ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(10):22-34
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831; 622,2; 622.235 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_22

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОТОВЫХ ГОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ВКЛЮЧАЮЩИХ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ КАМЕРЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

М.А. Косырева[1], В.А. Еременко[1]

[1] НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: marinkosyreva@gmail.com

Аннотация: Представлены результаты физического моделирования напряженно-деформированного состояния камерной системы разработки с оставлением целиков в сотовом исполнении горной конструкции, которая включает вертикальные камеры цилиндрической формы. Установлено, что подготовить эквивалентный материал каменной соли для физических моделей не представляется возможным, так как не соблюдается подобие по свойствам геоматериала. В связи с этим предложен качественный анализ результатов физического моделирования. Определены разрушающие физические модели нагрузки. Представлены полученные закономерности: при увеличении ширины камеры и целика увеличивается прочность вмещающего массива и междукамерных целиков, меньшая прочность закономерно регистрируется при меньшей ширине целика при тех же значениях ширины камер. Получено логическое сопоставление с результатами численного моделирования. Устойчивость междукамерных целиков для условий применения сотовых горных конструкций, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы, обеспечивается (в отличии от традиционных условий поддержания столбчатых и ленточных междукамерных целиков) возможностью целиков иметь боковой распор своими гранями с соседними целиками и наиболее благоприятной формой конструктивных элементов системы – вертикальных камер цилиндрической формы, которые достаточно устойчивы в условиях действия горного давления (эффект обтекания в междукамерных целиках действующими напряжениями вертикальных камер цилиндрической формы).

Ключевые слова: гипотеза Турнера-Шевякова, физическое и численное моделирование, сотовая горная конструкция, междукамерный целик МКЦ, вертикальные камеры цилиндрической формы, разрушающие нагрузки, месторождение каменной соли.

Для цитирования: *Косырева М. А., Еременко В. А.* Физическое моделирование напряженно-деформированного состояния сотовых горных конструкций, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 10. – С. 22–34. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_22.

Physical modeling of stress-strain behavior of honeycomb mine structures composed of vertical cylindrical stopes

M.A. Kosyreva[1], V.A. Eremenko[1]

[1] NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: marinkosyreva@gmail.com

© М.А. Косырева, В.А. Еременко. 2024.

Abstract: The article describes physical modeling of the stress–strain behavior of a honeycomb mine structure composed of vertical cylindrical stopes with pillars in-between. It is found that it is impossible to prepare an equivalent material to simulate rock salt in physical models as no analogy of properties of these materials is observed in this case. In this respect, the qualitative analysis of physical modeling data is proposed. The fracture loads of physical models are determined. The obtained patterns are presented: with wider stopes and pillars, the strength of enclosing rock mass and intra-stope pillars increases; the lesser strength is regularly observed when the width of pillars is decreased while the width of stopes is unchanged. The physical and numerical modeling results are compared. In case of the honeycomb mine structure composed of vertical cylindrical stopes, stability of pillars between the stopes (as against conventional columnar and chain pillars) is ensured by the presence of the side thrust between the side faces of the neighbor pillars, and by the most favorable shape of the structural components of the mine–cylindrical shape of vertically arranged stopes–which are sufficiently stable under the action of rock pressure (the phenomenon when effective stresses flow around the vertical cylindrical stopes through the inter-stope pillars).

Key words: Turner–Shevyakov hypothesis, physical and numerical modeling, honeycomb mine structure, inter-stope pillar, vertical cylindrical stope, fracture loads, rock salt deposit.

For citation: Kosyreva M. A., Eremenko V. A. Physical modeling of stress-strain behavior of honeycomb mine structures composed of vertical cylindrical stopes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(10):22-34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_22.

Введение

В работах [1 — 3] представлены новый геотехнологический подход и принципы построения альтернативной конвергентной геотехнологии освоения месторождений твердых полезных ископаемых, в т.ч. Илецкого месторождения каменной соли [4, 5], основанные на идее изменения направления движения фронта очистной выемки, реализуемой в виде перехода от отработки полезного ископаемого горизонтальными камерами к вариантам восходящей или нисходящей их отработки вертикальными камерами цилиндрической формы методом выбуривания. Для расчетов устойчивости междукамерных целиков (МКЦ) за основу принята гипотеза Турнера-Шевякова для традиционных условий применения камерных систем разработки с оставлением МКЦ [6 — 9] и вертикальных камер цилиндрической формы с оставлением целиков с квадратной сеткой их расположения [4, 5, 10].

Физическое моделирование, как один из методов лабораторного исследования, имеет широкое распространение при изучении вопросов горного давления [11 — 14]. В продолжение работ выполнено физическое моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) сотовых горных конструкций, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы (см. рис. 1).

Для проведения исследований создан комплексный стенд, который смонтирован на плите пресса П-125 (см. рис. 2). Принцип работы комплексного стенда заключается в задании напряжений домкратами в горизонтальном направлении и изменении вертикального напряжения со временем сжимающими плитами пресса. Данный принцип позволяет смоделировать трехосное сжатие.

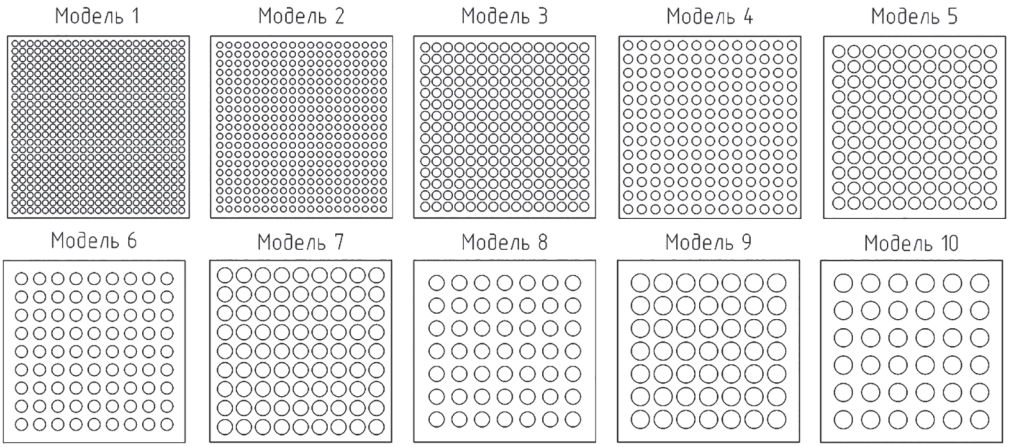

Рис. 1. Десять моделей с различными размерами конструктивных элементов (ширина камер и целиков) выемочного участка (табл. 1)

Fig. 1. Ten models of different-size structural components (stopes and pillars of different width) in extraction panel (Table 1)

Основой стенда является гидравлический испытательный пресс П-125, предназначенный для испытания материалов естественного и искусственного происхождения на сжатие. Наибольшая предельная нагрузка — 1250 кН, допустимая погрешность измерения нагрузки при прямом ходе (нагружении) — начиная с 20% наибольшего значения диапазона измерения, но не ниже 10% наибольшей предельной нагрузки ±2% величины измеряемой нагрузки. Высота рабочего пространства не менее 800 мм, рабочая площадь 440×440 мм.

Пресс представляет собой установку, состоящую из нагружающего устройства и пульта управления. В созданном стенде нагружающее устройство предназначено для вертикального силового воздействия, соответствующего измене-

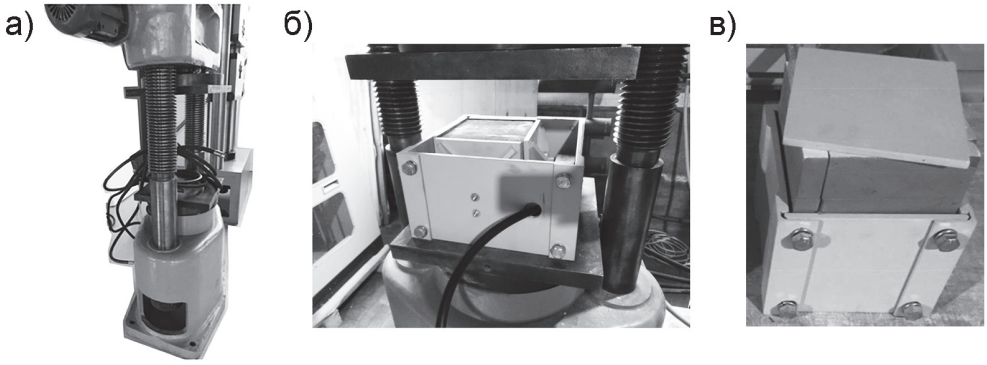

Рис. 2. Комплексный стенд на плите пресса П-125 (а) для исследования прочностных, деформационных и акустических характеристик физических моделей и их конструктивных элементов при трехосном нагружении и имитации гравитационно-тектонического (б) и литостатического (в) исходного напряженного состояния массива

Fig. 2. Integrated strength, deformation and acoustics testing unit on P-125 (a) press table for physical models and their structural components in three-axial loading, and in simulation of (b) gravitational and tectonic and (v) lithostatic original stress state in rock mass

нию вертикальной составляющей главных нормальных напряжений в физической модели сотовой конструкции. Нагружающее устройство представляет собой раму, состоящую из основания и траверсы, соединенных двумя резьбовыми колоннами. На колоннах установлена подвижная траверса, перемещение которой для создания необходимого рабочего пространства в зависимости от высоты испытуемых физических моделей осуществляется от электродвигателя с помощью червячно-винтовой передачи. На подвижной траверсе закреплена верхняя опорная плита, имеющая самоустанавливающуюся сферическую опору, которая обеспечивает осевое приложение нагрузки к модели конструкции. В станине нагружающего устройства находится цилиндр с опорным столом. Принцип работы: под действием гидростатического давления масла в гидросистеме плунжер цилиндров перемещается вверх и подвижные части опускаются под собственным весом.

Пульт управления предназначен для управления нагружающим устройством и контроля величины нагрузок на испытываемые модели. Пульт управления включает в себя насосную установку с системой управления, силоизмеритель и электронный модуль передачи информации для записи диаграммы «напряжение — деформация».

Нагружающее устройство и пульт управления смонтированы на фундаменте и соединяются маслопроводами.

Исследовались физические модели призматической формы размерами 400××400×400 мм с заданной моделируемой конструкцией, включающей вертикальные камеры цилиндрической формы, которые помещались на нижнюю сжимающую плиту пресса размерами 440×440 мм.

Таблица 1

Соотношение площадей пустот (вертикальных камер цилиндрической формы) и геоматериала в физических моделях для квадратной сетки их расположения, эксплуатационные потери геоматериала оставленного в целиках модели
Area ratio of voids (vertical cylindrical stopes) and geomaterial in physical square-pattern models and operational losses of geomaterial left in pillars

№ модели	Объем модели, $м^3$	Горизонтальная площадь модели, $м^2$	Диаметр (ширина, длина) камеры, м	Ширина (длина) целика по нормали, м	Количество камер в модели, шт.	Горизонтальная площадь пустот (камер) в модели ($S_{\Sigma км}$), $м^2$	Горизонтальная площадь эквивалентного материала в целиках модели ($S_{\Sigma цм}$), $м^2$	Ширина оконтуривающего целика, м	Эксплуатационные потери в целиках ($П_{цм}$), %
1	0,064	0,16	0,013	0,003	529	0,070	0,067	0,0175	49,01
2			0,013	0,006	361	0,048	0,087	0,0225	64,44
3			0,02	0,005	225	0,071	0,074	0,015	51,07
4			0,02	0,01	169	0,053	0,107	0,010	66,83
5			0,026	0,006	121	0,064	0,064	0,027	49,90
6			0,026	0,013	81	0,043	0,090	0,031	67,56
7			0,033	0,008	81	0,069	0,073	0,0195	51,28
8			0,033	0,017	49	0,042	0,093	0,0335	68.90
9			0,04	0,01	49	0,062	0,068	0,030	52,51
10			0,04	0,02	36	0,045	0,099	0,030	68,69

Оборудование имеет функциональные возможности, оснащенные системой ввода и обработки данных: ввод параметров испытаний в диалоговом режиме, построение графических зависимостей «нагрузка-перемещение», «нагрузка-время», «перемещение-время»; определение текущего и максимального значений нагрузки и деформации, приложенных к образцу, текущей скорости перемещения (мм/с) и нагружения (кН/с).

Пресс дополнительно оборудован датчиком перемещений подвижной плиты KS20-1000-01-C2 для измерения абсолютных и определения относительных продольных деформаций. Для контроля за процессом деформирования и разрушения физических моделей сотовых горных конструкций и их конструктивных элементов применяется преобразователь акустической эмиссии «A-Line DDM-1».

Для создания физических моделей сотовых горных конструкций из геоматериалов создан стенд, который состоит из корпуса (камеры) для размещения модели размером до 400×400×400 мм с днищем, торцевыми стенками, боковыми стенками и крышкой, на крышке установлено пригрузочное устройство.

На стенде запрессовывается в принятом силовом и геометрическом масштабе модель (или ее конструктивные элементы) из геоматериала. В качестве геоматериала принимается смесь из молотой негашеной воздушной извести, немолотого кварцевого песка, цемента и воды (табл. 2), при этом необходимо создать условия, когда прочность модели должна соответствовать прочности натуры в принятом масштабе моделирования. Геоматериал также прошел испытания. Для проведения экспериментальных исследований изготовлены 88 цельнолитых физических моделей (испытания каждой модели №№ 1 — 10 проводилось не менее 4 раз).

Модель с заданными физико-механическими свойствами запрессовывается с установкой в нее конструктивных элементов моделируемой конструкции (вер-

Таблица 2

Физико-механические свойства каменной соли Илецкого месторождения и подготовленные рецептурой геоматериала
Physical and mechanical properties of Iletsk rock salt and geomaterial composition

Параметр	**Единица измерения**	**Физико-механические свойства каменной соли**	**Физико-механические свойства геоматериала**
Объемный вес, γ	МН/м^3	0,021	0,012
Предел прочности на одноосное сжатие, $\sigma_{сж}$	МПа	35	26,3
Сцепление, *C*	МПа	4,5	3,15
Модуль упругости, *E*	МПа	30 000	16 500
Угол внутреннего трения, φ	°	41	32
Коэффициент Пуассона, ν	—	0,35	0,30
Состав геоматериала			
Воздушная известь молотая негашеная, %			15 — 40
Кварцевый песок немолотый, %			45 — 87
Цемент, %			5 — 14
Вода, %			6 — 15

тикальных камер цилиндрической формы). Конструктивные элементы печатаются с помощью промышленного 3D принтера CreatBot D600 Pro по FDM с использованием технологии трехмерной печати, при которой построение объекта идет за счет расплавления нити пластика, подающейся через экструдер на рабочую поверхность. Область построения модели на данном принтере до 600 мм, что позволяет печатать крупные элементы моделируемых конструкций размерами до 400 мм. При этом используется материал PEEK. Применение данного принтера аргументировано тем, что он позволяет печатать элементы из прочных материалов PEEK благодаря высокой температуре экструдера (до 420 °С), позволяющего наплавлять такой материал. Набору прочности элемента способствует нагрев площадки до 100 °С и нагрев камеры печати до 70 °С.

В результате изготовления модели из геоматериалов конструктивные элементы формируют вертикальные камеры цилиндрической формы (пластиковые элементы в дальнейшем удаляются из конструкции), размеры которых в принятом масштабе моделирования соответствует их размерам в натурных условиях.

В табл. 1 (см. рис. 1) представлены соотношения площадей пустот (вертикальных камер цилиндрической формы) и геоматериала в физических моделях для квадратной сетки их расположения, а также рассчитанные эксплуатационные потери геоматериала, оставленного в целиках модели.

Физическое моделирование и результаты экспериментальных исследований

Физико-механические свойства эквивалентного материала определялись для каменной соли Илецкого месторождения с поиском возможностей соблюдения ряда условий и критерия подобия.

В качестве выемочной единицы/участка месторождения выбран блок массива каменной соли кубической формы размером $Д_н$ (длина) × $В_н$ (ширина) × $Н_н$ (высота этажа) = 60×60×60 м. Высота блока и диаметры камер выбраны с учетом возможности эффективного применения бурового оборудования. Высота блока соответствует высоте двух сдвоенных этажей — 2 эт×30 м.

При данном методе физического моделирования для обеспечения условий механического подобия модели размером $Д_м$ (длина) × $В_м$ (ширина) × $Н_м$ (высота) = = 0,4×0,4×0,4 м и выемочного участка Илецкого месторождения каменной соли размером $Д_н$ (длина) × $В_н$ (ширина) × $Н_н$ (высота этажа) = 60×60×60 м предел прочности на одноосное сжатие эквивалентного материала рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{сж\,м} = (l_м / l_н) \cdot (\gamma_м / \gamma_н) \cdot \sigma_{сж\,н}, \text{ МПа}$$

где $l_м$ — длина граней физической модели, м; $l_н$ — длина граней модели выемочного участка Илецкого месторождения, м; $\gamma_н$ — объемный вес каменной соли месторождения, т/м^3; $\gamma_м$ — объемный вес эквивалентного материала модели, т/м^3; $\sigma_{сж\,н}$ — предел прочности на сжатие каменной соли, МПа.

При расчете физико-механических свойств эквивалентного материала ограничивались геометрическим масштабом

$$l_н / l_м = m_l = 60/0{,}4 = 150,$$

так как на комплексном стенде можно проводить испытания моделей размером 400×400×400 мм с погрешностью ±5 мм; $m_l = 150$ — это определенное число, позволяющее сохранить условие геометрического подобия. Физико-механические свойства каменной соли (γ, $\sigma_{сж}$, $\sigma_р$, E и ν) определялись при проведении испытаний в лабораторных условиях.

Таблица 3

Рейтинг физических моделей по устойчивости к разрушающим нагрузкам при различных соотношениях ширины камер и целиков
Rating of physical models in terms of their fracture load resistance at different width ratios of stopes and pillars

№ модели	Разрушающая физическую модель нагрузка $P_м$, кН/0,16 м^2	Рейтинг физической модели по устойчивости от 1 (максимально устойчивый) до 10 (минимально устойчивый)	Ширина камеры $b_к$, м	Минимальная ширина целика $a_ц$, м
1	348	10	0,013	0,00325
2	416	9	0,013	0,0065
3	422	8	0,02	0,005
4	498	6	0,02	0,01
5	484	7	0,026	0,0065
6	552	3	0,026	0,013
7	534	5	0,033	0,00825
8	662	2	0,033	0,0165
9	546	4	0,04	0,01
10	771	1	0,04	0,02

В процессе проведения исследований было установлено, что подготовить эквивалентный материал каменной соли для физических моделей не представляется возможным, так как не соблюдается подобие и интегральное единство по свойствам геоматериала γ, $\sigma_{сж}$, $\sigma_р$ и E. В связи с этим было принято решение провести физическое моделирование с получением качественных характеристик. Ранее выполненное численное моделирование позволило получить точные количественные характеристики, так как входные параметры в численную модель имеют высокую степень достоверности [15 — 20].

С использованием комплексного стенда при проведении физического моделирования геомеханических процессов во вторичных полях напряжений при разработке соляных месторождений с применением сотовых горных конструкций, установки и специализированного стенда для воспроизводства физических моделей любой сложности методами 3D-моделирования, приборно-инструментального обеспечения исследований получены экспериментальные зависимости прочностных, деформационных и акустических характеристик физических моделей сотовых конструкций.

В работе исследовались прочностные и деформационные характеристики 10 физических моделей с шириной камер 0,013; 0,02; 0,026; 0,033 и 0,4 м и шириной МКЦ примерно в два и в четыре раза меньшими, чем ширина камеры (см. табл. 1). По аналогии с результатами численного моделирования [15] установлена закономерность распределения разрушающих физические модели нагрузок, представленная в табл. 3 и на рис. 3 (для сравнения с результатами численного моделирования, представленными на рис. 4: при увеличении ширины камеры и целика увеличивается прочность вмещающего массива и МКЦ, меньшая прочность закономерно регистрируется при меньшей ширине целика при тех же значениях ширины камер.

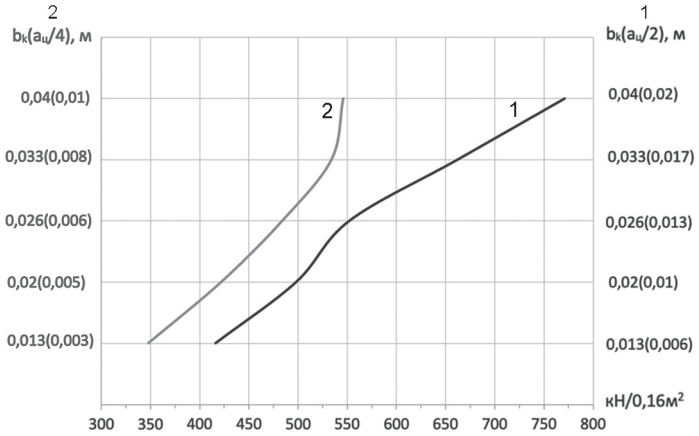

Рис. 3. Изменение разрушающих физическую модель нагрузок ($P_м$, кН/0,16 м^2) при изменении ширины камер $b_к$ и целиков $a_ц$. Кривая 1 — при ширине целика в два раза меньшей, чем ширина камеры; кривая 2 — при ширине целика в четыре раза меньшей, чем ширина камеры

Fig. 3. Physical model fracture loads (P_m, kN/0.16 m^2) versus different widths of stopes, b_s, and pillars, a_p . Curve 1 — pillar width two times smaller than stope width; curve 2 — pillar width four times smaller than stope width

Выбирая консервативный подход для обеспечения безопасности горных работ при проектировании параметров горнотехнической системы Соль-Илецкого рудника выбирается критическая глубина 340 — 470 м, которая была рассчитана на основе численного моделирования (см. рис. 5), так как достоверность входных параметров в численные модели весьма высокая [15]. Исследовалось НДС 10 численных моделей с шириной камер 2, 3, 4, 5 и 6 м и шириной МКЦ в два и в четыре раза меньшей, чем ширина камеры (рис. 4). Установлена закономерность распределения разрушающих численные модели нагрузок: при увеличении ширины камеры и целика увеличивается прочность вмещающего

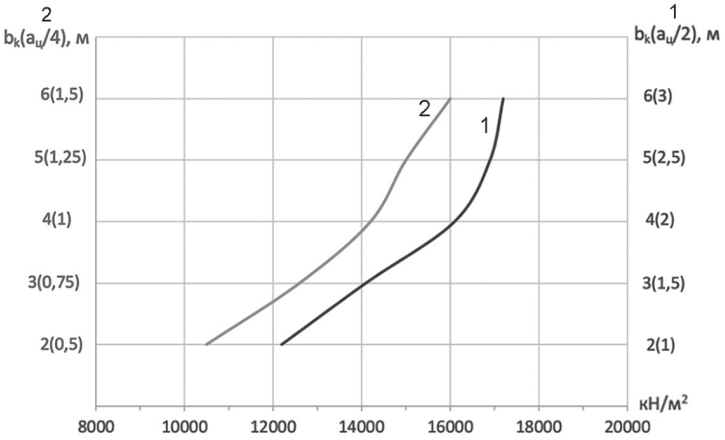

Рис. 4. Изменение разрушающих численную модель нагрузок ($P_н$, кН/м^2) при изменении ширины камер $b_к$ и целиков $a_ц$ [15]. Кривая 1 — при ширине целика в два раза меньшей, чем ширина камеры; Кривая 2 — при ширине целика в четыре раза меньшей, чем ширина камеры.

Fig. 4. Numerical model fracture loads (P_n, kN/m^2) versus different widths of stopes, b_s, and pillars, a_p [15]. Curve 1 — pillar width two times smaller than stope width; curve 2 — pillar width four times smaller than stope width

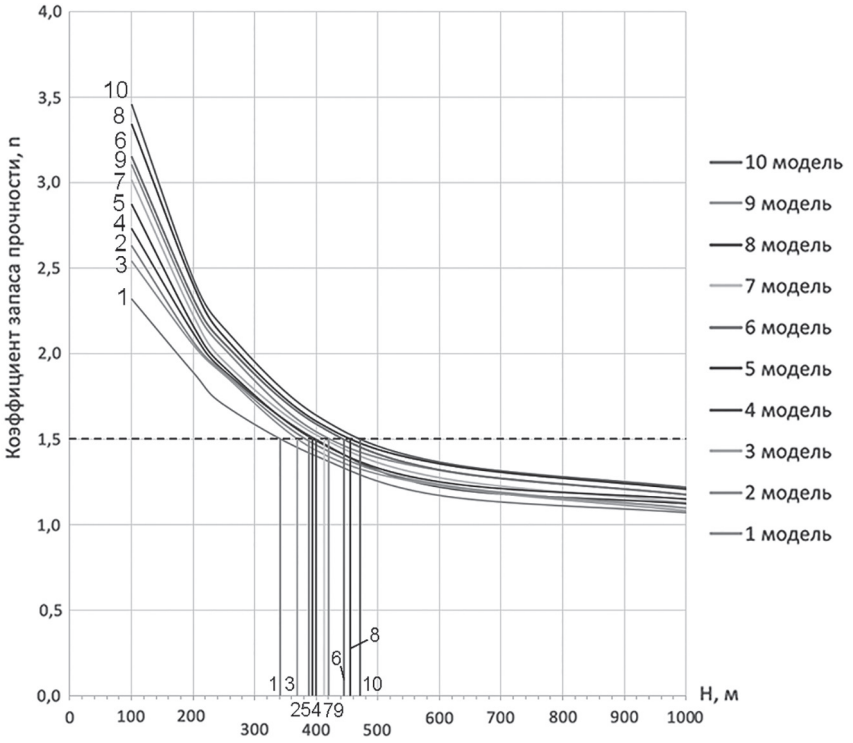

Рис. 5. График изменения коэффициента запаса прочности целиков n с глубиной и допустимая глубина применения моделей №№ 1 — 10 [15]. КЗП ≥ 1,5 — допустимый предел проектирования горнотехнических систем с высокой степенью достоверности входных параметров в численную модель
Fig. 5. Change in factor of safety n of pillars with depth and allowable application depths for models nos. 1–10 [15]. FoS≥1.5 — allowable threshold for mine design at high reliability of input data of numerical modeling

массива и МКЦ, меньшая прочность закономерно регистрируется при меньшей ширине целика при тех же значениях ширины камер. Данные условия подтверждаются результатами физического моделирования, которые представлены в статье.

В табл. 4 представлены рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли. Рекомендуется на стадии опытно-промышленных испытаний извлекать запасы нефункциональных целиков, расположенных на Восточном фланге Илецкого месторождения каменной соли в отметках эксплуатируемых этажей –132÷–270 м на глубине 250 — 388 м от земной поверхности. Рекомендуется также извлекать запасы ниже гор. –270 м мощностью 60 м (отм. –270÷–330 м, глубина 388 — 448 м) и запасы, расположенные в подошве водозащитной толщи (ВЗТ) мощностью 28 м в отм. –100÷–132 м на глубине 218 — 250 м от земной поверхности.

Выводы

В статье представлены результаты физического моделирования НДС сотовых горных конструкций, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы.

Для проектирования горнотехнической системы установлены критические глубины применения сотовых горных

Таблица 4

Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли
Recommended application of honeycomb mine structures at Iletsk rock salt deposit

№ модели (рис. 1)	Ширина камеры $b_к$, м	Минимальная ширина целика $a_ц$, м	Критическая глубина применения H, м	Участок шахтного поля
1	2	0,5	341	Запасы на Восточном фланге в отметках этажей – 132÷–215 м на глубине 250 — 333 м от земной поверхности; запасы в подошве ВЗТ в отметках –100÷–132 м на глубине 218 — 250 м
2	2	1	387	Запасы на Восточном фланге в отметках этажей – 132÷–270 м на глубине 250 — 387 м; запасы в подошве ВЗТ в отметках –100÷–132 м на глубине 218 — 250 м
3	3	0,75	368	
4	3	1,5	400	
5	4	1	393	
6	4	2	442	
7	5	1,25	415	
8	5	2,5	458	Запасы на Восточном фланге в отметках этажей – 132÷–270 м на глубине 250 — 387 м; запасы ниже гор. –270 м в отметках –270÷–330 м на глубине 388 — 448 м; запасы в подошве ВЗТ в отметках –100÷–132 м на глубине 218 — 250 м
9	6	1,5	420	
10	6	3	474	

конструкций для условий Илецкого месторождения каменной соли, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы, при различных соотношениях минимальной ширины целиков и диаметров камер, подтвержденные результатами физического моделирования.

Выявлены закономерности распределения разрушающих нагрузок в физических моделях при различных соотношениях минимальной ширины целиков и диаметров камер.

Полученные результаты показывают перспективность применения сотовых горных конструкций в условиях подземной разработки соляных месторождений с обеспечением безопасности и эффективности горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галченко Ю. П.*, *Еременко В. А.* Природно-технические системы подземной разработки рудных месторождений на основе конвергентных горных технологий: Монография. 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Изд-во «Горная книга», 2023. — 288 с.
2. *Трубецкой К. Н.*, *Галченко Ю. П.* Природоподобная геотехнология комплексного освоения недр: проблемы и перспективы. — М.: Научтехлитиздат. — 2020. — 368 с.
3. *Трубецкой К. Н.*, *Галченко Ю. П.* Геоэкология освоения недр и экогеотехнология разработки месторождений. — М.: Научтехлитиздат. — 2015. — 360 с.
4. *Eremenko V. A.*, *Vinnikov V. A.*, *Pugach A. S.*, *Kosyreva M. A.* Substantiation of rib pillar sizes for rock salt mining in vertical cylindrical stopes arranged at the nodes of regular triangular pattern // Eurasian Mining. 2023, no. 2, pp. 56—62. DOI: 10.17580/em.2023.02.12.
5. *Еременко В. А.*, *Винников В. А.*, *Пугач А. С.*, *Косырева М. А.* Обоснование размеров междукамерных целиков при разработке соляных месторождений вертикальными очистными камерами цилиндрической формы // Горный журнал. — 2024. — № 1. — С. 29—38.

6. *Шевяков Л. Д.* О расчете прочных размеров и деформаций опорных целиков // Изд. АН СССР. — 1941. — № 7-8. — С. 3—16.

7. *Шевяков Л. Д.* Разработка месторождений полезных ископаемых. — М.: Углетехиздат, 1953. — 756 с.

8. *Борщ-Компониец В. И.* Практическая геомеханика горных пород. — М.: Изд-во «Горная книга», 2013. — 322 с.

9. *Гулевич Г. Е.* Рациональный порядок расположения и оптимальные размеры поддерживающих целиков при камерно-столбовой системе разработки. — М.: ОБНТИ Гипроцветмет, 1959. — 30 с.

10. *Сидоров Д. В.*, *Пономаренко Т. В.* Методология оценки геодинамического состояния природно-технических систем при реализации проектов освоения месторождений // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 49—52.

11. *Ломакин И. С.*, *Цаюков А. А.*, *Евсеев А. В.* Физическое и математическое моделирование процесса деформирования и разрушения междукамерных целиков // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. — 2021. — № 1. — С. 47—53.

12. *Риб С. В.*, *Говорухин Ю. М.* Разработка комплексного метода исследования геомеханических процессов при интеграции физического и численного моделирования // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2018. — № 2. — С. 363—378.

13. *Богуславский Э. И.*, *Зуев Б. Ю.*, *Коржавых П. В.* Физическое моделирование устойчивости междукамерных целиков в условиях шахты им. Губкина // Записки Горного института. — 2014. — Т. 207. — С. 17—21.

14. *Литвиненко В. С.*, *Богуславский Э. И.*, *Коржавых П. В.* Физическое и математическое моделирование технологических параметров этажно-камерной системы разработки нижнего горизонта рудника им. Губкина // Записки Горного института. — 2012. — Т. 195. — С. 115—119.

15. *Kosyreva M. A.*, *Eremenko V. A.* Numerical stress-strain modeling of honeycomb mine structures with vertical stopes of cylindrical form // Eurasian Mining. 2024, no. 1, pp. 36—39. DOI: 10.17580/em.2024.01.09.

16. *Zhengzheng Xie, Nong Zhang, Xiaowei Feng, Dongxu Liang, Qun Wei, Mingyue Weng* Investigation on the evolution and control of surrounding rock fracture under different supporting conditions in deep roadway during excavation period // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, vol. 123, article 104122. DOI: 10.1016/j. ijrmms.2019.104122.

17. *Islavath S. R.*, *Deb D., Kumar H.* Development of a roof-to-floor convergence index for longwall face using combined finite element modelling and statistical approach // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020, vol. 127, pp. 204—221. DOI: 10.1016/j. ijrmms.2020.104221.

18. *Fei Wu, Hao Zhang, Quanle Zou, Cunbao Li, Jie Chen, Renbo Gao* Viscoelastic-plastic damage creep model for salt rock based on fractional derivative theory // Mechanics of Materials. 2020, vol. 150, pp. 1—14. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103600.

19. *Jianqiang Deng, Yaoru Liu, Qiang Yang, Wei Cui, Yinbang Zhu, Yi Liu, Bingqi L.* A viscoelastic, viscoplastic, and viscodamage constitutive model of salt rock for underground energy storage cavern // Computers and Geotechnics. 2019, vol. 119, pp. 1—14. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103288.

20. *Huang Xiao Lan, Chao Yu* Studies of hard interlayer's influence on the creep deformation of salt rock cavity // Advanced Materials Research. 2012, vol. 594—597, pp. 452—455. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.452. ГИАБ

REFERENCES

1. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A. *Prirodno-tekhnicheskie sistemy podzemnoy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy na osnove konvergentnykh gornykh tekhnologiy*: Monografiya. 2-e izd., dop. i pererab. [Natural-technical systems of underground ore mining using convergent geotechnologies. Monograph. 2nd edition, revised and enlarged], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2023, 288 p.

2. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. P. *Prirodopodobnaya geotekhnologiya kompleksnogo osvoeniya nedr: problemy i perspektivy* [Nature-like geotechnology of integrated subsoil management: Problems and prospects], Moscow, Nauchtekhlitizdat. 2020, 368 p.

3. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. P. *Geoekologiya osvoeniya nedr i ekogeotekhnologiya razrabotki mestorozhdeniy* [Geoecology of subsoil management and ecogeotechnology of mineral mining], Moscow, Nauchtekhlitizdat. 2015, 360 p.

4. Eremenko V. A., Vinnikov V. A., Pugach A. S., Kosyreva M. A. Substantiation of rib pillar sizes for rock salt mining in vertical cylindrical stopes arranged at the nodes of regular triangular pattern. *Eurasian Mining*. 2023, no. 2, pp. 56—62. DOI: 10.17580/em.2023.02.12.

5. Eremenko V. A., Vinnikov V. A., Pugach A. S., Kosyreva M. A. Substantiation of rib pillar sizes for rock salt mining in vertical cylindrical stopes. *Gornyi Zhurnal*. 2024, no. 1, pp. 29—38. [In Russ].

6. Shevyakov L. D. Calculation of strong sizes and deformations for support pillars. *Izd. AN SSSR*. 1941, no. 7-8, pp. 3—16. [In Russ].

7. Shevyakov L. D. *Razrabotka mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Mineral mining], Moscow, Ugletekhizdat, 1953, 756 p.

8. Borshch-Komponiets V. I. *Prakticheskaya geomekhanika gornykh porod* [Practical geomechanics of rocks], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2013, 322 p.

9. Gulevich G. E. *Ratsional'nyy poryadok raspolozheniya i optimal'nye razmery podderzhivayushchikh tselikov pri kamerno-stolbovoy sisteme razrabotki* [Rational arrangement and optimal sizes of support pillars in room-and-pillar mining], Moscow, OBNTI Giprotsvetmet, 1959, 30 p.

10. Sidorov D. V., Ponomarenko T. V. Estimation methodology for geodynamic behavior of nature-and-technology systems in implementation of mineral mining projects. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 49—52. [In Russ].

11. Lomakin I. S., Tsayukov A. A., Evseev A. V. Physical and mathematical modeling of deformation and failure of rib pillars. *Perm federal Research Center Journal*. 2021, no. 1, pp. 47—53. [In Russ].

12. Rib S. V., Govorukhin Yu. M. Integrated geomechanical research method with integration of physical and numerical modeling. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2018, no. 2, pp. 363—378. [In Russ].

13. Boguslavsky E. I., Zuev B.Yu., Korzhavykh P. V. Physical modeling of rib pillar stability. A case-study of Gubkin Mine. *Journal of Mining Institute*. 2014, vol. 207, pp. 17—21. [In Russ].

14. Litvinenko V. S., Boguslavsky E. I., Korzhavykh P. V. Physical and mathematical modeling of room-and-pillar mining parameters at lower level in Gubkin Mine. *Journal of Mining Institute*. 2012, vol. 195, pp. 115—119. [In Russ].

15. Kosyreva M. A., Eremenko V. A. Numerical stress-strain modeling of honeycomb mine structures with vertical stopes of cylindrical form. *Eurasian Mining*. 2024, no. 1, pp. 36—39. DOI: 10.17580/em.2024.01.09.

16. Zhengzheng Xie, Nong Zhang, Xiaowei Feng, Dongxu Liang, Qun Wei, Mingyue Weng Investigation on the evolution and control of surrounding rock fracture under different supporting conditions in deep roadway during excavation period. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, vol. 123, article 104122. DOI: 10.1016/j. ijrmms.2019.104122.

17. Islavath S. R., Deb D., Kumar H. Development of a roof-to-floor convergence index for longwall face using combined finite element modelling and statistical approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 127, pp. 204—221. DOI: 10.1016/j. ijrmms.2020.104221.

18. Fei Wu, Hao Zhang, Quanle Zou, Cunbao Li, Jie Chen, Renbo Gao Viscoelastic-plastic damage creep model for salt rock based on fractional derivative theory. *Mechanics of Materials*. 2020, vol. 150, pp. 1—14. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103600.

19. Jianqiang Deng, Yaoru Liu, Qiang Yang, Wei Cui, Yinbang Zhu, Yi Liu, Bingqi L. A viscoelastic, viscoplastic, and viscodamage constitutive model of salt rock for underground energy storage cavern. *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 119, pp. 1—14. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103288.

20. Huang Xiao Lan, Chao Yu Studies of hard interlayer's influence on the creep deformation of salt rock cavity. *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 594—597, pp. 452—455. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.452.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Косырева Марина Александровна[1] — аспирант,
e-mail: marinkosyreva@gmail.com,
Еременко Виталий Андреевич[1] — д-р техн. наук, профессор РАН,
директор научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика
и конвергентные горные технологии», профессор, e-mail: prof.eremenko@gmail.com,
[1] НИТУ МИСИС.
Для контактов: Косырева М.А., e-mail: marinkosyreva@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Kosyreva[1], Graduate Student,
e-mail: marinkosyreva@gmail.com,
V.A. Eremenko[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Director of Research Center for Applied Geomechanics and Convergent Geotechnologies, Professor, e-mail: prof.eremenko@gmail.com,
[1] NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: M.A. Kosyreva, e-mail: marinkosyreva@gmail.com.

Получена редакцией 28.06.2024; получена после рецензии 22.07.2024; принята к печати 10.09.2024.
Received by the editors 28.06.2024; received after the review 22.07.2024; accepted for printing 10.09.2024.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

СОПОСТАВИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСКАВАТОРОВ И АВТОСАМОСВАЛОВ ДЛЯ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ

(2024, № 6, СВ 18, 20 с.)

Кузнецов Дмитрий Владимирович[1] — канд. техн. наук, доцент, e-mail: KuznetsovDV@mail.ru,
Косолапов Александр Иннокентьевич[1] — д-р техн. наук, профессор, e-mail: Kosolapov1953@mail.ru,
[1] Сибирский федеральный университет.

Рассмотрены технические и технологические ограничения, характеризуемые на современном этапе импортозамещением технологического горнотранспортного оборудования, увеличением глубины карьеров, уменьшением площади рабочего пространства, ростом расстояния транспортирования горной массы, природными условиями, ухудшением показателей разработки во взаимосвязи с параметрами карьерного оборудования. Предложен подход для решения одной из основных научно-практических задач — оценка эффективности применения технологических комплексов оборудования карьера, функционирующих на базе одноковшовых экскаваторов мехлопат. Даны критерии для укрупненной сравнительной оценки. На примере некоторых моделей гидравлических и электрических экскаваторов выполнен анализ влияния рабочих параметров на показатели эксплуатации в различных условиях с учетом возможного изменения производительности. Определена динамика формируемых при этом денежных и энергетических затрат на выемку горной массы, ее погрузку и перемещение, установлено влияние плотности пород и расстояния перевозок. Оценена необходимая рабочая площадь для размещения экскаваторов в пределах карьерного пространства и соответствующая скорость подвигания забоев.

Ключевые слова: электрический экскаватор, гидравлический экскаватор, автосамосвал, производительность, карьер, рабочая площадь, плотность пород, затраты, энергоемкость пород.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF EXCAVATORS AND DUMP TRUCKS FOR ORE PITS

D.V. Kuznetsov[1], Cand Sci (Eng.), Assistant Professor, e-mail: KuznetsovDV@mail.ru,
A.I. Kosolapov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor; [1] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Technical and technological limitations characterized at the present stage by import substitution of technological mining transport equipment, increase in the depth of open pits, decrease in the area of working space, increase in the distance of rock mass transportation, natural conditions, deterioration of development indicators in interrelation with the parameters of open-pit equipment are considered. The approach for solving one of the main scientific and practical problems — evaluation of application efficiency of quarry equipment technological complexes functioning on the basis of single-bucket excavators shovel — is offered. Criteria for an enlarged comparative evaluation are given. On the example of some models of hydraulic and electric excavators the influence of operating parameters on the operation indicators in different conditions is analysed, taking into account possible changes in productivity. The dynamics of monetary and energy costs formed in this case for excavation of rock mass, its loading and movement is determined, the influence of rock density and transport distance is established. The necessary working area for placing excavators within the quarry space and the corresponding speed of face movement have been estimated. Taking this into account, the dependencies allowing to make decisions for justification of the excavator optimum application as well as the dump truck and organization of mining technology determined on the basis of natural, technical, technological, organizational and economic conditions are obtained.

Key words: electric excavator, hydraulic excavator, dump truck, productivity, pit, working area, rock density, costs, energy intensity of rocks.