И.В., Комарова А.В., Земнухова Е.А. Закономерности развития нефтегазовых ресурсных регионов России с учетом транспортной обеспеченности // Экологический вестник России. – 2020. – № 1. – С. 16-21.
5. Филимонова И.В., Комарова А.В., Мишенин М.В., Земнухова Е.А. Роль трудноизвлекаемых запасов нефти в воспроизводстве сырьевой базы и устойчивом развитии нефтегазового комплекса России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2020. – № 6 (174). – С. 12-20.

REFERENCES

1. Filimonova I.V. Koncentraciya kompanij neftegazovoj otrasli Rossii // ekonomika XXI veka. sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvyashchennoj 65-letiyu Sibirskogo universiteta potrebitel'skoj kooperacii (SibUPK). Novosibirsk. – 2020. – S. 328-332.
2. Filimonova I., Komarova A., Nemov V., Provornaya I. Sustainable development of Russian energy sector: hydrocarbons of eastern siberia // 20th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM 2020. Sofia. – 2020. – S. 777-784.
3. Filimonova I.V., Nemov V.YU., Mishenin M.V., Provornaya I.V. Neftyanaya promyshlennost' Rossii: regional'naya i organizacionnaya struktura dobychi, pererabotki i eksporta // Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie. – 2020. – № 4-5 (173). – S. 53-63.
4. Provornaya I.V., Filimonova I.V., Komarova A.V., Zemnuhova E.A. Zakonomernosti razvitiya neftegazovyh resursnyh regionov Rossii s uchetom transportnoj obespechennosti // Ekologicheskij vestnik Rossii. – 2020. – № 1. – S. 16-21.
5. Filimonova I.V., Komarova A.V., Mishenin M.V., Zemnuhova E.A. Rol' trudnoizvlekaemyh zapasov nefti v vosproizvodstve syr'evoy bazy i ustojchivom razvitii neftegazovogo kompleksa Rossii // Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie. – 2020. – № 6 (174). – S. 12-20.

© И. В. Филимонова, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>В. Н. Опарин, Т. А. Киряева.</i> Калибровочные коэффициенты связи между уравнением адсорбции Ленгмюра и кинематическим выражением В. Н. Опарина для волн маятникового типа по данным натуральных измерений на угольных месторождениях Кузбасса	3
2. <i>Т. С. Ощепков, Л. А. Кияница, И. В. Лугин.</i> Обоснование фильтрационного оборудования для обеспыливания воздуха метрополитенов	14
3. <i>С. А. Павлов.</i> Исследование способа проветривания протяженных тупиковых выработок с применением продольных перегородок.....	22
4. <i>С. А. Павлов.</i> О влиянии струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, на аэродинамическое сопротивление сверхдлинной угольной лавы	32
5. <i>А. В. Панов, И. В. Колыхалов.</i> Численное и экспериментальное моделирование развития продольных трещин множественного гидро-разрыва вязким флюидом	41
6. <i>А. В. Панов, Л. А. Назаров.</i> Определение деформационных свойств пород и компонент природных напряжений по данным подземной геодезии	52
7. <i>Н. В. Панова.</i> Пути снижения массы корпуса рабочего колеса шахтного осевого вентилятора с поворотными лопатками	62
8. <i>В. В. Плохих, Б. Б. Данилов, Д. О. Чецин.</i> Исследование динамических параметров и рабочего цикла виброударных систем, участвующих в реализации адаптивных технологических процессов	67
9. <i>А. Ю. Примычкин.</i> Определение конструктивных параметров кольцевого упругого клапана, управляющего выпуском энергоносителя из рабочей камеры пневмоударной машины.....	78
10. <i>В. И. Ростовцев.</i> Особенности и перспективы использования радиационной модификации минерального сырья при подготовке его к обогащению	87
11. <i>Е. П. Русин.</i> К разработке стенда для моделирования элементов систем переработки зернистых материалов	99
12. <i>Е. Ю. Русский.</i> К вопросу проектирования узлов крепления рабочих лопаток шахтных осевых вентиляторов	108
13. <i>Д. В. Семьянова.</i> Синергетический эффект комбинации собирателей при адсорбции на границе «газ – жидкость»	116
14. <i>А. А. Скулкин.</i> Определение параметров действующего поля напряжений при ведении очистных работ методом измерительного гидроразрыва.....	123

