

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.272

ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВОВ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ И ОЧЕНЬ ТОНКИХ ПРИРОДНЫХ ПЕСКОВ

Т. И. Рубашкина, М. А. Костина

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
E-mail: korneychuk@bsu.edu.ru, ул. Победы, 85, 308015, г. Белгород, Россия*

Выполнены исследования в статическом и динамическом режимах прочностных, упругих и деформационных свойств твердеющей закладки. В ее составе использованы тонкие и очень тонкие природные пески с повышенным содержанием глинистых и пылевидных частиц, оптимизированных с целью укрупнения отсевом доменного гранулированного шлака фракции 0–5 мм. Определены прочность на одноосное сжатие, модуль упругости и коэффициент Пуассона образцов экспериментальных составов в разные сроки твердения. Получены корреляционные зависимости между пределом прочности на одноосное сжатие и скоростью распространения продольной волны, а также между модулями упругости, определенными при испытаниях образцов статическим и динамическим методами.

Твердеющая закладочная смесь, очень тонкий природный песок, гранулометрический состав заполнителя, отсев доменного гранулированного шлака, ультразвуковое исследование, предел прочности при сжатии, модуль упругости, коэффициент Пуассона

DOI: 10.15372/FTPRPI20230107

Исследования прочностных, упругих и деформационных свойств искусственных массивов, возведенных на основе твердеющей закладки, позволяют находить оптимальные составы закладочной смеси, выбирать эффективные технологии для конкретных горнотехнических условий. В результате повышается безопасность горных работ и снижается себестоимость закладки выработанного пространства.

Качество закладочного материала оценивается прочностными (предел прочности на одноосное, двухосное и всестороннее сжатие, срез, растяжение и изгиб) и деформационными (статический и динамический модули упругости, коэффициент Пуассона) показателями [1–3]. Многие методики определения основных физико-механических свойств твердеющей закладки регламентированы ГОСТами [4–7].

Предел прочности на одноосное сжатие — основное прочностное свойство, которое в обязательном порядке устанавливается для конкретных составов закладочных смесей испытанием образцов-кубов. Они изготавливаются из проб закладочной смеси, отобранной на выходе

из смесителя закладочного комплекса, или выбуриванием керна непосредственно из массива при его обнажении. Образцы необходимы при подборе и исследовании в лабораторных условиях экспериментальных составов твердеющей закладки.

Другие прочностные свойства также определяются опытным путем. Это трудоемкая операция, требующая специального оборудования со специфичной оснасткой и большого количества образцов разной формы и размеров. При расчетах используются известные зависимости искомых параметров от предела прочности материала на одноосное сжатие [1–2]. В [1] установлено, что прочность закладочного материала на растяжение и изгиб при одной и той же прочности на одноосное сжатие не зависит от вида используемого заполнителя.

Закладочный материал прочностью 1–6 МПа характеризуется корреляционной зависимостью между прочностью на растяжение σ_r , изгибом σ_i и прочностью на одноосное сжатие σ_s : $\sigma_r = 0.0255\sigma_s + 0.045$ при коэффициенте корреляции $r=0.9$ и коэффициенте надежности $\mu = 33$; $\sigma_i = 0.04\sigma_s + 0.01$ при $r=0.8$ и $\mu = 30$. Сцепление определяется как $C = 0.383\sigma_s + 0.5$.

Упругие и деформационные характеристики закладочного массива необходимы для определения устойчивости его обнажений горными выработками в процессе выемки смежных рудных массивов. Модуль упругости и коэффициент Пуассона — основные деформационные свойства. Для их нахождения статическим способом по стандартной методике [6] необходимо использовать полноразмерные образцы цилиндрической или призматической формы с отношением высоты к диаметру (поперечному сечению), равным 4.0. Получить нужное количество образцов требуемых размеров в производственных условиях не всегда возможно. Кроме того, испытания по указанной методике достаточно трудоемки и недешевы. В таких случаях модуль упругости и коэффициент Пуассона определяются динамическим способом, который заключается в измерении скоростей продольных и поперечных волн в образце и расчете по известным формулам [1–3]. Динамический способ более простой, не требует разрушения образцов, что очень важно. Одни и те же образцы можно использовать повторно в другом возрасте закладки при соблюдении условий их хранения.

Динамический модуль упругости выше статического, но между ними можно установить корреляционные зависимости. В [8–22] приведены связи для разных горных пород, литых песчаных бетонов и твердеющей закладки прочностью до 10 МПа. Однако такие зависимости не универсальны и обоснованы только для конкретного исследуемого материала. Прочность твердеющей закладки в массиве с возрастом увеличивается, достигая значений более 10 МПа к моменту подработки. Например, закладка марки М100 в возрасте 90 сут при правильной технологии может иметь прочность более 14 МПа.

При разработке экспериментальных составов твердеющей закладки на основе тонких и очень тонких природных песков с повышенным содержанием глинистых частиц исследование их прочностных и деформационных свойств, а также установление корреляционных зависимостей между показателями, определенными в статическом и динамическом режимах, имеет важное значение.

Тонкие и очень тонкие природные пески с модулем крупности менее 0.7 и повышенным содержанием глинистых и пылевидных частиц (до 30 %) являются некондиционными для строительных работ. Однако они довольно широко применяются в качестве заполнителя для приготовления твердеющих закладочных смесей на основе портландцемента и его разновидностей. Закладочные смеси при таком заполнителе имеют ряд достоинств. Тонкодисперсная структура заполнителя позволяет получить однородные нерасслаивающиеся литые смеси, которые до-

ставляются по трубопроводному транспорту в самотечном режиме на значительные расстояния (несколько километров). Растекаемость смеси по распылу конуса на вискозиметре Суттарда составляет до 220 мм. Такие пески сравнительно недорогие, особенно если их месторождение находится в непосредственной близости от закладочных комплексов. К недостаткам относится повышенный расход цемента для получения прочности твердеющей закладки на одноосное сжатие (4–10 МПа). Как следствие, наблюдается повышенный расход воды, что увеличивает усадки при твердении и приводит к значительному росту себестоимости закладки выработанного пространства.

В [23–24] представлена технологическая и экономическая целесообразность оптимизации гранулометрического состава некондиционных тонких и очень тонких песков с повышенным содержанием глинистых и пылевидных частиц. Они применяются для приготовления твердеющих закладочных смесей введением в состав заполнителя “укрупняющего агента” — отсева доменного гранулированного шлака фракции 0–5 мм без предварительной технологической подготовки (отмыва, домола, отсева и т. д.). Выявлено, что с увеличением доли шлака в составе комплексного заполнителя снижается его водопотребность. Повышается модуль крупности заполнителя и снижается содержание в нем глинистых компонентов. Это позволило получить составы для приготовления твердеющих закладочных смесей с пониженным расходом цемента (на 11–16 %) при сохранении прочностных и транспортабельных свойств.

Цель настоящей работы — исследование прочностных, упругих и деформационных свойств экспериментальных составов закладочных смесей и установление корреляционных зависимостей между показателями, определенными в статическом и динамическом режиме.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследований — экспериментальные составы марок М40 и М100 на основе очень тонкого песка в качестве заполнителя. Для приготовления экспериментальной закладочной смеси в качестве заполнителя использовался очень тонкий песок месторождения Большие Маячки (Белгородская область). Укрупняющим агентом для оптимизации гранулометрического состава заполнителя служил отсев доменного металлургического шлака фракции 0–5 мм ПАО “Северсталь”.

Физико-технические свойства используемых для приготовления экспериментальных составов твердеющей закладки марок М40 (прочность на одноосное сжатие 4 МПа) и М100 (прочность на одноосное сжатие 10 МПа) приведены в табл. 1. Песок имеет очень низкий модуль крупности (0.60), так как в нем преобладают тонкие и пылевидные фракции (< 0.16 мм), очень высокое содержание глинистых частиц, как следствие, отмечается высокая удельная поверхность частиц. Заполнитель с такими показателями можно считать некондиционным даже для приготовления твердеющих закладочных смесей, потому что для равномерного смачивания и скрепления преобладающего количества частиц сверхтонких фракций до обеспечения нормативной прочности требуется повышенный расход воды и, возможно, цемента. Шлак имеет показатели крупного песка, не содержит глинистых компонентов; удельная поверхность частиц в 2.0–2.5 раза ниже, чем у песка, не требуется дополнительная обработка (отсев, помол и т. п.); сравнительно недорогой по стоимости. У песка и отсева шлака близкие истинные плотности, что позволило использовать отсев в качестве укрупняющего агента для оптимизации некондиционных песков и подобрать составы нерасслаивающихся закладочных смесей при сниженном расходе цемента.

ТАБЛИЦА 1. Физико-технические свойства очень тонкого песка месторождения Большие Маячки и отсева доменного металлургического шлака ПАО «Северсталь»

Материал	Остатки по ГОСТу 8735-88, масс. %, на ситах с размером отверстий, мм						M_k	$S, \%$	$T, \text{кг/м}^2$	$I/N, \text{кг/м}^3$
	2.50	1.25	0.63	0.315	0.16	<0.16, в том числе глинистые				
Песок	Частные						0.60 очень тонкий	18.29	19.45	2675 / 1630
	0.07	0.04	5.46	4.65	33.66	56.12				
Шлак	Полные						2.65 крупный	—	7.69	2700 / 1490
	0.07	0.11	5.57	10.22	43.88					
Шлак	Частные						2.65 крупный	—	7.69	2700 / 1490
	2.07	10.63	52.35	24.40	6.39	4.15				
Шлак	Полные									
	2.07	12.70	65.06	89.46	95.85					

Примечание. M_k — модуль крупности; S — содержание глинистых и пылевидных частиц; T — теоретическая удельная поверхность; I/N — истинная / насыпная плотность.

При подборе составов соблюдались два обязательных условия: растекаемость на вискозиметре Суттарда не менее 220 мм и обеспечение марочной прочности в возрасте 28 сут нормального твердения. Некоторые из полученных на оптимизированном заполнителе экспериментальных составов марок М40 и М100 и их физико-механические свойства в разные сроки набора прочности приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Состав закладочной смеси на оптимизированном заполнителе

Номер состава	Состав заполнителя, %			Расход на 1 м ³ закладочной смеси, кг		Плотность образцов, кг/м ³	Усадка, %	Прочность на одноосное сжатие, МПа, в возрасте, сут				
	Песок	Шлак	M_k	Цемент	Вода			28	60	90	180	365
Марка М40												
1	100	0	0.60 очень тонкий	380	500	1920	6.08	6.51	8.00	8.79	10.15	11.50
2	75	25	1.11 очень мелкий	260	450	1920	4.31	6.30	8.07	8.51	9.82	11.13
3	60	40	1.42 очень мелкий	240	410	1930	2.88	6.83	8.85	9.22	10.64	12.06
Марка М100												
4	100	0	0.60 очень тонкий	570	530	1870	5.33	10.20	12.53	13.77	15.89	18.01
5	75	25	1.11 очень мелкий	460	500	1880	3.69	10.40	11.55	14.04	16.21	18.37
6	60	40	1.42 очень мелкий	420	480	1870	3.50	10.23	11.34	13.81	15.94	18.07

За счет оптимизации гранулометрического состава очень тонких песков можно получить транспортабельные составы твердеющей закладки марок М40 и М100 при сниженном расходе цемента. Плотность образцов после твердения одного порядка, усадка почти в 2 раза меньше. Сохраняется динамика набора прочности во времени. С целью определения прочностных и деформационных свойств закладочного массива, возведенного на основе твердеющей закладки экспериментальных составов, для каждого состава (табл. 2) изготовлены 15 образцов-кубов размером $100 \times 100 \times 100$ мм и три образца цилиндрической формы с отношением высоты и диаметра $\sim 2 : 1$ на каждый срок нормального твердения (28, 60, 90, 180, 360 сут). Всего подготовлено 108 образцов. Они хранились в камере нормального твердения при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности 95 %. Деформационные свойства определялись динамическим и статическим методами.

Статический метод основан на измерении деформаций образцов закладки исследуемых составов под нагрузкой. На измерительной системе АСИС 2017 образцы нагружались в условиях одноосного сжатия до нагрузки, составляющей 50–60 % от разрушающей, затем проводилась разгрузка образца. В процессе нагружения и разгрузки с помощью специальной аппаратуры велась непрерывная регистрация деформаций. Продольные и поперечные деформации измерялись потенциометрическими датчиками линейного перемещения (точность измерения 1 мкм).

Динамический метод определения деформационных свойств пород основан на измерении скоростей распространения продольных и поперечных волн, возбуждаемых в исследуемых образцах в диапазоне ультразвуковых частот, по значениям которых рассчитывают упругие характеристики: коэффициент Пуассона μ и динамический модуль упругости E_d :

$$\mu = \frac{0.5 - \chi^2}{1 - \chi^2},$$

$$E_d = \frac{C_p^2 \rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu},$$

где $\chi = C_s / C_p$; C_p , C_s — скорость распространения продольных и поперечных волн соответственно, м/с; ρ — плотность твердеющей закладки, кг/м³.

Для измерений скоростей прохождения продольных и поперечных волн использовался ультразвуковой прибор УК10П (частота импульса 200 кГц). Параллельно с измерением упругих характеристик по стандартным методикам определялись плотность ρ , влажность W и прочность на одноосное сжатие σ_s всех испытуемых образцов.

Для установления зависимостей между показателями деформационных и прочностных свойств, полученных статическим и динамическим методами, проведен линейный регрессионный анализ методом статистического исследования в функционале Microsoft Excel.

В результате испытания образцов закладки всех экспериментальных составов по указанным методикам получены значения прочностных, упругих и деформационных свойств в разные сроки набора прочности (28, 60, 90, 180, 360 сут нормального твердения). Обработанные результаты испытаний в возрасте 60 сут показаны в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Физико-механические и деформационные свойства образцов экспериментальных составов в статическом и динамическом режимах

Номер состава	Физико-механические свойства образцов			Деформационные и упругие свойства					
				в статическом режиме		в динамическом режиме			
	$W, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\sigma_s, \text{МПа}$	$E_s, \text{ГПа}$	μ	$C_p, \text{м/с}$	$C_s, \text{м/с}$	μ	$E_d, \text{ГПа}$
Марка М40									
1	20.7	1920	8.00	2.9	0.31	2670	1414	0.31	10.0
2	20.9	1920	8.07	2.9	0.32	2822	1475	0.31	11.0
3	20.7	1930	8.85	3.0	0.35	3083	1445	0.36	11.0
Марка М100									
4	20.1	1870	10.20	3.1	0.35	3070	1416	0.36	10.2
5	20.9	1880	10.40	3.1	0.35	2879	1385	0.35	9.7
6	20.2	1870	10.23	3.1	0.35	2927	1418	0.35	10.1

Обработка и анализ результатов испытаний показали следующее:

- влажность всех образцов в момент испытания $\sim 20 \%$;
- средняя плотность образцов неизменна на всех этапах испытаний;
- скорость распространения продольной волны закономерно увеличивалась с возрастанием прочности образцов на одноосное сжатие;
- скорость распространения поперечной волны ниже скорости распространения продольной, но соотношение C_s / C_p увеличилось с 0.50 в возрасте образцов 28 сут до 0.57 к году;
- коэффициенты Пуассона, определенные в статическом и динамическом режимах, в большинстве случаев равны для соответствующих составов, но численно уменьшаются с возрастом образцов и увеличением прочности σ_s . Значения коэффициенты Пуассона экспериментальных составов в разные сроки набора прочности показаны на рис. 1;

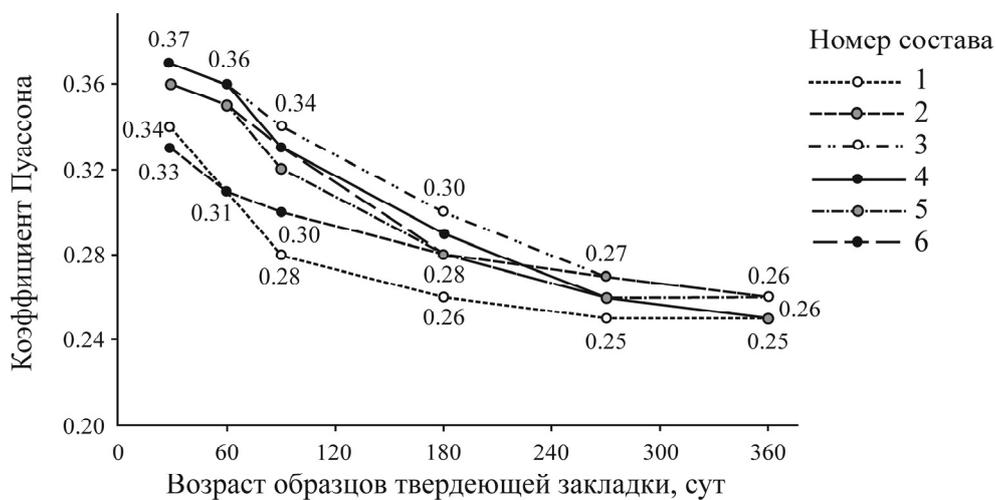


Рис. 1. Значения коэффициентов Пуассона экспериментальных составов твердеющей закладки в разные сроки набора прочности

• модуль упругости, определенный в динамическом режиме, гораздо выше по значению модуля упругости, определенного в статическом режиме, но между этими показателями также прослеживается закономерность для всех исследованных составов твердеющей закладки.

Проведенные исследования данных позволили получить следующие соотношения:

— уравнение линейной зависимости прочности на одноосное сжатие экспериментальных составов от скорости распространения продольной волны, где $\sigma_s = 0.0067C_p - 7.75$, коэффициент регрессии $R^2 = 0.85$ (рис. 2);



Рис. 2. Зависимость прочности на одноосное сжатие экспериментальных составов твердеющей закладки от скорости распространения продольной волны

— уравнения линейной (кривая 1, рис. 3), логарифмической (кривая 2) и степенной (кривая 3) зависимости статического модуля упругости E_s от динамического E_d :

$$E_s = 0.157E_d - 1.1 \quad (R^2 = 0.88),$$

$$E_s = 1.3 \ln(E_d) - 0.2 \quad (R^2 = 0.87),$$

$$E_s = 0.76E_d^{0.55} \quad (R^2 = 0.83).$$

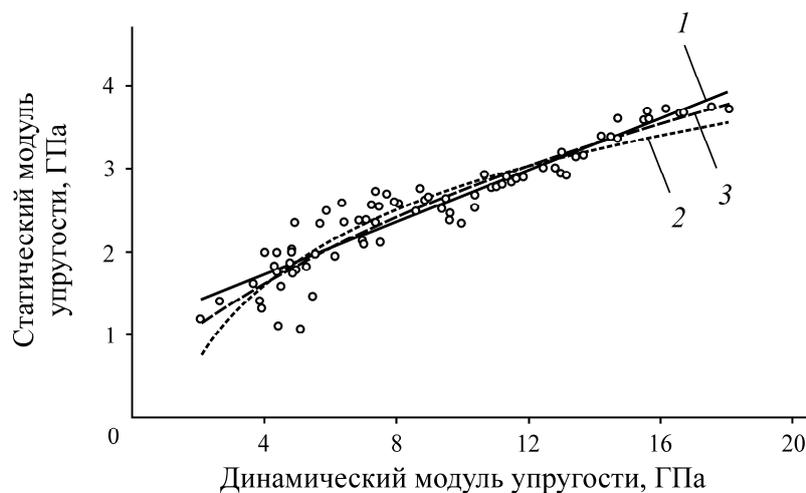


Рис. 3. Зависимости статического модуля упругости от динамического для экспериментальных составов твердеющей закладки: 1 — линейная; 2 — логарифмическая; 3 — степенная

ВЫВОДЫ

Прочностные, упругие и деформационные свойства твердеющей закладки одной марки по прочности в большей степени определяются их плотностью и влажностью. Между прочностными, упругими и деформационными свойствами твердеющей закладки, определенными в статическом и динамическом режимах при одинаковой влажности образцов, прослеживается закономерность. Это позволило получить простые в использовании линейные зависимости с высоким коэффициентом корреляции. Применение на практике полученных зависимостей может повысить оперативность и снизить трудоемкость определения прочностных, упругих и деформационных свойств закладочного массива в любые сроки подработки. Однако данные зависимости необходимо адаптировать к различной влажности твердеющей закладки, что требует дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бронников Д. М., Цыгалов М. Н.** Закладочные работы в шахтах. — М.: Недра, 1989. — 400 с.
2. **Анушенков А. Н., Стовманенко А. Ю., Волков Е. П.** Основы процессов производства и транспортирования закладочных смесей при подземной разработке месторождений полезных ископаемых. — Красноярск, 2015. — 208 с.
3. **Жуков В. С.** Оценка прочностных и упругих свойств горных пород дагинского горизонта шельфа Сахалина // ГИАБ. — 2020. — № 4. — С. 44–57.
4. **ГОСТ 10180.** Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. — М.: Стандартинформ, 2018.
5. **ГОСТ 17624-2012.** Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. — М.: Стандартинформ, 2014.
6. **ГОСТ 24452-80.** Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. — М.: Стандартинформ, 2005.
7. **ГОСТ 24544-2020.** Бетоны. Методы определения деформаций усадки к ползучести. — М.: Стандартинформ, 2021.
8. **Семенов В. И., Рубчевский Ю. И.** Оценка устойчивости обнажений выработок в физически нелинейно деформируемом рудном и закладочном массиве Яковлевского месторождения // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1. — С. 162.
9. **Wang Y., Han D.-H., Zhao L., Mitra A., and Aldin S.** An experimental investigation of the anisotropic dynamic and static properties of eagle Ford shales, SPE/AAPG/SEG Unconventional Res. Technol. Conf., 2019.
10. **Городнов А. В., Черноглазов В. Н., Равилов Н. Ш.** Упругие свойства горных пород при статических и динамических нагрузках // Геофизика. — 2017. — № 6. — С. 19–24.
11. **Eissa E. A. and Kazi A.** Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts, 1988, Vol. 25, Issue 6. — P. 479–482.
12. **Koopialipoor M., Noorbakhsh A., Ghaleini A. N., Armaghani D. J., and Yagiz S.** A new approach for estimation of rock brittleness based on non-destructive tests, Nondestructive Testing and Evaluation, 2019, Vol. 34, Issue 4. — P. 354–375.
13. **Шибяев И. А.** Определение динамических модулей упругости образцов горных пород при использовании различных методов лазерной ультразвуковой диагностики // ГИАБ. — 2021. — № 4-1. — С. 138–147.

14. **Шибает И. А., Винников В. А., Степанов Г. Д.** Определение упругих свойств осадочных горных пород на примере образцов известняка с помощью лазерной ультразвуковой диагностики // ГИАБ. — 2020. — № 7. — С. 125–134.
15. **Шибает И. А.** Определение динамических модулей упругости образцов горных пород при использовании различных методов лазерной ультразвуковой диагностики // ГИАБ. — 2021. — № 4-1. — С. 138–147.
16. **Осипов Ю. В., Кошелев А. Е.** Современные способы определения деформационных свойств горных пород // ГИАБ. — 2017. — № 11. — С. 68–75.
17. **Li Peng, Liu Xinrong, and Zhong Zuliang.** Mechanical property experiment and damage statistical constitutive model of hongze rock salt in China, *Electronic J. Geotech. Eng.*, 2015.
18. **Brotons V., Tomas R., Ivorra S., and Grediaga A. J.** Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks, Department of Civil Engineering, Madrid, Spain, 2015.
19. **Wasan I. Khalil, Waleed A. Abbas, and Ibtesam F. Nasser.** Dynamic modulus of elasticity of geopolymer lightweight aggregate concrete, 2nd Int. Conf. Sustainable Eng. Techniques (ICSET 2019), 2019. — P. 1–11.
20. **Al-Baijat H.** Dynamic modulus of elasticity of some mortars prepared from selected Jordanian Masonry cements, *Open J. Compos. Mater.*, 2019, Vol. 9. — P. 199–206.
21. **Jamshidi A., Zamanian H., and Sahamien R. Z.** The effect of density and porosity on the correlation between uniaxial compressive strength and p-wave velocity, *J. Rock Mech. Rock Eng.*, 2018, Vol. 51. — P. 1279–1286.
22. **Guzev M. Riabokon E., Turbakov M., Kozhevnikov E., and Poplygin V.** Modelling of the dynamic young's modulus of a sedimentary rock subjected to nonstationary loading, *Energies*, 2020, Vol. 23. — 6461.
23. **Рубашкина Т. И., Корнейчук М. А.** Твердеющие закладочные смеси на основе некондиционных природных песков // Горн. журн. — 2020. — № 10. — С. 84–90.
24. **Rubashkina T. I. and Korneichuk M. A.** Optimization of grading of sand in backfill using metallurgical waste, *J. Min. Sci.*, 2020, Vol. 56, No. 5. — P. 797–804.

*Поступила в редакцию 25/X 2022
После доработки 20/XI 2022
Принята к публикации 19/I 2023*