ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(11):35-47

УДК 622.831; 622.2; 622.235 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-35-47

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВТОРИЧНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ И ПРИМЕНЕНИИ КОНВЕРГЕНТНОЙ ГОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ КАМЕННОЙ СОЛИ

Ю.П. Галченко[1], В.И. Лейзер[1], Н.Г. Высотин[1], Е.Д. Якушева[1]

[1] МГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: schtrek33@mail.ru

Аннотация: В качестве экспериментальной проверки сформулированных общих подходов создания и проектирования конвергентных горных технологий в настоящее время проводится комплекс теоретических исследований и виртуальных экспериментов с использованием физических и численных моделей в программном комплексе Map3D. При разработке месторождений конвергентными горными технологиями, например, при формировании в массиве горных пород сотовых горных конструкций напряженно-деформированное состояние вмещающего их массива будет изменяться в процессе ведения горно-капитальных, горно-подготовительных и очистных работ. Для проведения лабораторных исследований каменной соли возникла необходимость составить план и написать методику проведения экспериментов с описанием используемых методов получения данных (системы мониторинга образцов). Лабораторные исследования основываются на использовании подготовленных для проведения экспериментов образцов каменной соли, гидравлического пресса для создания горного давления и системы мониторинга с применением преобразователей акустической эмиссии и тензорезистивных датчиков для измерений величины деформаций. Оборудование позволяет получить общую картину и изучить напряженно-деформированное состояние элементарного блока, применив теории подобия и размерности, сделать выводы о влиянии параметров образующихся в литосфере техногенных полостей на развитие геомеханических процессов в окружающем массиве.

Ключевые слова: конвергентные горные технологии, каменная соль, техногенные пустоты, сотовые конструкции, цилиндрические камерные выработки, напряженно-деформированные состояние (НДС), преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ), крейтовая система сбора данных, тензорезисторы фольговые константановые одиночные, программа Map3D.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00034).

Для цитирования: *Галченко Ю. П., Лейзер В. И., Высотин Н. Г., Якушева Е. Д.* Обоснование методики лабораторных исследований вторичного поля напряжений при создании и применении конвергентной горной технологии подземной разработки каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 11. – С. 35–47. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-35-47.

© Ю.П. Галченко, В.И. Лейзер, Н.Г. Высотин, Е.Д. Якушева. 2019.

Procedure justification for laboratory research of secondary stress field in creation and application of convergent technology for underground mining of rock salt

Yu.P. Galchenko[1], V.I. Leizer[1], N.G. Vysotin[1], E.D. Yakusheva[1]

[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: schtrek33@mail.ru

Abstract: For experimental validation of the formulated general approaches to creation of convergent mining technologies, a set of theoretical studies and virtual experiments is carried out using physical models and numerical simulations in Map3D. In mineral mining using convergent technologies, for example, when constructing honeycomb structures in rock mass, the stress state of the enclosing rock mass will change during stone drivage, preparatory works and actual stoping. For lab-scale research of rock salt, the plan and experimentation procedure were written with description of the methods of data acquisition (monitoring of samples). The laboratory research uses the prepared samples of rock salt, a hydraulic press to create rock pressure and a monitoring system with acoustic emission transducers and resistive-strain sensors to measure deformations. This equipment provides an overall picture and stress–strain analysis of a unit block. Using the theories of similarity and dimensionality, it is possible to judge on the influence exerted by the shape, arrangement and sizes of mined-out stopes on rock mass stability in the course of construction of honeycomb structures, as well as on the effect of induced stresses in the lithosphere on the geomechanical behavior of surrounding rock mass.

Key words: convergent mining technologies, rock salt, mined-out stopes, honeycomb structures, cylindrical stopes, stress state, acoustic emission transducers, crate data acquisition system, single foil constant strain gages, Map3D.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-17-00034.

For citation: Galchenko Yu. P., Leizer V. I., Vysotin N. G., Yakusheva E. D. Procedure justification for laboratory research of secondary stress field in creation and application of convergent technology for underground mining of rock salt. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2019;(11):35-47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-35-47.

Общие положения

Переход к широкому применению природоподобных технологий во всех областях хозяйственной деятельности позволит в перспективе разрешить глобальные противоречия между техно- и биосферой путем превращения первой в органическую часть второй [1]. Конвергентными можно считать технологии, объединяющие в себе различные междисциплинарные науки.

Методология создания конвергентных технологий включает в себя 5 последовательных этапов:

- накопление знаний о биологическом прототипе и методах их конвергенции с техническими;
- физическое и компьютерное моделирование процессов;
- лабораторная проверка модели конвергентной технологии;
- полупромышленная проверка и создание методов выбора рациональных параметров технологии;
- промышленный инжиниринг и инновационное развитие технологии.

Исследования закономерностей развития во времени и в пространстве тех-

ногенно измененных недр как динамического литосферного объекта привели к методически важному заключению о том, что при формировании в литосфере крупных неоднородностей с убывающей за счет постепенной выемки вещества средней плотностью динамика напряженно-деформированного состояния нарушаемого горными работами участка литосферы полностью определяется процессами реализации напряженностей на внешнем контуре этих неоднородностей [2—8].

В результате обоснована концепция построения горных технологий, в которых очистная выемка полезного ископаемого и управление горным давлением разделяются во времени путем опережающего формирования в пределах обрабатываемого участка литосферы пространственной каркасной конструкции, призванной компенсировать геомеханические последствия локальной выемки балансовых запасов. Это позволяет обеспечить высокую степень безопасности добычи руды и практически полностью устранить потери полезного ископаемого на стадии очистных работ [9—11]. Однако при разработке месторождений каменной соли использование подобной концепции в чистом виде практически невозможно, так как по условиям гидрологической безопасности управление горным давлением производится за счет покидаемых целиков из полезного ископаемого. Поэтому реализация преимуществ принципа превентивности должна происходить в другой форме.

Теоретические положения

С точки зрения главной целевой функции комплексного освоения недр как основополагающей методологии развития минерально-сырьевого комплекса перспективное развитие геотехнологии должно идти по пути поиска альтернативных решений, позволяющих существенно повысить показатели полноты извлечения балансовых запасов за счет создания в процессе добычных работ устойчивых объемных несущих конструкций с минимальным количеством вещества литосферы — полезного ископаемого, оставляемого в недрах.

В живой природе достаточно широко распространены конструкции, обеспечивающие высокую устойчивость при минимальном расходе вещества. Так устроены стебли злаковых культур, а также кости млекопитающих, которые воспринимают вертикальные нагрузки при движении.

Известно, что замена компактной костной ткани на губчатую во внутренней части бедренной кости человека (рис. 1) позволяет сохранить необходимую прочность этой кости при уменьшении расхода костного вещества. Архитектура несущей системы хорошо видна на разрезе, перпендикулярном направлению действующей нагрузки. Как видно из рисунка, необходимая прочность данной конструкции обеспечивается за счет замены сплошного костного вещества системой сопряженных пустотелых псевдоцилиндрических элементов переменного диаметра [12].

В работах [12] и [13] дано описание методов определения и приведены значения прочностных характеристик бедренной кости человека и ее основных элементов (табл. 1).

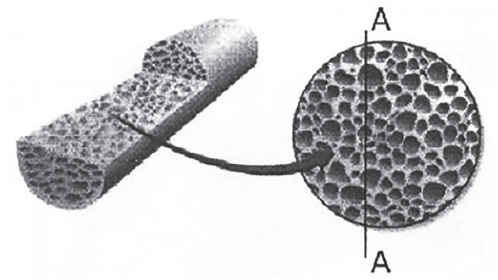


Рис. 1. Вид поперечного сечения губчатой кости
Fig. 1. Cross section of trabecular bone

Таблица 1

Прочностные характеристики бедренной кости человека
Strength characteristics of human femoral bone

№ п/п	Показатель	Единицы измерения	Величина
1	Предел прочности на сжатие кости в целом (σ_0)	Н/см^2	7787
2	Предел прочности компактной костной ткани на сжатие ($\sigma_к$)	Н/см^2	17 000
3	Доля компактной костной ткани в общем объеме ($в_к$)	%	26
4	Плотность компактной костной ткани ($\gamma_к$)	кг/м^3	2400
5	Плотность губчатой костной ткани ($\gamma_г$)	кг/м^3	315,4

Нетрудно определить, что предел прочности губчатой костной ткани на сжатие ($\sigma_г$) составит:

$$\sigma_г = (\sigma_0 - \sigma_к \cdot в_к)/(1 - в_к) = 4550 \text{ Н/см}^2.$$

Используя показатель удельной прочности конструкции ($\Delta\sigma_i$), который определяется в работе [7] как отношение плотности вещества конструкции к пределу ее прочности на сжатие, получим:

- для компактной костной ткани:

$$\Delta\sigma_к = \gamma_к / \sigma_к = 0{,}141 \text{ (кг/см}^3\text{)/(Н/см}^3\text{)};$$

- для губчатой костной ткани:

$$\Delta\sigma_г = \gamma_г / \sigma_г = 0{,}0698 \text{ (кг/см}^3\text{)/(Н/см}^3\text{)}.$$

Сопоставив полученные показатели, можно определить величину коэффициента (K_φ) характеризующего увеличение прочности губчатой конструкции за счет формы распределения в ней используемой костной ткани:

$$K_\varphi = \Delta\sigma_к / \Delta\sigma_г = 1{,}99.$$

Это означает, что подобная конструкция обладает повышенной устойчивостью по отношению к нагрузкам, направленным вдоль перегородок, разделяющих объемные пустоты.

Принципиально важным для решаемой горно-технологической задачи является то, что в природной конструкции (рис. 1) «губчатая кость» всегда находится внутри оболочки из компактной костной ткани. Такая схема, с одной стороны, позволяет равномерно распределить внешние нагрузки на все перегородки, разделяющие объемные пустоты, и обеспечить их одновременную работу, а с другой стороны — изолирует губчатую структуру от всех жидкостей, циркулирующих в мягких тканях вокруг кости. Поэтому, адаптируя эти элементы в потенциальную горную технологию можно сформулировать положение о том, что при реализации принципа превентивности необходимо создать объемную конструкцию из вертикальных несущих элементов, равномерное нагружение которых обеспечивается наличием горизонтального элемента, связывающего все вертикальные в единую систему.

Именно на этой основе для условий освоения месторождений каменной соли сформулированы новые, одновременно реализуемые принципы построения альтернативной конвергентной горной (природоподобной) технологии, обеспечивающие геомеханически обоснованную минимизацию потерь полезного ископаемого в опорных целиках без снижения степени геодинамической безопасности, с учетом особенностей геологического строения месторождений.

Применительно к решаемой проблеме, когда изменение направления движения фронта очистной выемки кардинально изменяет характер развития геомеханических процессов в подработанном и надработанном массивах [10], необходимо найти и соответствующую физическую модель этой горно-техни-

ческой системы. Учитывая очевидную структурную аналогию этой системы применяемым сотовым конструкциям, в качестве такой модели целесообразно принять физическую модель трехслойной несущей конструкции с сотовым заполнителем (рис. 2) [15].

Главной отличительной особенностью подобных конструкций является то обстоятельство, что их устойчивость к сжимающим нагрузкам достигается не за счет увеличения количества вещества в несущей конструкции, как это имеет место при использовании камерно-целиковых систем разработки, а за счет высокой относительной жесткости заполнителя, обеспеченной геометрией сотовых ячеек, которая, в свою очередь, описывается такими параметрами, как размер грани (или диаметр описанной окружности) и толщина стенки.

Анализ специализированной литературы [16] показал, что в зависимости от уровня нагружения выигрыш в массе при использовании сотовых конструкций может достигать до 30% и более по сравнению с пролетно-опорными конструкциями.

Таким образом, появилась необходимость создания физической модели сотовых конструкций для изучения физико-механических свойств горных пород и качественной оценки преимущества сотовых конструкций перед существующим методом отработки месторождений камерными системами разработки с естественным поддержанием выработанного пространства.

Обоснование методики моделирования

Моделирование, — один из методов лабораторного исследования, — получило в последнее время широкое распространение при изучении вопросов горного давления, выпуска руды и действия взрыва. Теории подобия и размерностей

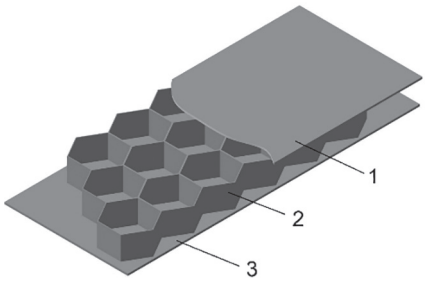


Рис. 2. Схема трехслойной несущей сотовой конструкции: 1 — верхний слой; 2 — сотовый наполнитель; 3 — нижний слой

Fig. 2. Three-layered load-bearing honeycomb structure: 1—top layer; 2—honeycomb filler; 3—bottom layer

определяют условия, при которых явления становятся точно или приближенно подобными [17].

В теории подобия эта задача решается сопоставлением уравнений связи, т.е. уравнений, описывавших данное явление. Теория же размерностей основывается на анализе размерностей физических величин, характерных для данного явления. Для того, чтобы использовать тот или иной метод, нужно знать, какие физические величины определяют рассматриваемое явление. Поэтому целесообразно подходить к определению критериев подобия на основании изучения уравнений связи, однако, часто приходится решать эту задачу применительно к явлениям, уравнения связи которых неизвестны. Иногда анализ размерностей, особенно в начальной стадии изучения, является единственным способом определения функциональных зависимостей, отражающих явление.

Первая и вторая теоремы теории подобия устанавливают свойства подобных явлений, но не указывают способов определения самого факта их подобия. На этот вопрос отвечает третья теория подобия, которая формулирует условия, соблюдение которых необходимо для обеспечения адекватных соотношений при различном масштабе изучаемых

процессов [17—18]. Главным из этих условий при решении горно-технологических задач является однозначность управлений связи, в которых использованы моноваленты, состоящие в численно постоянном соотношении. Обязательным условием при этом является также равенство критериев, составленных из принятых моновалентов. Инвариантность этих критериев также входит в состав требований к изучаемым моделям и процессам [18].

Необходимо дополнить, что условия однозначности, или моновалентов, должны фиксировать геометрические характеристики явления, численные значения физических постоянных, граничные и начальные условия.

В малоисследованных сложных механических процессах (проявление горного давления и др.), когда составление дифференциального уравнения связи затруднительно, в начале исследования используются более простой путь для установления необходимых критериев и констант подобия, а именно, использование общего закона динамического подобия Ньютона, наряду с применением метода размерностей.

В этом случае только правильный полный учет основных физических факторов, действующих в исследуемом процессе, явлении может обеспечить удовлетворительное решение поставленной задачи.

Целью проведения экспериментов на начальном этапе является определение влияния формы, размеров и расположения техногенных пустот на устойчивость элементарного блока. Объектом исследований является природная каменная соль Илецкого месторождения.

Для прессовых испытаний готовятся образцы каменной соли кубической формы с длиной ребра, равной 40 см.

В качестве критерия подобия принимаем показатель удельной прочности конструкции ($\Delta\sigma$), определение которого было дано выше:

$$\Delta\sigma = \gamma/\sigma \text{ (кг/см}^3\text{)/(Н/см}^3\text{)}$$

где γ — плотность вещества; σ — предел прочности на сжатие.

Исходя из целей и задач моделирования, в каждой серии экспериментов испытывается 12 образцов с различной формой пустот, их расположением и размерами (рис. 3 и 4).

Сценарии проведения экспериментов:

- образец каменной соли с подготовленной в нем одной техногенной пустотой прямоугольного сечения, чтобы отношение площади образца к площади пустоты составляло 50/50%;
- образец каменной соли с подготовленными в нем техногенными пустотами прямоугольного сечения в количестве 4-х штук, чтобы отношение площади образца к площади пустоты составляло 50/50%;
- образец каменной соли с подготовленными в нем техногенными пустотами прямоугольного сечения в количестве 6-ти штук, чтобы отношение площади образца к площади пустоты составляло 50/50%;
- образец каменной соли с подготовленной в нем одной техногенной пустотой круглого сечения, чтобы отношение площади образца к площади пустоты составляло 50/50%;
- образец каменной соли с подготовленными в нем техногенными пустотами круглого сечения в количестве 4-х штук, чтобы отношение площади образца к площади пустоты составляло 50/50%;
- образец каменной соли с подготовленными в нем техногенными пустотами круглого сечения в количестве 6-ти штук, чтобы отношение площади образца к площади пустоты составляло 50/50%;
- серия испытания образцов, согласно указанным п/п 1—6, повторяется с изменением отношения площади техногенной пустоты и каменной соли 75/25%.

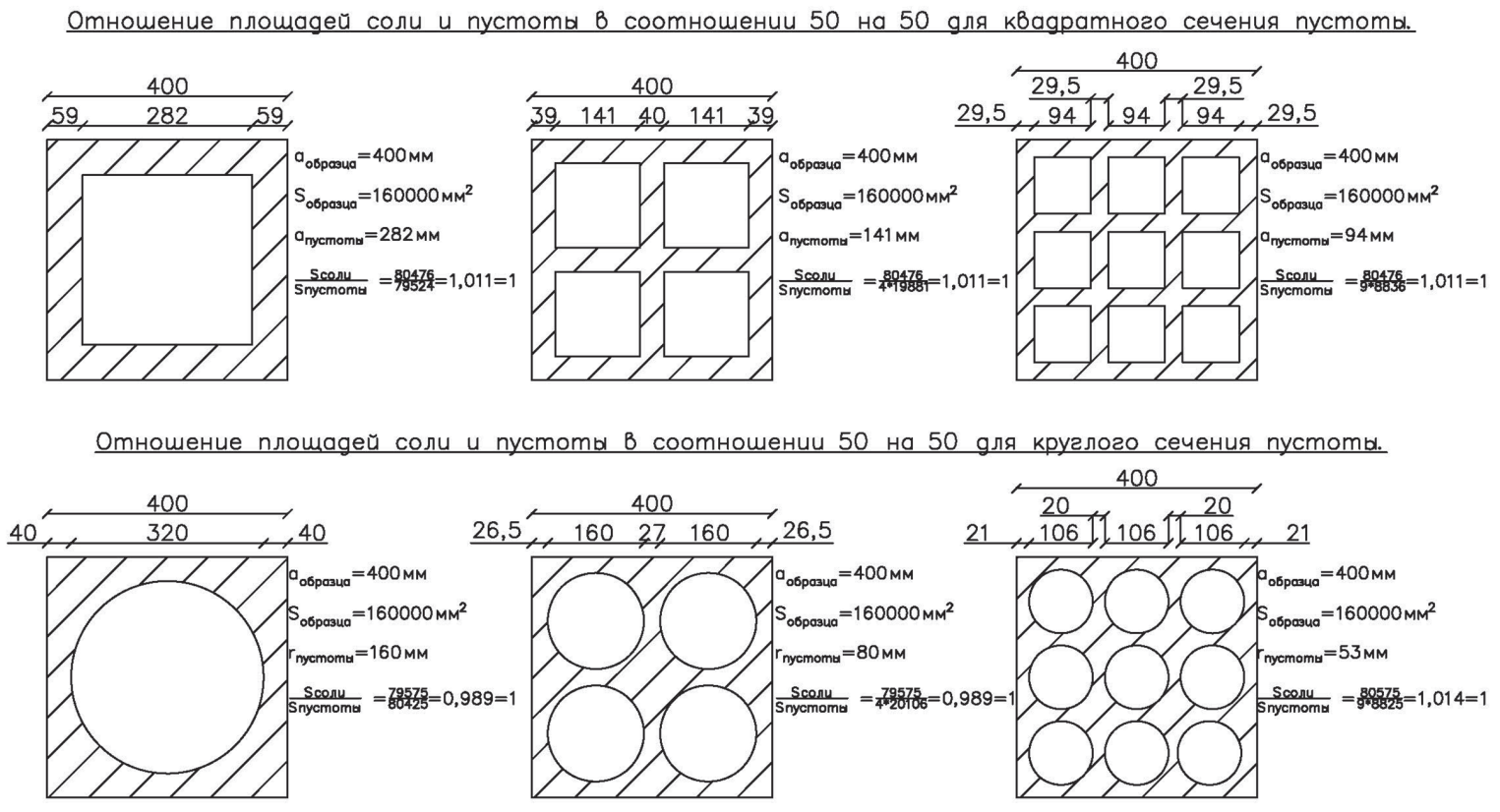


Рис. 3. Геометрические параметры образцов с соотношением площадей техногенных пустот и соли 50:50
Fig. 3. Geometrical parameters of samples at mined-out area to rock salt ratio of 50:50

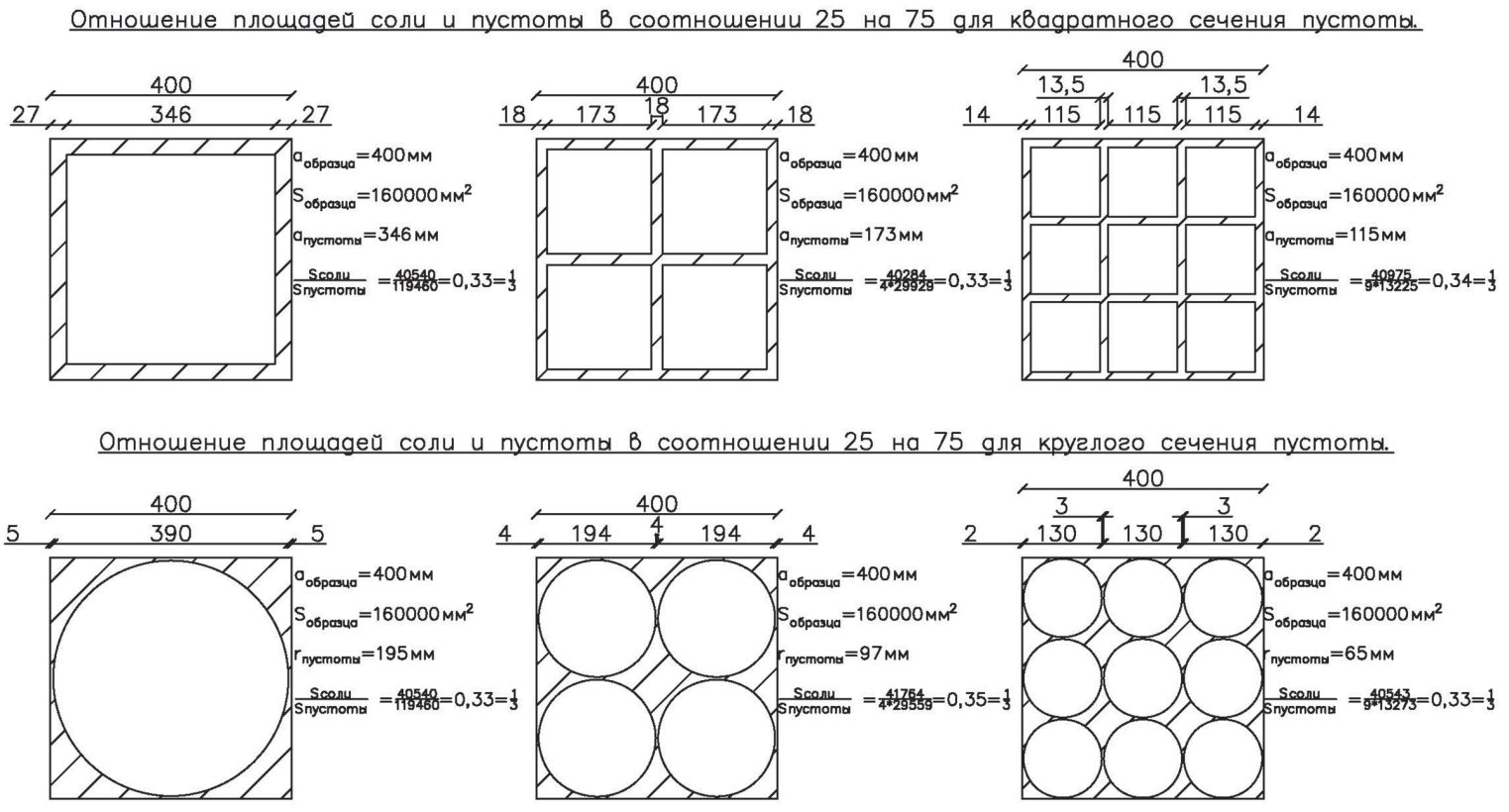


Рис. 4. Геометрические параметры образцов с соотношением площадей техногенных пустот и соли 25:75
Fig. 4. Geometrical parameters of samples at mined-out area to rock salt ratio of 25:75

Плотность вещества в каждой конструкции определялась расчетом, а предел прочности измеряется по результатам испытаний каждого образца гидравлическим прессом П-125 (рис. 5). Пресс предназначен для статических испытаний стандартных образцов горных пород на сжатие с усилием 125 тс и представляет собой установку, состоящую из нагружающего устройства и пульта управления (табл. 2).

В научно-исследовательском центре «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСиС» в рамках выполнения работ по проекту Российского научного фонда создан комплексный стенд для проведения физического и оптического моделирования геомеханических процессов в полях напряжений при разработке месторождений различных геологических типов новыми горными технологиями, который включает гидравлический пресс П-125.

Для контроля за зонами деформирования и разрушения конструктивных элементов физических моделей применяется преобразователь акустической эмиссии «A-Line DDM-1» (далее АЭ), который включает многоканальные модульные системы сбора и обработки АЭ информации распределенного типа с последова-

Таблица 2

Технические характеристики гидравлического пресса П-125
Specification of hydraulic press P-125

Точность измерений, начиная с 20% от предельной нагрузки	%	±2% от изм. нагрузки
Предельная нагрузка: 1-й диапазон 2-й диапазон	 кгс кгс	 50 000 125 000
Габаритные размеры: длина ширина высота вес	 мм мм мм кг	 2320 840 2340 1950
Пресс тип		двухколонный вертикальный
Скорость движения плунжера рабочего цилиндра	мм/мин	0—20
Наибольшее расстояние между опорными плитами	мм	700
Размеры опорных плит	мм	440×440
Электродвигатель траверсы: тип мощность напряжение число оборотов роторов	 кВт В об/мин	 АОЛ-22-6 1,1 220/380 930
Тип насоса производительность	 л/мин	Н-400Б 5,2
Электродвигатель насоса: тип мощность напряжение число оборотов роторов	 кВт В об/мин	 АО2-41-6 3,0 220/380 960



Рис. 5. Гидравлический пресс П-125
Fig. 5. Hydraulic press P-125



Рис. 6. Преобразователь акустической эмиссии GT200
Fig. 6. Acoustic emission transducer GT200

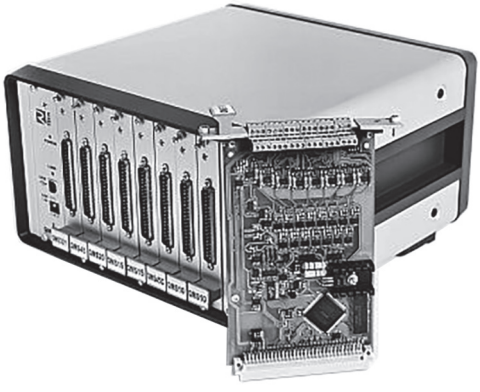


Рис. 7. Крейтовая система сбора данных QMBox
Fig. 7. Crate data acquisition system QMBox

тельным высокоскоростным цифровым каналом передачи данных. Оборудование внесено в реестр средств измерений Российской Федерации. АЭ комплексы данной серии состоят из центрального компьютера (блок сбора и обработки данных) и нескольких измерительных линий, объединяющих последовательно соединенные модули сбора и обработки АЭ информации (модули АЭ).

Усиление АЭ сигналов, фильтрация, оцифровка, регистрация, последующая цифровая обработка и определение параметров АЭ производится в модуле АЭ, который располагается рядом с преобразователем акустической эмиссии непосредственно на объекте контроля [19—21].

В базовую комплектацию комплекса входят:

- блок сбора и обработки данных в исполнении Ethernet Box — предназначен для совместного использования с любыми компьютерами (ноутбуками);
- модуль ALM-01 с магнитным держателем;
- преобразователь акустической эмиссии GT200 (рис. 6);
- магнитный держатель ПАЭ;

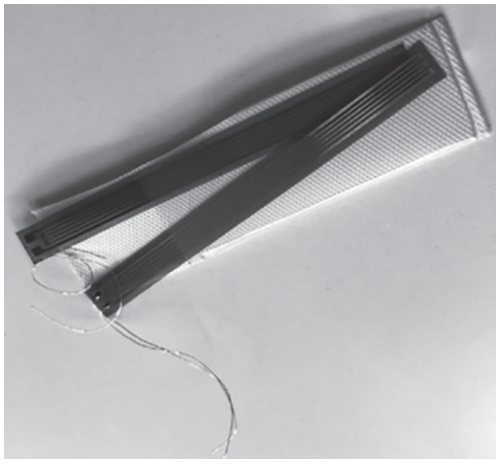


Рис. 8. Тензорезисторы фольговые константановые одиночные
Fig. 8. Single foil constant strain gages

• кабель типа UTP (70 и 30 м) на катушке;

• терминатор линии (концевая заглушка);

• ноутбук;

• программное обеспечение.

Для решения задач автоматизации лабораторной установки используется крейтовая система сбора данных QMBox (рис. 7), которая позволяет осуществлять многоканальные измерения, ввод/вывод аналоговых и дискретных сигналов. Для ввода данных с термопар, терморезисторов, тензомостов и других датчиков в составе системы имеются специализированные АЦП, позволяющие осуществлять сбор данных. Для проведения измерений используются тензорезисторы фольговые ФК (рис. 8).

Выводы

Разработана методика лабораторных исследований образцов горных пород на влияние формы, расположения и размеров техногенных пустот для условий разработки сотовых горных конструкций и в целом моделей конвергентных горных технологий. Обосновано применение оборудования для проведения экспериментов: гидравлический пресс П-125; преобразователь акустической эмиссии «A-Line DDM-1»; крейтовая система сбора данных QMBox; тензорезисторы фольговые ФК и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ковальчук М. В.*, *Нарайкин О. С.* Природоподобные технологии — новые возможности и новые угрозы // Индекс безопасности. — 2017. — № 3—4 (118—119). — Т. 22. — С. 103—108.

2. *Еременко В. А.*, *Гахова Л. Н.*, *Семенякин Е. Н.* Формирование зон концентрации напряжений и динамических явлений при отработке рудных тел Таштагольского месторождения на больших глубинах // ФТПРПИ. — 2012. — № 2. — С. 80—87.

3. *Еременко В. А.*, *Гахова Л. Н.*, *Есина Е. Н.*, *Зинченко Д. Н.* Особенности геомеханического обеспечения освоения глубокозалегающих железорудных месторождений // Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 74—78.

4. *Еременко В. А.*, *Барнов Н. Г.*, *Кондратенко А. С.*, *Тимонин В. В.* Способ разработки крутопадающих маломощных жильных месторождений // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 45—50.

5. *Лушников В. Н.*, *Сэнди М. П.*, *Еременко В. А.*, *Коваленко А. А.*, *Иванов И. А.* Методика определения зоны распространения повреждения породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования // Горный журнал. — 2013. — № 12. — С. 11—16.

6. *Zou L.*, *Tarasov B. G.*, *Dyskin A. V.*, *Adchikary D. P.*, *Pasternak E., Xu W.* Physical Modelling of Stress-dependent Permeability in Fractured Rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2013. Vol. 4. pp. 67—81.

7. *Kong L., Ostadhassan M., Li C., Tamimi N.* Rock Physics and geomechanics of 3D printed Rocks / ARMA 51st U.S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA, 2017, pp. 1—8.

8. *Gell E. M.*, Walley S. M, *Braithwaite C. H.* Review of the Validity of the Use of Artificial Specimens for Characterizing the Mechanical Properties of Rocks. Rock Mechanics and rock Engineering, 2019, no. 3, pp. 1—13.

9. *Трубецкой К. Н.*, *Галченко Ю. П.*, *Бурцев Л. И.* Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества. — М.: Научтехлитиздат, 2003. — 262 с.

10. *Трубецкой К. Н.*, *Галченко Ю. П.* Геоэкология освоения недр и экотехнологии разработки месторождений. — М.: Научтехлитиздат, 2015. — 360 с.

11. *Трубецкой К. Н.*, *Мясков А. В.*, *Галченко Ю. П.*, *Еременко В. А.* Обоснование и создание конвергентных горных технологий подземной разработки мощных месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. — 2019. — № 5. — С. 6—13.

12. *Воронкович И. А.* Особенности структуры проксимального эпифиза большеберцовой кости и эффективность фиксации отломков импрессионной зоны оскольчатых переломов мы-

щелков большеберцовой кости (экспериментальные исследования) // Травматология и ортопедия России. — 2013. — № 3 (69). — С. 57—63.

13. *Сахно Н.В.* Методика определения прочности костей животных с использованием испытательных машин // Сельскохозяйственная биология. — 2008. — № 6. — С. 122—126.

14. *Акулич А.Ю.*, *Денисов А.С.*, *Акулич Ю.В.* Предоперационное определение прочности губчатой кости головки бедра in vivo // Пермский медицинский журнал. — 2006. — Т. 23. № 5. — С. 6—12.

15. *Сулгаков В.А.* Проектирование сжатых трехслойных конструкций минимального веса с учетом конструктивно-технологических ограничений // Ученые записки ЦАГИ. — 1974. — Т. V. — № 1. — С.66—76.

16. *Ендогур А.И.*, *Вайнберг М.В.*, *Иерусалимский К.М.* Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. — М.: Машиностроение, 1986. — 200 с.

17. *Кирпичев М.В.* Теория подобия. — М.: АН СССР, 1953. — 96 с.

18. *Покровский Г.И.*, *Федоров И.С.* Центробежное моделирование для решения инженерных задач. — М.: Гос. из-во литературы по строительству и архитектуре, 1953.

19. *Zi-long Zhou, Jing Zhou, Long-jun Dong, Xin Cai, Yi-chao Rui, Chang-tao Ke.* Experimental study on the location of an acoustic emission source considering refraction in different media. London N1 9XW, England. Nature Publishing Group, Macmillan Bulding. 2017. Vol. 7. No 7472.

20. *Du K., Tao M., Li X.B., Zhou J.* Experimental Study of Slabbing and Rockburst Induced by True-Triaxial Unloading and Local Dynamic Disturbance[J] // Rock Mechanics & Rock Engineering. 2016, pp. 1—17.

21. *Cuadra J., Vanniamparambil P.A., Servansky D., Kontsos A., Bartoli I.* Acoustic Emission Source modeling using a data driven approach // Academic Press. Journal of sound and vibration. 2015. Vol. 341, pp. 222—236. ГИАБ

REFERENCES

1. Koval'chuk M.V., Naraykin O.S. Nature-like technologies—New capacities and new risks. Indeks bezopasnosti. *Indeks bezopasnosti*, 2017, no 3—4 (118—119). Vol. 22, pp. 103—108. [In Russ].

2. Eremenko V.A., Gakhova L.N., Semenyakin E.N. Formation of higher stress zones and clusters of seismic events in deep mining in Tashtagol. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2012, no 2, pp. 80—87. [In Russ].

3. Eremenko V.A., Gakhova L.N., Esina E.N., Zinchenko D.N. Geomechanical support of deep-level ore mining. *Gornyy zhurnal*. 2014, no 5, pp. 74—78. [In Russ].

4. Eremenko V.A., Barnov N.G., Kondratenko A.S., Timonin V.V. Method for mining steeply dipping thin lodes. *Gornyy zhurnal*. 2016, no 12, pp. 45—50. [In Russ].

5. Lushnikov V.N., Sendi M.P., Eremenko V.A., Kovalenko A.A., Ivanov I.A. Determination procedure for damaged zone extent in rock mass around rooms and tunnels by numerical modeling. *Gornyy zhurnal*. 2013, no 12, pp. 11—16.

6. Zou L., Tarasov B.G., Dyskin A.V., Adchikary D.P., Pasternak E., Xu W. Physical modelling of stress-dependent permeability in fractured rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2013. Vol. 4. pp. 67—81.

7. Kong L., Ostadhassan M., Li C., Tamimi N. Rock physics and geomechanics of 3D printed Rocks. *ARMA 51st U.S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium*, San Francisco, California, USA, 2017, pp. 1—8.

8. Gell E.M., Walley S. M, Braithwaite C.H. Review of the Validity of the Use of Artificial Specimens for Characterizing the Mechanical Properties of Rocks. *Rock Mechanics and rock Engineering*, 2019, no. 3, pp. 1—13.

9. Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P., Burtsev L.I. *Ekologicheskie problemy osvoeniya nedr pri ustoychivom razvitii prirody i obshchestva* [Environmental concerns in subsoil management subject to sustainable development of the nature and society], Moscow, Nauchtekhlitizdat, 2003, 262 p.

10. Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P. *Geoekologiya osvoeniya nedr i ekotekhnologii razrabotki mestorozhdeniy* [Subsoil use geoecology and ecotechnologies of mineral mining], Moscow, Nauchtekhlitizdat, 2015, 360 p.

11. Trubetskoy K. N., Myaskov A. V., Galchenko Yu.P., Eremenko V. A. Creation and justification of convergent technologies for underground mining of thick solid mineral deposits. *Gornyy zhurnal*, 2019, no 5, pp. 6—13 [In Russ].

12. Voronkovich I. A. Structural features of proximal epiphysis of shin bone and efficient anchorage of fragments in depressed zone of comminuted fractures of the shin bone condyles (experimental research). *Travmatologiya i ortopediya Rossii*. 2013, no 3 (69), pp. 57—63. [In Russ].

13. Sakhno N. V. Method of determination of bone strength in animals with use of testing machine. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*. 2008, no 6, pp. 122—126. [In Russ].

14. Akulich A. Yu., Denisov A. S., Akulich Yu. V. Preoperational strength test of spongy whirlbone in vivo. *Permskiy meditsinskiy zhurnal*. 2006. Vol. 23, no 5, pp. 6—12. [In Russ].

15. Sulgakov V. A. Engineering compressed three-layer structures of minimum weight with regard to design and technological constraints. *Uchenye zapiski TsAGI*. 1974. Vol. V, no 1, pp. 66—76. [In Russ].

16. Endogur A. I., Vaynberg M. V., Ierusalimskiy K. M. *Sotovye konstruktsii. Vybor parametrov i proektirovanie* [Honeycomb structures. Parameter selection and design], Moscow, Mashinostroenie, 1986, 200 p.

17. Kirpichev M. V. *Teoriya podobiya* [Theory of similitude], Moscow, AN SSSR, 1953, 96 p.

18. Pokrovskiy G. I., Fedorov I. S. *Tsentrobezhnoe modelirovanie dlya resheniya inzhenernykh zadach* [Centrifugal modeling for engineering problem solution], Moscow, 1953.

19. Zi-long Zhou, Jing Zhou, Long-jun Dong, Xin Cai, Yi-chao Rui, Chang-tao Ke. *Experimental study on the location of an acoustic emission source considering refraction in different media*. London N1 9XW, England. Nature Publishing Group, Macmillan Bulding. 2017. Vol. 7. No 7472.

20. Du K., Tao M., Li X. B., Zhou J. Experimental Study of Slabbing and Rockburst Induced by True-Triaxial Unloading and Local Dynamic Disturbance [J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*. 2016, pp. 1—17.

21. Cuadra J., Vanniamparambil P. A., Servansky D., Kontsos A., Bartoli I. Acoustic Emission Source modeling using a data driven approach. Academic Press. *Journal of sound and vibration*. 2015. Vol. 341, pp. 222—236.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галченко Юрий Павлович[1] — д-р техн. наук, профессор, эксперт, e-mail: schtrek33@mail.ru,
Лейзер Владислав Игоревич[1] — лаборант, e-mail: vlad.leizer@yandex.ru,
Высотин Николай Геннадьевич[1] — ассистент, e-mail: kalgani@yandex.ru,
Якушева Екатерина Дмитриевна[1] — инженер, e-mail: yakusheva-ed@mail.ru,
[1] МГИ НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Галченко Ю.П., e-mail: schtrek33@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.P. Galchenko[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Expert, e-mail: schtrek33@mail.ru,
V.I. Leizer[1], Laboratory Technician, e-mail: vlad.leizer@yandex.ru,
N.G. Vysotin[1], Assistant, e-mail: kalgani@yandex.ru,
E.D. Yakusheva[1], Engineer, e-mail: yakusheva-ed@mail.ru,
[1] Mining Institute,
National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: Yu.P. Galchenko, e-mail: schtrek33@mail.ru.