15. <i>П. Н. Тамбовцев.</i> Экспериментальное обоснование параметров тяжелых пневмомолотов гравитационного типа для погружения обсадных труб в грунт.....	130
16. <i>Г. Н. Хан, Е. П. Русин.</i> Численное моделирование процесса транспортирования породной массы по вращающемуся трубопроводу	141
17. <i>А. И. Чанышев, И. М. Абдулин.</i> Об одной интерпретации экспериментов на срез	151
18. <i>А. И. Чанышев, И. М. Абдулин.</i> Определение НДС массива пород вокруг выработок цилиндрической формы с заданными на контуре векторами напряжений Коши и смещений.....	158
19. <i>А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, О. А. Лукьяшко.</i> О сопротивлении толстостенной преграды при проникании в нее твердого тела	164
20. <i>В. В. Червов.</i> Опыт использования пневматических молотов для забивания стальных свай при строительстве подземных сооружений открытым способом	173
21. <i>Д. О. Чещин, В. В. Плохих, А. К. Ткачук.</i> О возможности применения накопителей энергии в ударных машинах	181
22. <i>Е. Н. Шер.</i> Особенности развития трещин гидроразрыва в слоистом породном массиве	190
23. <i>Т. В. Шилова, Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик.</i> Лабораторные исследования рыхлых горных пород, укрепленных двухкомпонентными полимерными составами	198
24. <i>С. А. Щукин, А. А. Неверов, С. А. Неверов.</i> Отработка подкарьерных запасов поэтажно-камерной технологией с формированием искусственных целиков и породной закладки	205
25. <i>В. Ф. Юшкин.</i> Изменение прочностных параметров насыпных пород карьерного отвала под влиянием природно-климатических факторов	216
26. <i>Е. В. Аде, И. В. Филимонова.</i> Сравнение эффективности нефтегазовых компаний с использованием метода DEA	221
27. <i>Ю. А. Дзюба, Д. В. Колюжнов.</i> Оценка степени влияния резкого спада цен на нефть и санкций на динамику ключевых макроэкономических показателей России	228
28. <i>Д. Д. Дочкина.</i> Роль нефтегазового комплекса в формировании доходов консолидированного бюджета регионов России	237
29. <i>Е. А. Земнухова, А. М. Маканин.</i> Общеотраслевые тенденции переработки газа в России	245
30. <i>А. В. Ивершинь, С. И. Кожевина.</i> Анализ факторов рождаемости в России.....	252
31. <i>А. А. Карташевич, В. Ю. Немов.</i> Социально-экологические проблемы развития газодобывающих предприятий Крайнего Севера	257
32. <i>В. Д. Кожевин.</i> Текущая ситуация и перспективы развития зеленой энергетики в России на примере показателя LCOE	264
33. <i>А. В. Комарова.</i> Климатическая политика европейских стран	270

34. <i>В. М. Кузенкова, В. Ю. Немов.</i> Анализ негативного воздействия эмиссии CO ₂ на окружающую среду	276
35. <i>Д. С. Милосердова, И. В. Проворная.</i> Анализ экономических показателей регионов ресурсного типа на основе модели панельных данных	285
36. <i>М. В. Мишенин.</i> Динамика добычи нефти из трудноизвлекаемых запасов в России	294
37. <i>С. А. Мусеев, Е. В. Белова, А. О. Гордеева, Е. Н. Кузнецова, Л. Н. Константинова.</i> Анализ лицензирования недр за 2000-2021 годы в западных районах Республики Саха (Якутия)	302
38. <i>В. Ю. Немов.</i> Исследование мировых рынков сбыта, способов и условий поставок минеральных ресурсов из регионов Арктики	310
39. <i>А. Ю. Новиков.</i> Инновационные и ресурсные факторы развития регионов России	316
40. <i>А. О. Першина, Е. А. Земнухова.</i> Исследование тарифообразования на трубопроводные поставки российской нефти	322
41. <i>И. В. Проворная.</i> Особенности использования попутного нефтяного газа в России	328
42. <i>Е. А. Тимофеева, М. В. Мишенин.</i> Совершенствование методов оценки устойчивого развития угольных компаний с позиции экологических показателей	325
43. <i>И. В. Филимонова.</i> Механизмы и направления повышения уровня инновационного развития нефтегазового комплекса России	342

CONTENTS

1. <i>V. N. Oparin, T. A. Kiryaeva</i> . Calibration Coefficients of Connection Between the Langmuir Adsorption Equation and V. N. Oparina's Kinematic Expression for Pendulum-Type Waves According to Local Measurements at the Coal Deposits of Kuzbass	3
2. <i>T. S. Oshchepkov, L. A. Kiyantsa, I. V. Lugin</i> . Validation of Filtration Equipment for Air Dedusting in Subways	14
3. <i>S. A. Pavlov</i> . Ventilation Method for Long Blind Drifts with Longitudinal Baffles	22
4. <i>S. A. Pavlov</i> . Influence of Jet Fan Installed on a Cutter–Loader on Air Drag in Very Long Longwall Panels	32
5. <i>A. V. Panov, I. V. Kolykhalov</i> . Numerical and Experimental Modeling of Propagation of Longitudinal Fractures in Multi-Stage Hydraulic Fracturing with Viscous Fluid	41
6. <i>A. V. Panov, L. A. Nazarov</i> . Determination of Deformation Properties and Natural Stresses in Rock Mass by Underground Geodesy Data	52
7. <i>N. V. Panova</i> . Reduction in Weight of Housing of Axial Mine Fan Impeller with Rotating Blades	62
8. <i>V. V. Plokhikh, B. B. Danilov, D. O. Cheshchin</i> . Dynamics and Operating Cycles of Vibratory–Percussive Systems Involved in Implementation of Adaptive Technologies	67
9. <i>A. Yu. Primychkin</i> . Designing Annular Elastic Valve that Controls Air Exhaust from Working Chamber of Pneumatic Impact Machine	78
10. <i>V. I. Rostovtsev</i> . Modification of Mineral Raw Material by Radiation Pre-Treatment Before Processing: Features and Prospects	87
11. <i>E. P. Rusin</i> . Development of a Test Bench for Simulation of Elements of Granular Material Processing Systems	99
12. <i>Y. E. Russky</i> . Designing Attachments for Blades of Axial Mine Fans	108
13. <i>D. V. Semyanova</i> . Synergistic Effect of a Combination of Collectors in Adsorption at Gas–Liquid Interface	116
14. <i>A. A. Skulkin</i> . Experimental Determination of Stress Parameters in the Mining Field	123
15. <i>P. N. Tambovtsev</i> . Experimental Validation of Parameters of Heavy Gravity Pneumatic Hammers for Casing Pipe Ramming in Soil	130

16. <i>G. N. Khan, E. P. Rusin. Numerical Simulation of the Broken Rock Mass Transportation in a Rotating Pipeline</i>	141
17. <i>A. I. Chanyshev, I. M. Abdulin. An Alternative Interpretation of Shear Testing Data</i>	151
18. <i>A. I. Chanyshev, I. M. Abdulin. Stress–Strain Behavior of Rock Mass Around Cylindrical Excavations with the Preset Cauchy Stress Stresses and Displacements at the Boundaries</i>	158
19. <i>A. I. Chanyshev, O. E. Belousova, O. A. Luk'yashko. Resistance of Thick-Walled Barrier in Penetration of a Solid Body</i>	164
20. <i>V. V. Chervov. Experience of Steel Pile Driving by Pneumatic Hammers in Underground Construction by The Cut-And-Cover Method</i>	173
21. <i>D. O. Cheshchin, V. V. Plokhikh, A. K. Tkachuk. About the Possibility of Application of Energy Storage in Impact Machines</i>	181
22. <i>E. N. Sher. Features of Propagation of Hydraulic Fractures in Stratified Rock Mass</i>	190
23. <i>T. V. Shilova, L. A. Rybalkin, A. N. Drobchik. Lab-Scale Tests of Incoherent Rock Reinforcement Using Two-Component Polymer Blends</i>	198
24. <i>S. A. Shchukin, A. A. Neverov, S. A. Neverov. Extraction of Open Pit Bottom Reserves by Room-and-Pillar Method Using Hybrid Backfill</i>	205
25. <i>V. F. Yushkin. Strength Change of Rockfill Dumps at Open Pit Mines under the Natural Climate Impact</i>	216
26. <i>E. V. Ade, I. V. Filimonova. Comparison of the Efficiency of Oil and Gas Companies Using the DEA Method</i>	221
27. <i>Y. A. Dzyuba, D. V. Kolyuzhnov. The Estimation of Influence of the Sharp Oil Prices Reduction and Sanctions on the Dynamics of Russian Crucial Macroeconomic Indicators</i>	228
28. <i>D. D. Dochkina. First Application of Sanmcs Technology to Marine Seismics</i>	237
29. <i>E. A. Zemnukhova, A. M. Makanin. General Trends in Gas Processing in Russia</i>	245
30. <i>A. V. Ivershin, S. I. Kogevina. Analysis of Fertility Factors in Russia</i>	252
31. <i>A. A. Kartashevich, V. Y. Nemov. Socio-Ecological Problems of the Development of Gas-Producing Enterprises of the Far North</i>	257
32. <i>V. D. Kozhevnikov. The Current Situation and Prospects for the Development of Green Energy in Russia on the Example of the LCOE Indicator</i>	264
33. <i>A. V. Komarova. Climate Policy of European Countries</i>	270
34. <i>V. M. Kuzenkova, V. Y. Nemov. Analysis of the Adverse Impact of CO₂ Emissions on the Environment</i>	276

35. <i>D. S. Miloserdova, I. V. Provornaya</i> . Analysis of Economic Indicators of Resource-Type Regions Based on the Panel Data Model	285
36. <i>M. V. Mishenin</i> . Dynamics of Oil Production from Hard Reserves in Russia	294
37. <i>S. A. Moiseev, E. V. Belova, A. O. Gordeeva, E. N. Kuznecova, L. N. Konstantinova</i> . Analysis of Licensing of Mineral Resources for 2000-2021 in the Western Regions of the Republic of Sakha (Yakutia)	302
38. <i>V. Y. Nemov</i> . Research of World Markets of Energy Resources, Options and Conditions of Supply of Mineral Resources From the Arctic Regions	310
39. <i>A. Yu. Novikov</i> . Innovative and Resource Factors of Development in Russian Regions.....	316
40. <i>A. O. Pershina, E. A. Zemnukhova</i> . Research of Tariff Formation for Pipeline Deliveries of Russian Oil	322
41. <i>I. V. Provornaya</i> . Problems of Complex Development of the Resource Regions, for Example the Utilization of Associated Petroleum Gas	328
42. <i>E. A. Timofeeva, M. V. Mishenin</i> . Improving Methods for Assessing the Sustainable Development of Coal Companies from the Perspective of Environmental Indicators	325
43. <i>I. V. Filimonova</i> . Mechanisms and Directions for Increasing the Level of Innovative Development of the Oil and Gas Complex of Russia	342

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XVII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 8 т.

Т. 2

Международная научная конференция

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

№ 4

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *О. И. Голиков*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 15.09.2021. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 20,57. Тираж 34 экз. Заказ 124.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

**Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.**

**Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.**

- 
- 
- Т. 1. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия
 - Т. 2. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология
 - Т. 3. Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью
 - Т. 4. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология
 - Т. 5. Геопространственные аспекты исторических, правовых и социокультурных процессов
 - Т. 6. Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке»
 - Т. 7. Молодежь. Инновации. Технологии
 - Т. 8. СибОптика-2021