

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.831; 622.2; 622.235

ПРОЧНОСТНЫЕ, ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КАРКАСНЫХ И СОТОВЫХ ГОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**В. А. Еременко¹, Ю. П. Галченко², Н. Г. Высотин¹,
В. И. Лейзер¹, М. А. Косырева¹**

¹Горный институт НИТУ “МИСиС”,

E-mail: prof.eremenko@gmail.com, Ленинский проспект, 4, 119991, г. Москва, Россия

²Институт проблем комплексного освоения недр им. акад. Н. В. Мельникова РАН,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

Показан порядок подготовки и проведения экспериментальных исследований прочностных, деформационных и акустических характеристик физических моделей каркасных и сотовых горных конструкций, разрабатываемых в научно-исследовательском центре “Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии” Горного института НИТУ “МИСиС”. Созданы комплексный стенд для проведения физического и оптического моделирования геофизических процессов во вторичных полях напряжений, установка и специализированный стенд для воспроизводства физических моделей любой сложности методами 3D моделирования. Разработаны типовые варианты физических моделей перспективных каркасных и сотовых горных конструкций. Приведены результаты испытаний прочностной, деформационной и акустической характеристик модели одного из вариантов каркасной конструкции. Установлено, что в моделях сотовых горных конструкций наиболее устойчивы системы с большим количеством пустот круглой формы и меньшим их диаметром.

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

DOI: 10.15372/FTPRPI20200608

Формирование вторичного поля напряжений при подземной разработке рудных месторождений с применением систем разработки различного класса [1 – 4] в условиях наличия тектонических разломов и флюидонесущих горизонтов, вариативности физико-механических свойств горных пород и напряженно-деформированного состояния массивов является динамически неустойчивым процессом [5 – 16].

При использовании традиционной геотехнологии в налегающих массивах могут образовываться очаги опасных напряжений, возникают потери балансовых запасов в подземном пространстве. Добычные работы обычно не защищены от негативных проявлений горного давле-

ния особенно при наличии во вмещающих породах флюидонесущих коллекторов (нефти, рассолов, газа, воды), а экологические проблемы разработки месторождений решаются по остаточному принципу.

В современных условиях быстро нарастающего экологического кризиса и постепенного перехода к реализации концепции устойчивого развития и экологическому императиву особую актуальность приобретает проблема формирования альтернативной технологической парадигмы минерально-сырьевого комплекса [17], методологическую базу которой составляет поиск природоподобных решений. В области освоения недр эти решения реализуются в виде создания конвергентных горных технологий, в рамках которых антропогенные процессы взаимодействуют в биоподобной функциональной структуре. Геомеханическая идея таких технологий заключается в целенаправленном формировании параметров вторичного поля напряжений путем разделения во времени процессов, нарушающих исходное поле напряжений, и процессов по управлению горным давлением. Технологическое воплощение этой идеи возможно либо в виде опережающего возведения в обрабатываемом объеме литосферы искусственной объемной несущей конструкции (каркасная конструкция), либо в виде оптимизации условий релаксации напряжений на границе техногенных неоднородностей за счет изменения их формы (сотовая конструкция) [17–21].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения процессов формирования и развития вторичного поля напряжений при подземной отработке рудных месторождений, исследования прочностных, деформационных и акустических характеристик разрабатываемых каркасных и сотовых горных конструкций на учебной научно-производственной базе “Теплый Стан” НИТУ “МИСиС” проведены экспериментальные исследования.

Физический метод моделирования на эквивалентных материалах, предложенный проф. Г. Н. Кузнецовым в 1936 г., оказался наиболее подходящим для исследования геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород. Суть метода — замена горных пород искусственными материалами, показатели физико-механических свойств которых находятся в определенных соотношениях с аналогичными показателями свойств горных пород. Физическое моделирование как метод получило распространение при изучении вопросов влияния горного давления на конструктивные элементы традиционно применяемых и разрабатываемых новых систем. Теории подобия и размерностей определяют условия, при которых явления становятся приближенно подобными [22, 23]. Моделирование на эквивалентных материалах дает возможность с большой степенью детализации проследить геомеханические процессы, развивающиеся в толще пород, в том числе процессы деформирования пород с разрывом сплошности.

В 2019–2020 гг. созданы комплексный стенд для проведения физического и оптического моделирования геофизических процессов во вторичных полях напряжений при разработке месторождений различных геологических типов новыми горными технологиям (рис. 1), установка и специализированный стенд для воспроизводства физических моделей любой сложности методами 3D моделирования, осуществлено приборно-инструментальное обеспечение экспериментальных исследований.

