



## CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 3, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.09

УДК 691.335

### МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОСФОГИПСА И ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЕГО УТИЛИЗАЦИИ

**Ю.В. Саенко, А.М. Ширанов, А.Л. Невзоров**

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

#### О СТАТЬЕ

Получена: 23 августа 2021

Принята: 10 сентября 2021

Опубликована: 30 сентября 2021

#### Ключевые слова:

фосфогипс, дигидрат и полугидрат сульфата кальция, прочностные характеристики, деформируемость, водопроницаемость, морозостойкость.

#### АННОТАЦИЯ

Фосфогипс представляет собой многотоннажный отход, получаемый связыванием кальция в процессе сернокислотного разложения фосфатного сырья при получении экстракционной фосфорной кислоты в производстве фосфорных удобрений. В статье представлены результаты комплексных лабораторных исследований более чем 500 образцов полугидрата и дигидрата сульфата кальция.

Дигидрат сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) – твердое мелкокристаллическое вещество белого или серого цвета с включением крупных агрегатов. Деформационные, прочностные свойства и водопроницаемость дигидрата сульфата кальция определялись на специально приготовленных образцах с коэффициентом уплотнения 0,95; 0,90 и 0,80 методами, применяемыми при проведении инженерно-геологических изысканий. Угол внутреннего трения, удельное сцепление и коэффициент фильтрации дигидрата сульфата кальция имеют значения, характерные для песков пылеватых и супесей, а характеристики сжимаемости из-за растворимости частиц существенно хуже. Этому материалу свойственны просадочность и суффозионная осадка, характерные для карбонатных пород (доломит, известняк).

Полугидрат сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) – рыхлая землистая масса белого или серого цвета, по мере протекания процесса гидратации и появления цементационных связей превращается в полускальный техногенный грунт низкой прочности. Характеристики полугидрата сульфата кальция определялись на образцах ненарушенной структуры, отобранных из отвала через один и шесть месяцев, год, пять и 10 лет после складирования. Характеристики полугидрата сульфата кальция сопоставимы со строительными гипсовыми материалами из низших марок.

В качестве грунтового материала возможно применение лишь дигидрата сульфата кальция при условии осуществления водозащитных мероприятий и нейтрализации содержащихся в нем кислот, применение полугидрата сульфата кальция существенно ограничено временем его схватывания.

© ПНИПУ

© Саенко Юрий Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: yuri\_saenko@mail.ru.

Ширанов Алексей Михайлович – аспирант, ассистент, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com.

Невзоров Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru.

Yuri V. Saenko – Ph.D. in Technology, Associate Professor, e-mail: yuri\_saenko@mail.ru.

Alexey M. Shiranov – Postgraduate and Assistant, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com.

Alexander L. Nevzorov – Doctor of Technology, Professor, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru.

## MECHANICAL PROPERTIES OF PHOSPHOGYPSUM AND TRENDS ITS UTILIZATION

Y.V. Saenko, A.M. Shiranov, A.L. Nevzorov

Department of Geotechnics, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17,  
Arkhangelsk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 23 August 2021  
Accepted: 10 September 2021  
Published: 30 September 2021

#### Keywords:

phosphogypsum, calcium sulfate dihydrate and hemihydrate, strength characteristics, deformability, water permeability, frost resistance.

### ABSTRACT

Phosphogypsum is a waste obtained by binding calcium in the process of sulfuric acid decomposition of phosphate raw materials in the production of phosphorus fertilizers. The article presents the results of complex laboratory studies of more than 500 samples of calcium sulfate hemihydrate and dihydrate.

Calcium sulfate dihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) is a solid fine-crystalline substance of white or gray color with the inclusion of large aggregates. Deformability, strength properties and permeability of calcium sulfate dihydrate were determined on specially prepared samples with a relative compaction of 0.95; 0.90 and 0.80 by the methods used in engineering and geological surveys. The internal friction angle, cohesion and coefficient of permeability have values typical for silty sands and sandy loam, and the compressibility characteristics are significantly lower due to the solubility of matter. This material is characterized by subsidence and suffusion sediment characteristic of carbonate rocks (dolomite, limestone).

Calcium sulfate hemihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) – a loose earthy mass of white or gray color, as the process of hydration and the appearance of cementation bonds turns into a semi-rocky technogenic soil of low strength. The characteristics of calcium sulfate hemihydrate were determined on the undisturbed samples taken from the dump after 1 and 6 months, 1, 5 and 10 years after storage. These characteristics are comparable to construction gypsum materials from lower grades.

It is recommended to use calcium sulfate dihydrate as ground material when carrying out water-protective measures and neutralizing the acids contained in it, the use of calcium sulfate hemihydrate is significantly limited by its setting time.

© PNRPU

---

## Введение

Фосфогипс представляет собой отход производства фосфорных удобрений, который в зависимости от применяемого сырья и технологии производства состоит из полугидрата или дигидрата сульфата кальция с примесями серной и фосфорной кислот, кремнезема и других веществ [1, 2]. Ежегодно в России в отвалы, называемые гипсонакопителями, отправляется более 15 млн т фосфогипса [3].

Имеется определенный опыт применения этого многотоннажного отхода в дорожном строительстве, например в качестве добавки к щебеночным и гравийным материалам в основании дорожных одежд, где не предъявляются повышенные требования по морозостойкости [4]. Проводились исследования по его использованию в основании дорожных одежд капитального типа [5, 6]. Было исследовано влияние этого побочного продукта на удобоукладываемость и время схватывания цементного раствора [7].

Известны случаи применения фосфогипса при возведении ограждающих дамб на накопителях промышленных отходов предприятий химической промышленности [8–10]. Результатом предпроектных исследований по одному из таких объектов стали рекомендации по совершенствованию методик определения физико-механических свойств этого весьма специфического материала [11]. Для оценки возможности использования в сейсмоопасных районах изучались динамические свойства дигидратного фосфогипса [12].

В настоящей статье представлены результаты комплексных лабораторных исследований двух видов фосфогипса – полугидратного и дигидратного – как грунтового материала.

## Материалы и методы

При полугидратном технологическом процессе фосфогипс, представляющий собой рыхлую землистую массу белого или серого цвета ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), по мере протекания процесса гидратации и появления цементационных связей превращается в отвале в полускальный техногенный грунт низкой прочности ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Время начала схватывания фосфогипса с влажностью 30–35 % составляет 35–40 мин, конца схватывания – 110–120 мин. При влажности 55–60 % время начала и конца схватывания сокращается более чем в два раза. Заметим, что для предотвращения потери кристаллизованной воды влажность фосфогипса определялась высушиванием до постоянной массы при температуре  $60 \pm 2$  °С.

При дигидратном процессе после выхода с технологической линии структурные связи в фосфогипсе не образуются, в отвале он остается рыхлым мелкокристаллическим веществом или иными словами дисперсным техногенным грунтом ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Содержание частиц размером менее 0,1 мм составляет 45–85 %; от 0,1 до 0,25 мм – 5–25 %; крупнее 0,25 мм – 10–35 %, могут присутствовать включения крупных агрегатов.

Среднее значение водородного показателя обычно составляет около 3,0, через 5–10 лет из-за воздействия атмосферных осадков рН возрастает до 5,5–6,0. На предприятиях может применяться нейтрализация фосфогипса гидроксидом кальция [13].

Свойства **продукта полугидратного производства** – полускального техногенного грунта – исследовались на образцах ненарушенной структуры, отобранных из отвала через один и шесть месяцев, один, пять и 10 лет после складирования. Отбор осуществлялся в местах, где материал при укладке не уплотнялся, а при хранении не подвергался воздействию механизмов. Всего было испытано 120 образцов фосфогипса.

Предел прочности на одноосное сжатие для каждого возраста определялся на образцах-призмах размером  $40 \times 40 \times 80$  мм в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях.

Водопроницаемость исследовалась в приборах трехосного сжатия на цилиндрических образцах диаметром 70 мм и высотой 100 мм при переменном градиенте напора с подачей воды снизу вверх. Для исключения фильтрации воды на контакте с мембраной в камере прибора создавали давление 200 кПа.

Морозостойкость материала изучалась на водонасыщенных кубических образцах размером  $100 \times 100 \times 100$  мм. За показатель морозостойкости принимали максимальное число циклов замораживания-оттаивания без разрушения образцов или появления на их поверхности повреждений. Образцы выдерживались не менее 4 ч при температуре минус 15 °С, а оттаивали в воде с температурой 20 °С.

Свойства **продукта дигидратного производства** – дисперсного техногенного грунта – определялись на образцах нарушенной структуры, отобранных из отвала спустя месяц после складирования. Готовились три типа образцов – с коэффициентом уплотнения 0,95; 0,90 и 0,80. Их влажность была близка к оптимальной – 21–24 %. Примерно половина образцов испытывалась при исходной влажности, остальные образцы после загрузки в приборы насыщались водой. Всего было испытано более 390 образцов фосфогипса.

Сжимаемость исследовалась в компрессионных приборах под нагрузкой 12,5; 50; 100; 200 кПа. Коэффициент фильтрационной консолидации определялся в тех же приборах при двустороннем дренировании, нагрузка на образцы прикладывалась в одну ступень и составляла 25; 50; 100; 200 и 300 кПа, все образцы предварительно насыщались водой.

Прочностные характеристики – удельное сцепление и угол внутреннего трения – определяли в приборах прямого одноплоскостного среза по схемам консолидированно-

дренированных и неконсолидированно-недренированных испытаний при четырех значениях нормальных напряжений – 50; 100; 200 и 300 кПа. Сопротивление недренированному сдвигу  $c_u$  определяли в приборах трехосного сжатия при трех значениях давления реконсолидации  $p_{rc}$  – 100; 200 и 300 кПа.

Водопроницаемость фосфогипса изучалась в компрессионно-фильтрационных приборах при переменном градиенте напора. На образцы прикладывалась нагрузка 25; 50; 100, 200 и 300 кПа.

Усадка водонасыщенных образцов определялась при сушке в три этапа: в эксикаторе с карбонатом калия при комнатной температуре 20–24 °С, на воздухе при температуре 20–24 °С и в сушильном шкафу при температуре 60 °С.

Набухание исследовалось в стандартных приборах при отсутствии вертикальной нагрузки.

Эксперименты по определению просадочности проводились в компрессионно-фильтрационных приборах по схеме «двух кривых» при нагрузке на образцы 25; 50; 100; 200 и 300 кПа. При каждой нагрузке определялись: относительная просадочность  $\varepsilon_{sl}$ , начальное давление просадочности  $p_{sl}$  и относительное суффозионное сжатие  $\varepsilon_{sf}$  за счет растворения и выноса компонентов исследуемого материала при фильтрации воды.

## Результаты

*Продукт полугидратного производства.* Средние значения предела прочности на одноосное сжатие образцов в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии представлены на рис. 1, а, б соответственно.

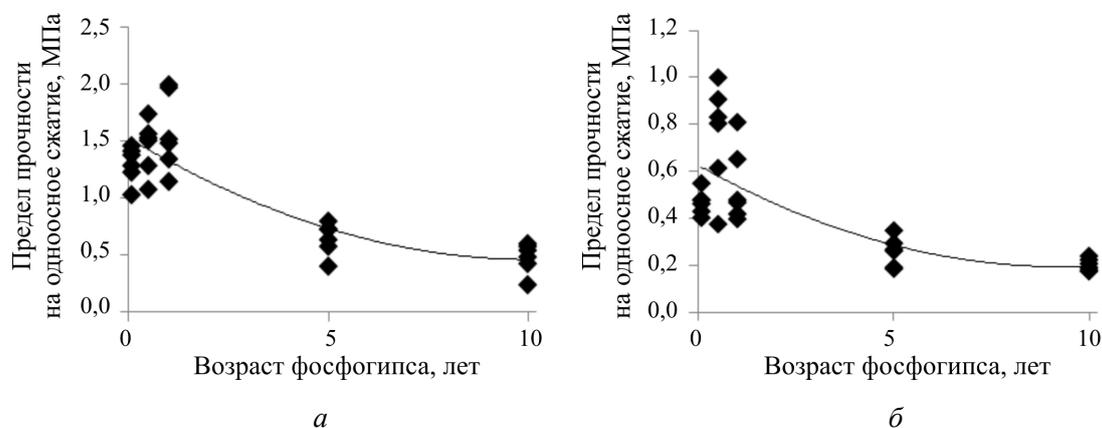


Рис. 1. Предел прочности на одноосное сжатие:  
а – воздушно-сухое состояние; б – водонасыщенное состояние  
Fig. 1. Uniaxial compressive strength: а – Dry UCS; б – Saturated UCS

Как видим, предел прочности на одноосное сжатие после складирования фосфогипса в отвал постепенно нарастал и через год достиг 1,6 МПа, насыщение водой привело к снижению этого показателя до 0,5 МПа. Результатом дальнейшего нахождения в отвале стало снижение прочности в несколько раз.

Коэффициент фильтрации фосфогипса различного возраста изменяется в довольно узком интервале – 0,28...0,35 м/сут.

Образцы фосфогипса различного возраста показали крайне низкую морозостойкость – от 3 до 8 циклов промораживания-оттаивания (табл. 1).

Таблица 1

Морозостойкость

Table 1

Frost-resistance

Возраст фосфогипса, лет	Морозостойкость, цикл	Потеря массы, %
1/12	3–5	1,01–1,45
1/2	3–8	0,95–1,89
1	4–8	0,80–1,64
5	3–7	1,34–2,03
10	3–6	1,05–1,69

*Продукт дигидратного производства.* Испытания в приборе СоюзДорНИИ показали, что при динамическом уплотнении можно достичь максимальной плотности скелета фосфогипса  $1,37 \text{ г/см}^3$  при оптимальной влажности 23 %, где влажность найдена высушиванием проб при температуре  $(60 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ .

Средние значения индекса компрессии фосфогипса при различном уплотнении и при двух значениях влажности, полученные при испытаниях в одометре, приведены в табл. 2. Вполне естественно, что при увеличении коэффициента уплотнения образцов с 0,80 до 0,95 индекс компрессии возрастает в среднем в 3,5 раза. Водонасыщение образцов с коэффициентом уплотнения 0,95 не привело к значительным изменениям сжимаемости, а вот при коэффициенте 0,80 и 0,90 увлажнение привело к уменьшению сжимаемости в 1,2...1,8 раза.

Таблица 2

Индекс компрессии

Table 2

Compression index

Влажность фосфогипса	$C_c$ , при коэффициенте уплотнения образцов		
	0,95	0,90	0,80
$W_{opt}$	0,06	0,09	0,19
$W_{sat}$	0,06	0,16	0,23

Средние значения коэффициентов первичной и вторичной консолидации –  $c_v$  и  $c_a$  приведены в табл. 3. Коэффициент вторичной консолидации дан без разделения на три типа образцов из-за его незначительной вариации.

Таблица 3

Коэффициент консолидации

Table 3

Coefficient of consolidation

Нагрузка, кПа	$c_v, \text{ м}^2/\text{г.}$ , при коэффициенте уплотнения			$c_a \cdot 10^{-3}$
	0,95	0,90	0,80	
25	5,0	4,9	2,5	1,3
50	6,3	5,6	3,3	1,6
100	9,0	7,8	4,6	2,3
200	12,9	8,3	5,9	2,9
300	11,2	7,4	7,2	2,9

Средние значения прочностных характеристик – угла внутреннего трения и сцепления – приведены в табл. 4. Первая характеристика при уплотнении образцов увеличилась незначительно – на 1,3...3,5°. Насыщение образцов водой привело к снижению  $\varphi$  на 0,6...3,4°. Удельное сцепление фосфогипса в среднем составляет 6 кПа. Существенной зависимости прочностных характеристик от условий дренирования образца не выявлено.

Таблица 4

Прочностные характеристики

Table 4

Shear strength

Способ испытаний	Влажность образцов	$\varphi, ^\circ / c, \text{кПа}$ , при коэффициенте уплотнения		
		0,95	0,90	0,80
КД	$W_{opt}$	35,2 / 6,7	34,1 / 7,2	32,4 / 7,6
	$W_{sat}$	32,3 / 6,3	30,4 / 4,7	29,0 / 5,6
НН	$W_{opt}$	32,9 / 6,0	32,0 / 5,8	29,0 / 7,4
	$W_{sat}$	29,6 / 5,9	28,9 / 5,7	28,4 / 5,7

Средние значения сопротивления недренированному сдвигу  $c_u$  приведены в табл. 5. При возрастании коэффициента уплотнения фосфогипса с 0,80 до 0,95 эта характеристика фосфогипса увеличивается более чем в 4 раза.

Таблица 5

Недренированный сдвиг

Table 5

Unconfined compression

Давление реконсолидации $p_{rc}, \text{кПа}$	$c_u, \text{кПа}$ , при коэффициенте уплотнения		
	0,95	0,90	0,80
100	110,8	53,0	24,4
200	147,4	74,0	24,6
300	185,6	88,1	39,5

Средние значения коэффициента фильтрации даны в табл. 6. При росте коэффициента уплотнения с 0,80 до 0,95 коэффициент фильтрации уменьшается в 2,5–4,5 раза в зависимости от нагрузки на образцы.

Таблица 6

Коэффициент фильтрации

Table 6

Coefficient of permeability

Нагрузка, кПа	$k, \text{м/сут}$ , при коэффициенте уплотнения		
	0,95	0,90	0,80
Отсутствует	0,091	0,165	0,431
25	0,063	0,119	0,182
50	0,056	0,096	0,146
100	0,056	0,089	0,138
200	0,056	0,074	0,112
300	0,039	0,055	0,104

Образцам с коэффициентом уплотнения 0,95 свойственно слабое набухание, при меньшем уплотнении фосфогипс не набухает. При сушке образцов проявлений усадки не наблюдалось.

Показатели просадочности при замачивании водой – относительная просадочность  $\varepsilon_{sl}$ , начальное давление просадочности  $p_{sl}$  и относительное суффозионное сжатие  $\varepsilon_{sf}$  за счет растворения и выноса компонентов исследуемого материала при фильтрации воды приведены в табл. 7. При росте коэффициента уплотнения с 0,80 до 0,95 относительная просадочность и суффозионное сжатие уменьшаются в 14–37 и 2,7–4,5 раза соответственно.

Таблица 7

Просадочность и суффозионное сжатие

Table 7

Subsidence and suffusion

Коэффициент уплотнения образцов	$\varepsilon_{sl} \cdot 10^{-2}$ , под нагрузкой, кПа					$p_{sl}$ , кПа	$\varepsilon_{sf} \cdot 10^{-2}$ , под нагрузкой, кПа				
	25	50	100	200	300		25	50	100	200	300
0,95	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	> 300	0,4	0,7	1,3	1,6	1,7
0,90	0,2	0,3	0,7	2,0	2,7	30	0,6	1,1	1,8	2,0	2,1
0,80	3,5	3,7	4,3	4,4	4,9	< 25	2,2	2,8	3,5	4,6	5,8

## Заключение

*Продукт полугидратного производства.* По данным Н.Н. Башкатова и Ю.М. Бутта [14, 15], плотность природного гипсового камня составляет обычно 2,20–2,40 г/см<sup>3</sup>. Плотность исследованных образцов фосфогипса в среднем в 2 раза меньше природного гипса и составляет 1,20 г/см<sup>3</sup>, в дальнейшем по мере нахождения в отвале в результате химической и механической суффозии массива наблюдается ее снижение до 0,92 г/см<sup>3</sup> [16]. Указанные процессы являются причиной снижения прочности фосфогипса при длительном нахождении в отвале [17]. Если в течение первого года материал набирал прочность, то в последующем его прочность снижалась и через 10 лет достигала значений 0,2–0,5 МПа, что более чем в четыре раза ниже минимальной марки гипсового вяжущего [18].

Процессы суффозии не привели к столь же значительному изменению водопроницаемости – коэффициент фильтрации фосфогипса на протяжении 10 лет изменялся мало. