ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(12):54-64
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831; 622,2; 622.235 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-54-64

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КАРКАСНЫХ И СОТОВЫХ ГОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.И. Лейзер[1], Н.Г. Высотин[1], М.А. Косырева[1], С.С. Шерматова[1]

[1] ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: prof.eremenko@gmail.com

Аннотация: Представлена методика и результаты проведения экспериментальных исследований акустических и прочностных характеристик физических моделей каркасных и сотовых горных конструкций, разрабатываемых в научно-исследовательском центре «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСиС». Выполненные экспериментальные исследования свидетельствуют о перспективности использования для изучения геомеханических процессов при разработке параметров природоподобных горных технологий физических моделей каркасных и сотовых горных конструкций. Физические модели позволяют выполнять исследования в широком диапазоне исходного напряженного состояния массива и свойств эквивалентных материалов. Проведены измерения поля скоростей распространения упругих волн в физических моделях в процессе их разрушения. Разработаны типовые варианты физических моделей каркасных и сотовых горных конструкций. Установлено, что в моделях сотовых горных конструкций наиболее устойчивыми являются системы с большим количеством пустот круглой формы и меньшим их диаметром. Исследование методами физического моделирования позволило рассчитать устойчивые параметры конструктивных элементов разрабатываемых систем, выявить их слабые места, определить направления, пути, дальнейшие шаги создания природоподобных горных технологий и приступить к конструкторской и проектной работе.

Ключевые слова: каркасные и сотовые горные конструкции, системы разработки, физическая модель, предел прочности, деформация, акустический сигнал, эквивалентный геоматериал, комплексный стенд, 3D моделирование, система трещин, шероховатость поверхности стенок трещин, индекс *Q*.

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

Для цитирования: *Лейзер В.И., Высотин Н.Г., Косырева М.А., Шерматова С.С.* Исследование акустических характеристик физических моделей каркасных и сотовых горных конструкций // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 12. – С. 54–64. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-54-64.

Acoustic and strength properties of physical models of frame and honeycomb mine structures

V.I. Leizer[1], N.G. Vysotin[1], M.A. Kosyreva[1], S.S. Shermatova[1]

[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: prof.eremenko@gmail.com

© В.И. Лейзер, Н.Г. Высотин, М.А. Косырева, С.С. Шерматова. 2020.

Abstract: The article presents the experimental procedure and the results on acoustic and strength properties of physical models of frame and honeycomb underground structures designed at the Research Center for Applied Geomechanics and Convergent Technologies in Mining at NUST MISIS College of Mining. The implemented studies prove efficiency of physical models of frame and honeycomb mine structures in geomechanical studies in nature-like mining technologies. The physical modeling allows studies within a wide range of natural stress state and properties of equivalent materials. Elastic wave velocity measurements are performed on the physical models subjected to fracture. The standard variants of physical models of frame and honeycomb mine structures are developed. It is found that in the honeycomb mine structure models, the highest stability is demonstrated by systems represented by more number of circular voids of smaller diameter. The physical simulation approach has made it possible to calculate stable structural design parameters for the discussed systems, to reveal trouble spots, to identify potential avenues and stages of development of nature-like mining technologies, and, finally, to start a design project.

Key words: frame and honeycomb underground structures, mining systems, physical model, limit strength, deformation, acoustic signal, equivalent geomaterial, comprehensive testing installation, 3D modeling, joint system, joint roughness, Q index.

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

For citation: Leizer V. I., Vysotin N. G., Kosyreva M. A., Shermatova S. S. Acoustic and strength properties of physical models of frame and honeycomb mine structures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(12):54-64. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-54-64.

Введение

Одним из основных этапов разработки природоподобных горных технологий является физическое моделирование процессов, возникающих в конструктивных элементах моделей при их разрушении.

Для изучения процессов формирования и развития вторичного поля напряжений при подземной разработке рудных месторождений [1 – 6] были определены акустические, прочностные и деформационные характеристики разрабатываемых каркасных и сотовых горных конструкций на учебной научно-производственной базе «Теплый Стан» НИТУ «МИСиС» в соответствии с программой фундаментальных исследований в рамках реализации проекта Российского научного фонда.

Для исследования акустических свойств деформируемых и разрушаемых физических моделей горных конструкций был использован эффект акустической эмиссии. Суть акустико-эмиссионного (АЭ) метода заключается в регистрации акустических волн в процессе деформирования моделей под нагрузкой, развития в них трещин и их систем. Метод АЭ позволяет регистрировать изменение свойств, в том числе прочностных и деформационных, и состояние горных пород или эквивалентного геоматериала за счет изучения скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн.

Материалы и методы

Плотность эквивалентного геоматериала, из которого созданы физические модели каркасных и сотовых горных конструкций, определялась расчетом, а предел прочности получен по результатам стандартных испытаний каждой модели на гидравлическом прессе П-125, предназначенном для статических ис-

Свойства и состав эквивалентного материала
Properties and composition of equivalent material

Предел прочности на сжатие, МПа	15 — 19
GSI (геологический индекс прочности) модели	51 — 58
Структурный индекс *mi*	7 — 8
Модуль деформации (Юнга), ГПа	9,8 — 19,6
Сцепление, МПа	0,687 — 0,73
Угол внутреннего трения, град.	25,404 — 27,03
Коэффициент Пуассона	0,165 — 0,25
Водопоглощение геоматериала, %	13 — 16
Постоянная Хука-Брауна *mb*	3,895 — 3,931
Постоянная Хука-Брауна *s*	0,002 — 0,0021
Постоянная Хука-Брауна *a*	0,504 — 0,506
Плотность геоматериала, кг/м^3	1800 — 2000
Воздушная известь молотая негашеная, %	5 — 8
Кварцевый песок немолотый, %	82 — 87
Цемент, %	8 — 10
Вода, %	7

пытаний на сжатие (с усилием 125 тс) стандартных образцов горных пород и физических моделей, и представляющем собой установку, состоящую из нагружающего устройства и пульта управления.

Свойства и состав одного из разработанных эквивалентных материалов, использованных для изготовления конструктивных элементов физических моделей, приведены в таблице. Для оценки НДС модели в предположении упругого поведения массива применялся критерий прочности Хука-Брауна [7 — 11].

Для неразрушающего контроля зон деформирования и разрушения физических моделей использовался измерительный комплекс акустической эмиссии «A-Line DDM-1», включающий многоканальные модульные системы сбора и обработки информации распределенного типа с последовательным высокоскоростным цифровым каналом передачи данных. Комплексы данной серии состоят из центрального компьютера (блок сбора и обработки данных) и нескольких измерительных линий, объединяющих последовательно соединенные модули сбора и обработки информации. Усиление сигналов, фильтрация, оцифровка, регистрация, последующая цифровая обработка и определение параметров акустической эмиссии производились в модуле, располагающемся рядом с преобразователем акустической эмиссии непосредственно на объекте контроля.

В базовую комплектацию комплекса «A-Line DDM-1» входят: блок сбора и обработки данных в исполнении Ethernet Box, предназначенный для совместного использования с любыми компьютерами; модуль ALM-01 с магнитным держателем; преобразователь акустической эмиссии GT200; магнитный держатель ПАЭ; кабель типа UTP (70 и 30 м) на катушке; терминатор линии (концевая заглушка); ноутбук и программное обеспечение.

Для решения задач автоматизации лабораторной установки использовалась крейтовая система сбора данных QMBox

(рис. 1), позволяющая осуществлять многоканальные измерения, ввод/вывод аналоговых и дискретных сигналов; для ввода данных с термопар, терморезисторов, тензомостов и других датчиков в составе системы использовались специализированные аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

Для изучения акустических характеристик, исходя из целей и задач физического моделирования каркасной и сотовой горных конструкций, было создано 4 типа физических моделей каркасной конструкции (рис. 2, 3), которая позволила выявить оптимальные геометрические параметры при сохранении оптимального предела прочности конструкции, и 12 типов физических моделей сотовых конструкций (рис. 4). Внешние размеры физических моделей — 200×200×200 мм, объем — 8 000 000 мм^3.

Каждая модель каркасной системы имеет четыре камеры квадратного сечения.

Для центрального горизонтального сечения модели каркасной горной конструкции (рис. 2) варьировались: $t_с$ — толщина ограждающей каркасной конструкции, мм; $t_п$ — толщина разделительной каркасной конструкции, мм; $S_{к1}$ — площадь каркаса и переборок, мм^2; $S_{к2}$ — площадь 4 отработанных камер, мм^2; $S_м$ — площадь модели, мм^2; $K_1 = S_{к1} / S_м$ — доля запасов руды на участках сооружения будущего каркаса; $K_2 = S_{к2} / S_м$ — доля запасов руды из камер.

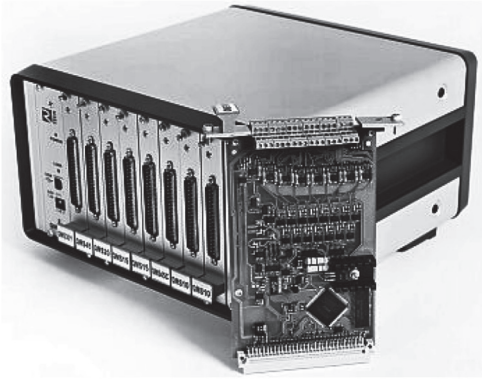

Рис. 1. Крейтовая система сбора данных QMBox
Fig. 1. Crate QMBox data acquisition system

Варианты проведения экспериментов для каркасных горных конструкций:

- Модель 1 (рис. 2, *а*) с подготовленными в ней четырьмя камерами прямоугольного сечения: $t_с = t_п = 30$ мм; $S_{к1} = 27\ 900$ мм^2; $S_{к2} = 12\ 100$ мм^2; $S_м = 40\ 000$ мм^2; $K_1 = S_{к1} / S_м = 0{,}697$; $K_2 = S_{к2} / S_м = 0{,}303$;
- Модель 2 (рис. 2, *б*): $t_с = t_п = 20$ мм; $S_{к1} = 20\ 400$ мм^2; $S_{к2} = 19\ 600$ мм^2; $S_м = 40\ 000$ мм^2; $K_1 = 0{,}7$; $K_2 = 0{,}51$;
- Модель 3 (рис. 2, *в*): $t_с = 30$ мм; $t_п = 20$ мм; $S_{к1} = 25\ 600$ мм^2; $S_{к2} = 14\ 400$ мм^2; $S_м = 40\ 000$ мм^2; $K_1 = 0{,}64$; $K_2 = 0{,}36$;
- Модель 4 (рис. 2, *г*): $t_с = 30$ мм; $t_п = 20$ мм; $S_{к1} = 23\ 100$ мм^2; $S_{к2} = 16\ 900$ мм^2; $S_м = 40\ 000$ мм^2; $K_1 = 0{,}577$; $K_2 = 0{,}423$.

Исходя из целей и задач физического моделирования сотовых горных кон-

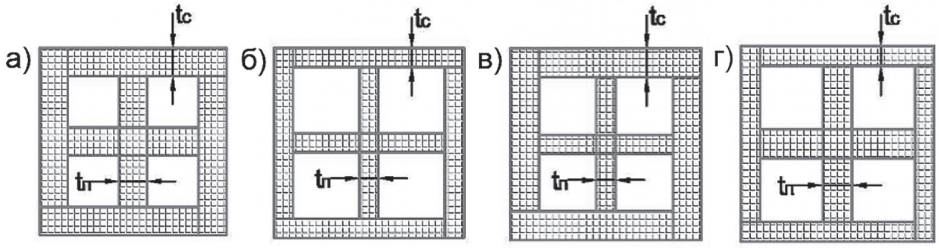

Рис. 2. Геометрические параметры моделей в горизонтальном центральном сечении исследуемой каркасной горной конструкции
Fig. 2. Model geometry in horizontal central cross-section of test frame mine structure

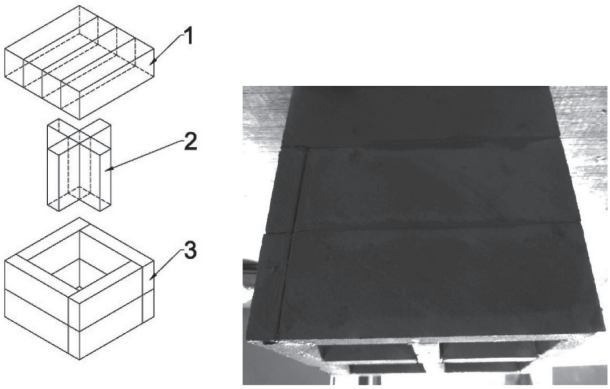

Рис. 3. Внешний вид физической модели 2 (рис. 2, б) каркасной горной конструкции: 1 — горизонтальные ограждающие каркасные конструкции; 2 — разделительные каркасные конструкции; 3 — вертикальные ограждающие каркасные конструкции

Fig. 3. View of physical model 2 (Fig. 2b) of frame mine structure: 1 — horizontal envelope frames; 2–parting frames; 3–vertical envelope frames

струкций, в каждой серии экспериментов испытывались модели с разной формой пустот, их расположением, размерами и комбинациями толщины элементов сотовой системы (рис. 4). Для центрального горизонтального сечения модели (рис. 4) приняты обозначения: $S_{к1}$ — площадь геоматериала в плоскости модели, мм^2; $S_{к2}$ — площадь пустоты в плоскости модели, мм^2; $S_м$ — площадь плоскости модели, мм^2; K — отношение площади пустот к площади геоматериала (в первом варианте испытаний $K \approx 1$, во втором $K > 2$).

Варианты проведения экспериментов для сотовых горных конструкций:

Сценарий 1 (рис. 4, а):

• Модель 1. Физическая модель с одной подготовленной техногенной пустотой прямоугольного сечения: $a_п$ = = 140 мм — ширина грани квадратной камеры в модели; $S_{к1}$ = 20 400 мм^2; $S_{к2}$ = = 19 600; $S_м$ = 40 000 мм^2; K = 0,96;

• Модель 2. Физическая модель с подготовленными в ней техногенными пустотами прямоугольного сечения в количестве 4 штук: $a_п$ = 70 мм — ширина грани 4 квадратных камер в модели; $S_{к1}$ = 20 400 мм^2; $S_{к2}$ = 19 600 мм^2; $S_м$ = = 40 000 мм^2; K = 0,96.

• Модель 3. Физическая модель с подготовленными в ней техногенными

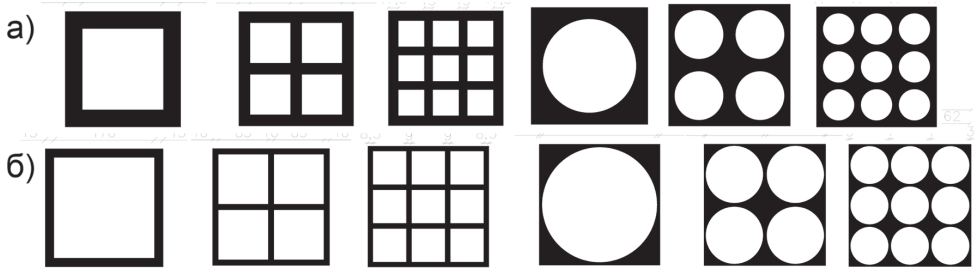

Рис. 4. Геометрические параметры образцов для физического моделирования сотовых горных конструкций с соотношением пустот к геоматериалу K в горизонтальной центральной плоскости модели: в первом варианте испытаний K ≈ 1 (а); во втором K > 2 (б)

Fig. 4. Geometry of specimens for physical modeling of honeycomb mine structure at void/geomaterial ratio K in horizontal central plane: (a) first test scenario — K ≈ 1; (b) second test scenario — K > 2

пустотами прямоугольного сечения в количестве 6 штук: $a_п$ = 70 мм — ширина грани 4 квадратных камер в модели; $S_{к1}$ = 21 775 мм^2; $S_{к2}$ = 18 225 мм^2; $S_м$ = = 40 000 мм^2; K = 0,84.

• Модель 4. Физическая модель с подготовленной в ней одной техногенной пустотой круглого сечения: $d_п$ = = 160 мм — диаметр круглой камеры в модели; $S_{к1}$ = 19 890 мм^2; $S_{к2}$ = 20 110 мм^2; $S_м$ = 40 000 мм^2; K = 0,989.

• Модель 5. Физическая модель с подготовленными в ней техногенными пустотами круглого сечения в количестве 4 штук: $d_п$ = 40 мм — диаметр 4 круглых камер в модели; $S_{к1}$ = 19 890 мм^2; $S_{к2}$ = 20 110 мм^2; $S_м$ = 40 000 мм^2; K = 0,989.

• Модель 6. Физическая модель с подготовленными в ней техногенными пустотами круглого сечения в количестве 6 штук; $d_п$ = 40 мм — диаметр 6 круглых камер в модели; $S_{к1}$ = 19 890 мм^2; $S_{к2}$ = 20 110 мм^2; $S_м$ = 40 000 мм^2; K = 0,989.

Серия испытаний образцов повторяется с изменением отношения площади техногенной пустоты и геоматериала.

Сценарий 2 (рис. 4, б).

Ширина граней $a_п$ при квадратном сечении камер изменялась в моделях: 1 — 170 мм, 2 — 85 мм, 3 — 85 мм; при круглом сечении камер, соответственно, 4 — 190 мм, 5 — 94 мм, 6 — 62 мм. Соотношение площадей пустот к геоматериалу K изменилось в моделях: 1 — 2,63; 2 — 2,63; 3 — 2,18; при круглом сечении камер: 4 — 2,44; 5 — 2,27, 6 — 2,13.

Каждый эксперимент состоял из двух параллельных действий [12]:

• разрушение физической модели на прессе П-125 путем одноосного сжатия, при этом программой управления формируется диаграмма деформирования;

• неразрушающий контроль физической модели с использованием метода АЭ.

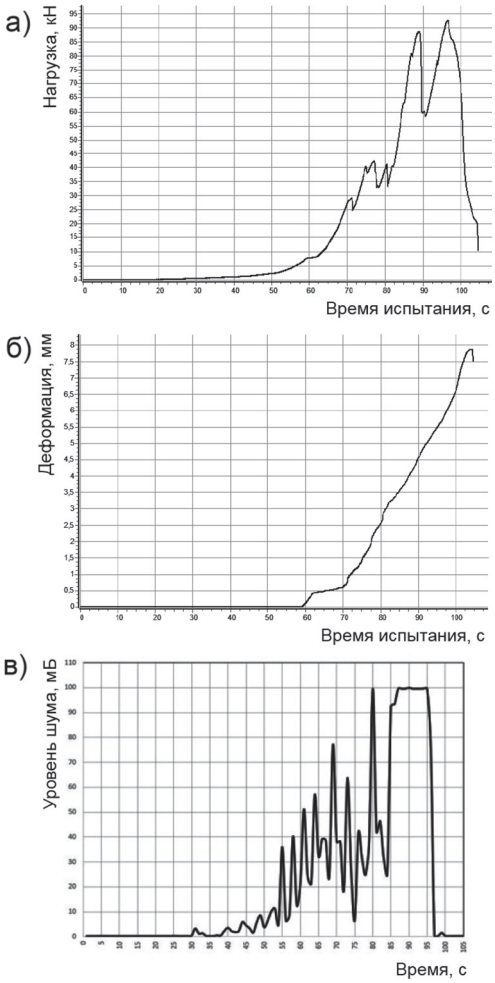

Рис. 5. Результаты испытания физической модели 4 каркасной горной конструкции (рис. 2, г): прочностные (а); деформационные (б) и акустические (в) характеристики

Fig. 5. Test results of physical model 4 of frame mine structure (Fig. 2d): (a) strength; (b) deformation; (c) acoustic properties

В результате экспериментов были зарегистрированы следующие максимальные показатели разрушения моделей каркасных и сотовых конструкций: нагрузка — 186,542 кН, деформация — 3,754 мм, предел прочности — 4,664 МПа, относительное удлинение модели — 1,925%, уровень шума при разрушении модели — 101,18 мВ; минимальные по-

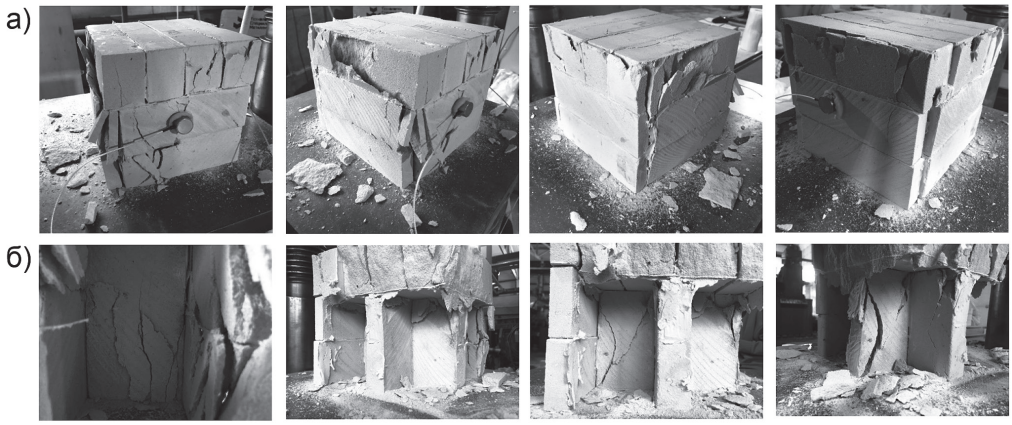

Рис. 6. Разрушение физической модели каркасной системы при одноосном нагружении: вид с внешней стороны граней каркаса (а); вид на системы трещин образованных на внутренних конструктивных элементах модели (переборках) (б)

Fig. 6. Fracture of physical model of frame mine structure under uniaxial loading: (a) external view; (b) joint systems in internal structural elements of the models (partings)

казатели: 87,84 кН, 7,394 мм, 2,196 МПа, 3,974 % и 99,76 мВ соответственно.

На рис. 5 в качестве примера приведены графики прочностных, деформационных и акустических характеристик физической модели 4 каркасной системы (рис. 2, *г*).

На рис. 6 представлен один из результатов испытания физической модели на этапе разрушения: время 125 с; нагрузка — падение со 180 до 130 кН; деформации 5,41 мм; уровень шума 69,90 мВ.

Обсуждение результатов экспериментов

Обсуждение результатов представлено описанием этапов экспериментальных исследований на физической модели каркасной конструкции из эквивалентного геоматериала для различных вариантов остаточной несущей способности относительно полученного предела прочности на одноосное сжатие. Время проведения эксперимента от его начала до полного разрушения породы — 105 с, начало развития трещин началось с 60-й секунды:

1. Нагружение образца с 0 до 60 с, рост нагрузки с 0 до 8 кН, максимальный уровень шума акустической эмиссии — 50 мВ, что сопоставимо с 16,99 дБ. Такой уровень шума по шкале сравним с шелестом листьев. Начинается разрыв связей на микроуровне, визуального развития трещин не наблюдается.

2. Начало развития трещин в кровле образца физической модели, резкий скачок деформаций с 0 до 0,5 мм, нагрузка неизменна и равняется 8 кН, наблюдается площадка текучести, переход от упругих к пластическим деформациям.

3. Развитие трещины вдоль всей боковой части кровли, начало отколов эквивалентного геоматериала, активное разрушение, высокая акустическая активность характеризуется разрушением связей и развитием трещины.

4. Полное разрушение боковой части кровли, развитие трещины перешло на боковые стенки испытуемой физической модели. Резкое падение нагрузки с 90 до 60 кН характеризуется разрушением кровли образца, боковых стенок и неспособностью сопротивляться нагрузке (нагрузку на себя принимают неразру-

шенные переборки). Начало разрушения внутренних конструкций модели.

5. Полное разрушение образца, зафиксирована максимальная нагрузка 92,7 кН, максимальная акустическая активность наблюдалась в течении 5 с, что характеризуется активным разрушением конструктивных элементов физической модели.

6. Зафиксировано максимальное значение деформации, резкое падение нагрузки характеризуется полным разрушением и неспособностью исследуемой модели сопротивляться нагрузкам. Акустическая активность отсутствует, все связи исследуемой физической модели разрушены.

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет отметить следующее: соотношение площадей геоматериала и пустот (камер) в моделях влияет на их прочностные характеристики — чем больше площадь геоматериала в модели, тем большее сопротивление она оказывает внешним нагрузкам; размеры каркаса по отношению к размерам внутрикаркасных целиков (переборок) оказывает влияние на прочностные характеристики моделей — чем больше толщина каркаса и меньше переборок, а не наоборот, тем выше сопротивляемость модели внешним нагрузкам; при одинаковом соотношении площадей геоматериала и пустот (камер) в моделях сотовых горных конструкций наибольшее сопротивление внешним нагрузкам отмечается в модели с большим количеством пустот (камер круглого сечения) и меньшим их диаметром; сравнение форм сечения камер указывает на то, что круглая форма способствует увеличению сопротивляемости модели внешним нагрузкам на 23—45% при различных количествах камер и условиях исходного напряженного состояния модели; прочность моделей без пустот в 1,9—10,5 раза выше, чем при наличии камер при различных вариантах исходного поля напряжений; наиболее положительные прочностные и одновременно горно-технические характеристики показали каркасная модель 3 и сотовая модель с 9 камерами при различных соотношениях площадей геоматериала и камер и при литостатическом исходном напряженном состояниии модели.

Заключение

Физическое моделирование, обеспечивающее высокую степень схематизации существующих и разрабатываемых каркасных и сотовых горных конструкций, позволило изучать геомеханические процессы, существенно облегчило интерпретацию результатов экспериментов и их сравнение с натурными данными, полученными в шахтных условиях, определять механизмы разрушения конструктивных элементов моделей горных конструкций, предельные нагрузки и их влияние при различных вариантах исходного напряженного состояния массива.

Моделирование на эквивалентных геоматериалах позволило с большей степенью детальности проследить геомеханические процессы, развивающиеся в толще пород, особенно процессы деформирования пород с разрывом сплошности. При выполнении эксперимента с одноосным сжатием проводилась замедленная съемка процесса разрушения со скоростью 240 кадров/с. Установлен характер разрушения моделей с визуализацией систем трещин.

В основном модели, как и образцы горных пород, разрушаются под теми же углами, что и массив горных пород в естественных условиях (в шахтах). Образующиеся при действии вертикальной нагрузки трещины в некоторых участках моделей объединяются, как правило, с имеющимися трещинами и их системами.

Для физических моделей разрабатываемых каркасных и сотовых горных конструкций, изготовленных из эквивалентного геоматериала с заданными свойствами, получены прочностные, деформационные и акустические характеристики моделей. Установление связи между характеристиками необходимо с практической точки зрения, это позволяет оценивать устойчивость горных конструкций. Исследование процесса и характера влияния вторичного поля напряжений на конструктивные элементы создаваемых каркасных и сотовых горных конструкций при проведении физического моделирования позволило определить направления, пути и дальнейшие шаги создания природоподобных горных технологий, выявить слабые места систем и приступить к дальнейшей конструкторской и проектной работе, рассчитать устойчивые параметры конструктивных элементов разрабатываемых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. DOI: 10.17580/gzh.2019.05.01.

2. *Еременко В. А.*, *Галченко Ю. П.*, *Косырева М. А.* Оценка влияния геометрических параметров традиционно применяемых и природоподобных систем подземной разработки рудных месторождений на исходное поле напряжений // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 98—109.

3. *Trubetskoy K. N.*, Galchenko Yu. P. Nature like mining technologies: Prospect of resolving global contradictions when developing mineral resources of the lithosphere // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017, Vol. 87, No. 4. — P. 378 — 384.

4. *Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., Vysotin N. G.* Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining // Eurasian mining. 2020. No 1. Pp. 3—7. DOI: 10.17580/em.2020.01.02.

5. *Sidorov D., Ponomarenko T.* Reduction of the ore losses emerging within the deep mining of bauxite deposits at the mines of OJSC «Sevuralboksitruda» // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. No 302. Pp. 1—8. DOI: 10.1088/1755-1315/302/1/012051.

6. *Серяков В. М.*, *Риб С. В.*, *Басов В. В.*, *Фрянов В. Н.* Геомеханическое обоснование параметров технологии отработки угольных пластов в зоне взаимовлияния очистного пространства и передовой выработки // ФТПРПИ. — 2018. — № 6. — С. 21—29.

7. *Hoek E.*, *Brown E. T.* Underground excavations in rock. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.

8. *Fairhurst C.*, *Cook N. G. W.* The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighbourhood of a surface / Proceedings of 1st ISRM Congress of the International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, Lisbon, Sept. 25 — Oct. 1. 1966. Vol. 1. Pp. 687—692.

9. *Jiang Q., Feng X., Song L., Gong Y., Zheg H., Cui J.* Modeling rockspecimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects // Acta Mechanica Sinica. 2015. Vol. 32. No 1. Pp. 524—535.

10. *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. Conference Paper. 2017, pp. 1—8.

11. *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.

12. *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. ГИАБ

REFERENCES

1. 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. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no 5, pp. 6–13. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.05.01.

2. Eremenko V. A., Galchenko Yu. P., Kosyreva M. A. Effect of geometry of conventional and nature-like underground mining systems on natural stress state. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2020, no 3, pp. 98—109. [In Russ].

3. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. P. Nature like mining technologies: Prospect of resolving global contradictions when developing mineral resources of the lithosphere. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2017, Vol. 87, No. 4. P. 378 — 384.

4. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., Vysotin N. G. Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining. *Eurasian mining*. 2020. No 1. Pp. 3—7. DOI: 10.17580/em.2020.01.02.

5. Sidorov D., Ponomarenko T. Reduction of the ore losses emerging within the deep mining of bauxite deposits at the mines of OJSC «Sevuralboksitruda». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. No 302. Pp. 1—8. DOI: 10.1088/1755-1315/302/1/012051.

6. Seryakov V. M., Rib S. V., Basov V. V., Fryanov V. N. Geomechanical justification of technological parameters for coal mine in the mutual influence zone of mined-out area and face in longwalls. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2018, no 6, pp. 21—29. [In Russ].

7. Hoek E., Brown E. T. *Underground excavations in rock*. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.

8. Fairhurst C., Cook N. G. W. The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighbourhood of a surface. *Proceedings of 1st ISRM Congress of the International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*, Lisbon, Sept. 25 — Oct. 1. 1966. Vol. 1. Pp. 687—692.

9. Jiang Q., Feng X., Song L., Gong Y., Zheg H., Cui J. Modeling rockspecimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects. *Acta Mechanica Sinica*. 2015. Vol. 32. No 1. Pp. 524—535.

10. 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*. Conference Paper. 2017, pp. 1—8.

11. 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.

12. 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, no 11, pp. 35—47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-35-47.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лейзер Владислав Игоревич[1] — аспирант,
e-mail: vlad.leizer@yandex.ru,
Высотин Николай Геннадьевич[1] — старший преподаватель,
e-mail: kalgani@yandex.ru,

Косырева Марина Александровна[1] — аспирант,
e-mail: marinkosyreva@gmail.com,
Шерматова Сайера Сидиковна[1] — аспирант,
e-mail: s_shermatova@inbox.ru,
[1] ГИ НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Лейзер В.И., e-mail: prof.eremenko@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.I. Leizer[1], Graduate Student, e-mail: vlad.leizer@yandex.ru,
N.G. Vysotin[1], Senior Lecturer, e-mail: kalgani@yandex.ru,
M.A. Kosyreva[1], Graduate Student,
e-mail: marinkosyreva@gmail.com,
S.S. Shermatova[1], Graduate Student,
e-mail: s_shermatova@inbox.ru,
[1] Mining Institute, National University of Science
and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: V.I. Leizer, e-mail: prof.eremenko@gmail.com.

Получена редакцией 03.09.2020; получена после рецензии 04.11.2020; принята к печати 10.11.2020.
Received by the editors 03.09.2020; received after the review 04.11.2020; accepted for printing 10.11.2020.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ОРГАНИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ АВАРИЙНОГО УЧАСТКА ШАХТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА

(2020, № 10, СВ 32, 12 с.)

Ким Максим Ленсович — главный технолог, АО «СУЭК», e-mail: kimml@suek.ru,
Темкин Игорь Олегович — д-р техн. наук, профессор, НИТУ «МИСИС», e-mail: igortemkin@yandex.ru.

Описана схема информационных потоков в рамках автоматизированной системы анализа состава рудничной атмосферы на аварийном участке в шахте с использованием автономно управляемого БПЛА. Сформулированы две принципиальные задачи, которые должны быть решены для реализации динамического мониторинга распределенных параметров шахтной атмосферы. Обсуждаются основные параметры, которые необходимо контролировать в пред- и пост-аварийный периоды, а также средства контроля, которые целесообразно использовать с учетом ограничений, накладываемых конструкцией БПЛА. Кратко описываются особенности процесса обработки и анализа мониторинговой информации в разрабатываемой автоматизированной системе.

Ключевые слова: шахта, авария, спасатель, система автоматического управления движением, БПЛА.

SOME ASPECTS OF THE ORGANIZATION AUTOMATED SYSTEM FOR ANALYZING THE EMERGENCY SECTION STATE OF MINE USING UAVS

M.L. Kim, Chief Technologist, JSC «SUEK», e-mail: kimml@suek.ru;
I.O. Temkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia.

Describes the information flows scheme in the framework of an automated system for analyzing the mine atmosphere composition at an emergency site using an autonomously controlled UAV. Two principal tasks that should be solved for the dynamic monitoring implementation of distributed parameters of the mine atmosphere. The main parameters that need to be controlled in the pre — and post-emergency periods are discussed, as well as the controls that are appropriate to use, taking into account the limitations imposed by the UAV design. Briefly described the features of processing and analyzing monitoring information in the developed automated system.

Key words: mine, accident, lifesaver, automatic control system, UAV.