Плотность вещества конструкции определялась расчетом, а предел прочности получен по результатам испытаний каждой модели, созданной из эквивалентных материалов, на гидравлическом прессе П-125. Пресс предназначен для статических испытаний на сжатие стандартных образцов горных пород и физических моделей и представляет собой установку, состоящую из нагрузочного устройства и пульта управления. Боковые нагрузки на комплексном стенде выполнялись с помощью двух низких домкратов ДН10-10П и ручных гидравлических насосов НРГ 700-0,35, способных создавать давление до 10 МПа.

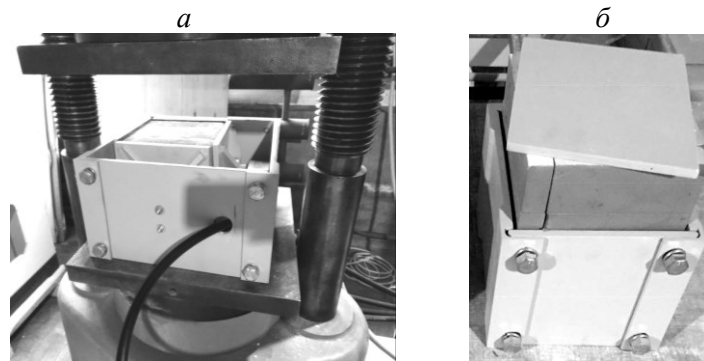


Рис. 1. Комплексный стенд для исследования прочностных, деформационных и акустических характеристик физических моделей и их конструктивных элементов при трехосном нагружении и имитации гравитационно-тектонического (а) и литостатического (б) исходного напряженного состояния массива

Для контроля зон деформирования и разрушения конструктивных элементов 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 проводились 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; 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, позволяющая осуществлять многоканальные измерения, ввод/вывод аналоговых и дискретных сигналов; для ввода данных с термопар, терморезисторов, тензомостов и других датчиков в составе системы применялись специализированные АЦП.

Измерения относительных деформаций физической модели на испытательном прессе П-125 выполнялись с помощью датчика перемещения подвижной плиты KS20-1000-01-C2, измерения относительных деформаций конструктивных элементов — с помощью фольговых тензорезисторов ФК.

Выполнение эксперимента с одноосным сжатием сопровождалось замедленной съемкой процесса разрушения (со скоростью 240 кадров/с).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На начальном этапе исследований влияния геометрических параметров на НДС массива горных пород [18, 19] в 2019 г. был выбран метод виртуального эксперимента на основе численных моделей горнотехнических и геологических систем. В последующем результаты численного моделирования сравнивались с результатами физического моделирования ключевых элементов систем либо с количественными показателями натуральных наблюдений и экспериментов [18, 19]. На втором этапе исследований в 2020 г. определялись прочностные, деформационные и акустические характеристики физических моделей разрабатываемых каркасных и сотовых горных конструкций.

Исходя из целей и задач физического моделирования каркасной горной конструкции, в каждой серии экспериментов испытывалось четыре варианта моделей с различными комбинациями толщины каркаса (рис. 2, 3). Для каждого варианта проводилось 7 экспериментов. Внешние размеры физических моделей $200 \times 200 \times 200$ мм, объем 8 млн мм³. Каждая модель имела подготовленные в ней четыре камеры прямоугольного сечения.

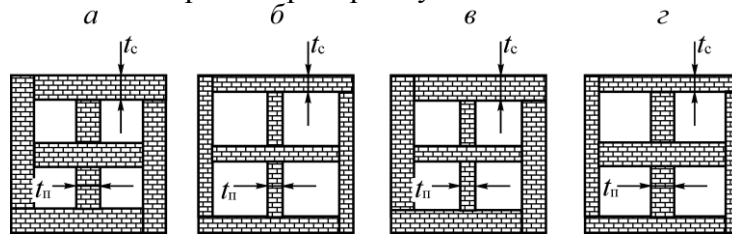


Рис. 2. Геометрические параметры моделей в горизонтальном центральном сечении каркасной горной конструкции: *a* — модель 1; *б* — модель 2; *в* — модель 3; *г* — модель 4

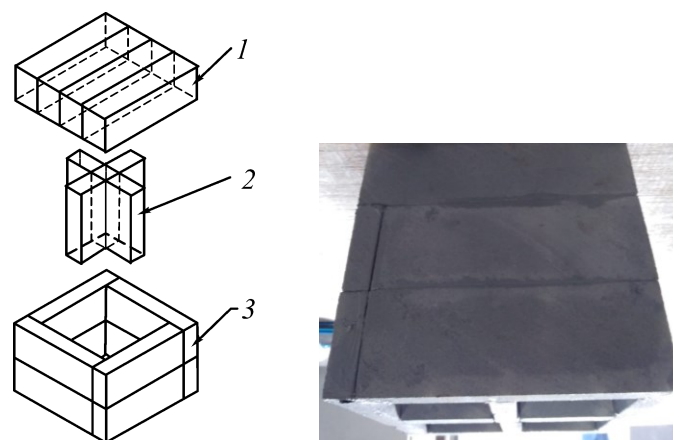


Рис. 3. Внешний вид физической модели 2 (рис. 2б) каркасной горной конструкции: 1 — горизонтальные ограждающие каркасные конструкции; 2 — разделительные каркасные конструкции; 3 — вертикальные ограждающие каркасные конструкции

Для центрального горизонтального сечения модели (рис. 2) варьировались: t_c — толщина ограждающей каркасной конструкции, мм; t_n — толщина разделительной каркасной конструкции, мм; S_{K1} — площадь каркаса и переборок, мм²; S_{K2} — площадь четырех отработанных камер, мм²; S_M — площадь модели, мм²; $K_1 = S_{K1} / S_M$ — доля запасов руды на участках сооружения будущего каркаса; $K_2 = S_{K2} / S_M$ — доля запасов руды из камер.

Варианты проведенных экспериментов:

- модель 1 (рис. 2а) с подготовленными в ней четырьмя камерами прямоугольного сечения: $t_c = t_n = 30$ мм; $S_{K1} = 27\,900$ мм²; $S_{K2} = 12\,100$ мм²; $S_M = 40\,000$ мм²; $K_1 = 0.697$; $K_2 = 0.303$;
- модель 2 (рис. 2б): $t_c = t_n = 20$ мм; $S_{K1} = 20\,400$ мм²; $S_{K2} = 19\,600$ мм²; $S_M = 40\,000$ мм²; $K_1 = 0.51$; $K_2 = 0.49$;
- модель 3 (рис. 2в): $t_c = 30$ мм; $t_n = 20$ мм; $S_{K1} = 25\,600$ мм²; $S_{K2} = 14\,400$ мм²; $S_M = 40\,000$ мм²; $K_1 = 0.64$; $K_2 = 0.36$;
- модель 4 (рис. 2г): $t_c = 30$ мм; $t_n = 20$ мм; $S_{K1} = 23\,100$ мм²; $S_{K2} = 16\,900$ мм²; $S_M = 40\,000$ мм²; $K_1 = 0.577$; $K_2 = 0.423$.

Конструктивные элементы физических моделей проектировались в программе AutoCAD и изготавливались на 3D принтере CreatBoot d600Pro из пластика PLA или ABS. Далее на установке и специализированном стенде из пластиковых деталей изготавливались пресс-формы. Эквивалентные геоматериалы использовались при тиражировании конструктивных элементов,

из которых склеивались физические модели. В некоторых случаях свойства эквивалентных геоматериалов в модели определялись в программе RocData для массивов горных пород. Свойства и состав одного из эквивалентных геоматериалов, использованных при изготовлении конструктивных элементов физических моделей, приведены ниже. Для оценки НДС модели в предположении упругого поведения массива применялся критерий прочности Хука – Брауна [24 – 28], который определяется в виде уравнения

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{сж} \left(mb \frac{\sigma_3}{\sigma_{сж}} + s \right)^a,$$

где σ_1, σ_3 — главные максимальные и минимальные напряжения, МПа; $\sigma_{сж}$ — прочность на одноосное сжатие ненарушенной породы (эквивалентного материала), МПа; mb, s, a — постоянные Хука – Брауна, которые рассчитываются по формулам:

$$mb = m_i \exp\left(\frac{CSI - 100}{28 - 14D}\right);$$

$$s = \exp\left(\frac{CSI - 100}{9 - 3D}\right);$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{CSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right),$$

здесь m_i — параметр ненарушенной породы (эквивалентного материала), не описывает степень трещиноватости или физико-механические свойства породы, а соответствует его литологии и генезису; CSI — геологический индекс прочности; D — коэффициент техногенной нарушенности массива; $e \approx 2.71828$ — основание натурального логарифма (число Эйлера).

Свойства и состав эквивалентного геоматериала № 4

Предел прочности на сжатие	15 – 19 МПа
GSI модели	51 – 58
Структурный индекс m_i	7 – 8
Модуль деформации (Юнга)	9.8 – 19.6 ГПа
Сцепление	0.687 – 0.730 МПа
Угол внутреннего трения	25.404 – 27.030°
Коэффициент Пуассона	0.165 – 0.250
Водопоглощение геоматериала	13 – 16 %
Постоянная Хука – Брауна mb	3.895 – 3.931
Постоянная Хука – Брауна s	0.0020 – 0.0021
Постоянная Хука – Брауна a	0.504 – 0.506
Плотность геоматериала	1800 – 2000 кг/м ³
Воздушная известь молотая негашеная	5 – 8 %
Кварцевый песок немолотый	82 – 87 %
Цемент	8 – 10 %
Вода	7 %

В каждой серии экспериментов испытывалось 12 моделей с разной формой пустот, их расположением, размерами и комбинациями толщины элементов сотовой системы (рис. 4). Внешние размеры физических моделей изучаемых сотовых горных конструкций аналогичны размерам моделей каркасных систем (рис. 3). Для центрального горизонтального сечения модели (рис. 4)

приняты обозначения: S_{k1} — площадь геоматериала в плоскости модели, мм^2 ; S_{k2} — площадь пустоты в плоскости модели, мм^2 ; S_M — площадь плоскости модели, мм^2 ; K — отношение площади пустот к площади геоматериала (в первом варианте испытаний $K \approx 1$, во втором $K > 2$).

Ниже приведены сценарии проведения экспериментов.

Вариант испытаний 1 (рис. 4а):

- модель 1 — физическая модель с одной техногенной пустотой прямоугольного сечения: $a_n = 140$ мм — ширина грани квадратной камеры в модели; $S_{k1} = 20\,400$ мм^2 ; $S_{k2} = 19\,600$; $S_M = 40\,000$ мм^2 ; $K = 0.96$;

- модель 2 — физическая модель с пустотами прямоугольного сечения в количестве 4 шт.: $a_n = 70$ мм — ширина грани четырех квадратных камер в модели; $S_{k1} = 20\,400$ мм^2 ; $S_{k2} = 19\,600$ мм^2 ; $S_M = 40\,000$ мм^2 ; $K = 0.96$;

- модель 3 — физическая модель с пустотами прямоугольного сечения в количестве 9 шт.: $a_n = 45$ мм — ширина грани девяти квадратных камер в модели; $S_{k1} = 21\,775$ мм^2 ; $S_{k2} = 18\,225$ мм^2 ; $S_M = 40\,000$ мм^2 ; $K = 0.84$;

- модель 4 — физическая модель с одной техногенной пустотой круглого сечения: $d_n = 160$ мм — диаметр круглой камеры в модели; $S_{k1} = 19\,890$ мм^2 ; $S_{k2} = 20\,110$ мм^2 ; $S_M = 40\,000$ мм^2 ; $K = 0.989$;

- модель 5 — физическая модель с техногенными пустотами круглого сечения в количестве 4 шт.: $d_n = 40$ мм — диаметр четырех круглых камер в модели; $S_{k1} = 19\,890$ мм^2 ; $S_{k2} = 20\,110$ мм^2 ; $S_M = 40\,000$ мм^2 ; $K = 0.989$;

- модель 6 — физическая модель с подготовленными в ней техногенными пустотами круглого сечения в количестве 9 шт.: $d_n = 52$ мм — диаметр девяти круглых камер в модели; $S_{k1} = 19\,890$ мм^2 ; $S_{k2} = 20\,110$ мм^2 ; $S_M = 40\,000$ мм^2 ; $K = 0.989$.

Вариант испытания 2 (рис. 4б).

Ширина граней a_n при квадратном сечении камер изменялась в моделях: 1 — 170 мм, 2 — 55 мм; при круглом сечении камер соответственно: 4 — 190 мм, 5 — 94, 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.

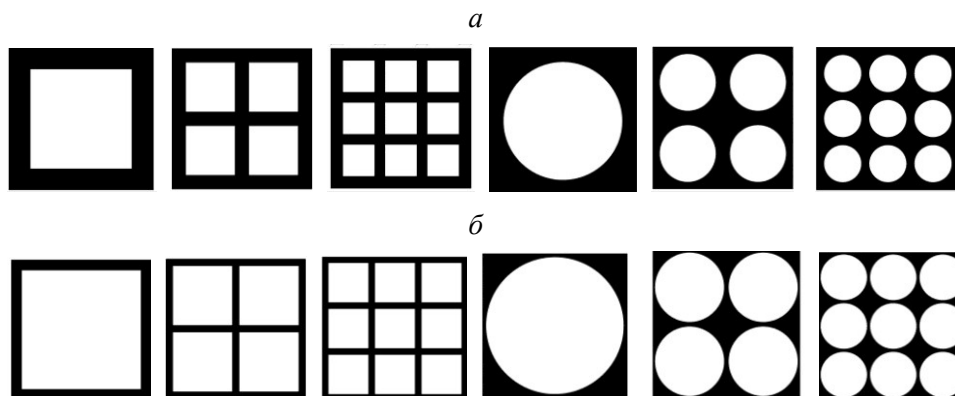


Рис. 4. Геометрические параметры образцов для физического моделирования сотовых горных конструкций с соотношением пустот к геоматериалу K в горизонтальной центральной плоскости модели: в первом варианте испытаний $K \approx 1$ (а), во втором $K > 2$ (б)

Отверстия в физических моделях выбуривались с помощью установки алмазного бурения DD 250 (DD-HD 30), коронок с корпусом X-CHANGE модулем SPS-H и хвостовиком BL (рис. 5). Так как физические модели создавались склеиванием конструктивных элементов, имеющих

форму прямоугольных параллелепипедов и изготовленных из эквивалентных геоматериалов, то можно утверждать, что модели состоят из элементарных блоков, имеют в прямоугольной системе координат три системы трещин с определенными контактными условиями. Впервые для оценки качества эквивалентного геоматериала (массива) физических моделей применялась система классификации качества горных пород по показателю индекса Q (метод Бартона) [29]. Учитывалось влияние на устойчивость физической модели следующих факторов: RQD — коэффициент, характеризующий качество геоматериала; J_n — коэффициент, характеризующий число систем трещин; J_r — коэффициент, характеризующий шероховатость поверхности стенок трещин; J_a — коэффициент, характеризующий измененность стенок трещин.

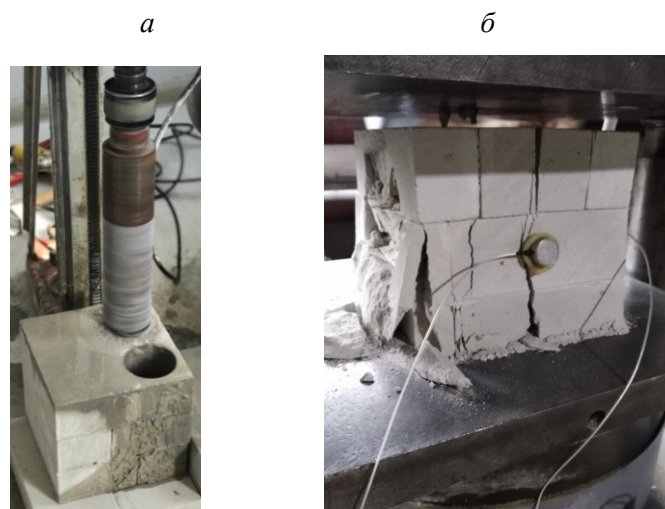


Рис. 5. Бурение сот в физической модели (а) и разрушение физической модели каркасной системы при одноосном нагружении (б)

Значение индекса Q рассчитывалось на основе четырех установленных параметров по формуле: $Q = (RQD / J_n) \cdot (J_r / J_a) = (100 / 9) \cdot (3 / 6) = 5.5$, где $RQD = 100\%$ — качество эквивалентного геоматериала; $J_n = 9$ — три системы трещин; $J_r = 3$ — шероховатая поверхность стенок трещин; $J_a = 6$ — неослабляющий тонкий заполнитель трещин толщиной < 1 мм; $Q = 5.5$ — характеризует качество эквивалентного геоматериала (массива) как средней нарушенности и устойчивости.

Установлен характер разрушения моделей с визуализацией систем трещин (рис. 5б). В основном модели 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.

На рис. 6 приведены экспериментальные зависимости прочностных, деформационных и акустических характеристик физической модели 1 каркасной системы (рис. 2а). В таблице представлены результаты экспериментальных исследований на физических моделях каркасных и сотовых конструкций из эквивалентного материала № 4 для различных вариантов исходного поля напряжений, реализуемых с использованием комплексного стенда для проведения физического и оптического моделирования геофизических процессов во вторичных полях напряжений [30, 31].

Наиболее высокие прочностные характеристики моделей каркасных и сотовых горных конструкций при испытании регистрируются в условиях литостатического исходного напряженного состояния модели и ее конструктивных элементов; значительное уменьшение прочностных характеристик возникает при гравитационно-тектоническом напряженном состоянии модели, а также гравитационном при девиаторном распределении в обоих случаях значений главных напряжений (таблица). Отношение площадей геоматериала и пустот (камер) в моделях (рис. 2, 4) влияет на их прочностные характеристики: чем больше площадь геоматериала в модели, тем большее сопротивление она оказывает внешним нагрузкам. Толщина каркаса по отношению к толщине внутрикаркасных целиков (переборок) также влияет на прочностные характеристики моделей: чем больше толщина каркаса по отношению к толщине переборок, тем выше сопротивляемость модели внешним нагрузкам (рис. 2, таблица). При одинаковом соотношении площадей геоматериала и пустот (камер) в моделях сотовых горных конструкций наибольшее сопротивление внешним нагрузкам отмечается в моделях с меньшим диаметром пустот (камер круглого сечения) и большим их количеством: 9 пустот (рис. 4). 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.

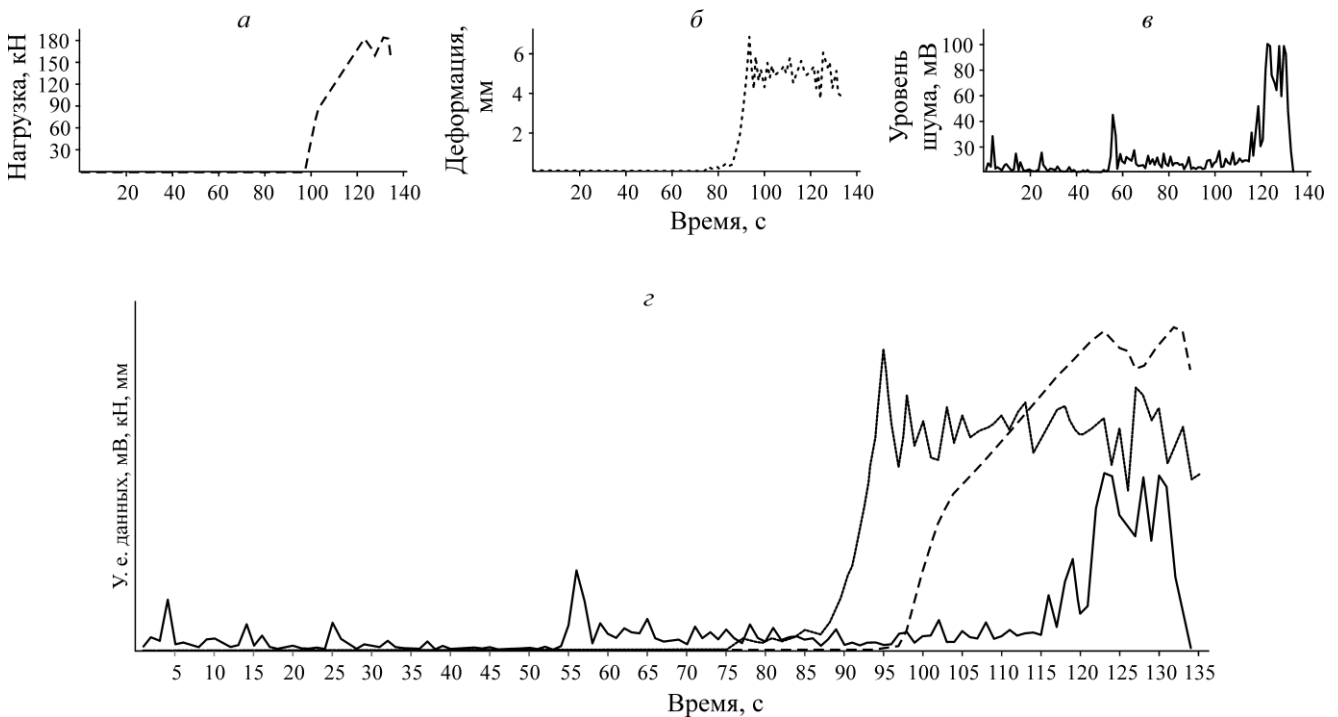


Рис. 6. Результаты испытания варианта физической модели 1 каркасной горной конструкции (рис. 2а): прочностные (а), деформационные (б), акустические (в) характеристики и совмещенный график сопоставления уровня шума акустических сигналов от прилагаемой на модель нагрузки (г)

Получен также не очевидный, на первый взгляд, результат: при одноосном нагружении предел прочности склеенной из элементарных блоков модели меньше, чем несклеенной (таблица). После проведенного анализа и количественной оценки выяснилось, что в склеенной модели трение ϕ , на контакте трещин гораздо меньше, чем в несклеенной, так как шероховатость поверхности стенок трещин и, соответственно, трение в несклеенной на контакте трещин выше

в 1.5 раза. При этом сцепление между элементарными блоками в склеенной модели не играет большой роли в ее прочностной характеристике, поскольку силы сцепления на порядок меньше сил трения, которые возникают на контактах трещин в процессе разрушения. Прочность моделей без пустот в 1.9 – 10.5 раза выше, чем с пустотами (камерами) при различных вариантах исходного поля напряжений.

Средние значения прочностных, деформационных и акустических характеристик физических моделей каркасных и сотовых горных конструкций

Горная конструкция	Физическая модель	Максимальная нагрузка, кН	Максимальная деформация, мм	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Уровень шума при разрушении модели, мВ
—	Цельная без пустот (склеенная)	440.857	5.817	11.021	2.983	96.250
—	Цельная без пустот (не склеенная)	623.755	5.769	15.594	2.958	—
Гравитационное исходное напряженное состояние модели						
Каркасная	Модель 1 (рис. 2а)	186.542	3.754	4.664	1.925	101.180
	Модель 2 (рис. 2б)	87.840	7.394	2.196	3.974	99.760
	Модель 3 (рис. 2в)	178.364	9.474	4.459	3.434	93.640
	Модель 4 (рис. 2г)	123.324	5.411	3.083	2.775	69.900
Сотовая	Модель 2 (рис. 4а)	91.551	7.221	2.346	4.675	93.890
	Модель 5 (рис. 4а)	111.344	5.365	3.788	3.124	95.210
Литостатическое исходное напряженное состояние модели						
Каркасная	Модель 1	242.505	3.003	6.063	1.540	121.416
	Модель 2	114.192	5.915	2.855	3.179	119.712
	Модель 3	231.873	7.579	5.797	2.747	112.368
	Модель 4	160.321	4.329	4.008	2.220	83.880
Сотовая	Модель 2	119.016	5.777	3.050	3.740	112.668
	Модель 5	144.747	4.292	4.924	2.499	114.252
Гравитационно-тектоническое исходное напряженное состояние модели (девиаторный порядок распределения значений главных напряжений)						
Каркасная	Модель 1	121.252	3.904	3.032	2.048	84.991
	Модель 2	57.096	7.690	1.427	4.228	83.798
	Модель 3	115.937	9.853	2.898	3.654	78.658
	Модель 4	80.161	5.627	2.004	2.953	58.716
Сотовая	Модель 2	59.508	7.510	1.525	4.974	78.868
	Модель 5	72.374	5.580	2.462	3.324	79.976

Примечание. В связи с ограниченным объемом статьи представлены значения по выборочным вариантам проведенных экспериментов

Наиболее удовлетворительные значения прочностных и одновременно горнотехнических характеристик показали каркасная модель 3 (рис. 2в) и сотовая модель с 9 камерами (рис. 4а, б) при различных соотношениях площадей геоматериала и камер и литостатическим исходным напряженным состоянием модели.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования показали перспективность применения для изучения геомеханических процессов при разработке параметров природоподобных горных технологий физических моделей каркасных и сотовых конструкций. Физические модели позволяют выполнять исследования в широком диапазоне исходного напряженного состояния массива и свойств эквивалентных материалов. Для физических моделей разрабатываемых каркасных и сотовых конструкций, изготовленных из эквивалентного геоматериала с заданными свойствами, получены прочностные, деформационные и акустические характеристики.

Исследование методами физического моделирования процесса и характера влияния вторичного поля напряжений на конструктивные элементы создаваемых каркасных и сотовых горных конструкций 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агошков М. И. Конструирование и расчеты систем и технологии разработки рудных месторождений. — М.: Наука, 1965. — 220 с.
2. Новая технология и системы подземной разработки рудных месторождений: к 60-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР М. И. Агошкова. — М.: Наука, 1965. — 235 с.
3. Именитов В. Р. Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений: учеб. пособие. — М.: Недра, 1984. — 504 с.
4. Зубов В. П. Применяемые технологии и актуальные проблемы ресурсосбережения при подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых // Горн. журн. — 2018. — № 6. — С. 77–83.
5. Родионов В. Н. Очерк геомеханика. — М.: Науч. мир, 1996. — 126 с.
6. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики. — М.: Недра, 1986. — 286 с.
7. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
8. Борщ-Компониц В. И. Практическая геомеханика горных пород. — М.: Горн. книга, 2013. — 322 с.
9. Еременко В. А. Обоснование параметров геотехнологии освоения удароопасных железорудных месторождений Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — 2011. — 333 с.
10. Kurlenya M. V., Mirenkov V. E., and Krasnovsky A. A. Stress state of rocks surrounding excavations under variable Young's modulus, J. of Min. Sci., 2015, Vol. 51, No. 5. — P. 937–943.
11. Sidorov D. and Ponomarenko T. Reduction of the ore losses emerging within the deep mining of bauxite deposits at the mines of OJSC "Sevuralboksitruuda", IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., 2019, Vol. 302. — 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/302/1/012051.

12. **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.
13. **Курленя М. В., Барышников В. Д., Барышников Д. В., Гахова Л. Н., Качальский В. Г., Хмелинин А. П.** Разработка и совершенствование скважинных методов оценки и контроля напряженно-деформированного состояния инженерных горных сооружений // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 182–195.
14. **Барышников В. Д., Барышников Д. В., Гахова Л. Н., Качальский В. Г.** Опыт применения геомеханического мониторинга при подземной разработке месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 61–73.
15. **Аптуков В. Н., Волегов С. В.** Моделирование процесса формирования остаточных напряжений и поврежденности в образцах соляных пород, полученных из керна // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 3–11.
16. **Рыбин В. В., Константинов К. Н., Каган М. М., Панасенко И. Г.** Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия // Горн. журн. — 2020. — № 1. — С. 53–57.
17. **Trubetskoy K. N., Zacharov V. N., and Galchenko J. P.** Nature like mining technologies: Prospect of resolving global contradictions when developing mineral resources of the lithosphere, Herald of the Russian Acad. of Sci., 2019, Vol. 87, No. 4. — P. 378–384.
18. **Галченко Ю. П., Еременко В. А., Косырева М. А., Высотин Н. Г.** Исследование особенностей формирования вторичного поля напряжений при техногенном изменении недр в процессе подземной разработки месторождений // Eurasian Min. — 2020. — № 1. — С. 3–7.
19. **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.
20. **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 // Горн. журн. — 2019. — № 5. — С. 6–13.
21. **Eremenko V. A., Galchenko Yu. P., and Kosyрева M. A.** Effect of mining geometry on natural stress field in underground ore mining with conventional and nature-like technologies, J. Min. Sci., 2020, Vol. 56, No. 3. — P. 416–425.
22. **Кирпичев М. В.** Теория подобия. — М.: Изд-во АН СССР, 1953. — 96 с.
23. **Покровский Г. И., Федоров И. С.** Центробежное моделирование для решения инженерных задач. — М.: Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1953.
24. **Hoek E. and Brown E. T.** Underground excavations in rock, London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
25. **Fairhurst C. and Cook N. G. W.** The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighbourhood of a surface, in Proc. 1st Congr. of the Int. Soc. for Rock Mech., Lisbon, 1966, Vol. 1. — P. 687–692.
26. **Jiang Q., Feng X., Song L., Gong Y., Zheg H., and Cui J.** Modeling rockspecimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects, Acta Mech. Sinica, 2015, Vol. 32, No. 1. — P. 524–535.
27. **Kong L., Ostadhassan M., Li C., and Tamimi N.** Rock physics and geomechanics of 3D printed rocks. ARMA 51st U. S. Rock Mech., Geomech. Symp., San Francisco, California, USA, 2017. — P. 1–8.

28. **Gell E. M., Walley S. M., and Braithwaite C. H.** Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks., J. Rock Mech. and Rock Eng., 2019, No. 3. — P. 1–13.
29. **Barton N.** Application of Q-System and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses, Workshop on Norwegian Method of Tunneling, New Delhi, 1993. — P. 66–84.
30. **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 // ГИАБ. — 2019. — № 11. — С. 35–47.
31. **Высотин Н. Г., Косырева М. А., Лейзер В. И., Аксенов З. В.** Обоснование создания комплексного стенда для физического моделирования геомеханических процессов во вторичных полях напряжений в условиях разработки месторождений конвергентными горными технологиями // ГИАБ. — 2019. — № 10. — С. 131–145.

Поступила в редакцию 30/IX 2020

После доработки 27/X 2020

Принята к публикации 03/XI 2020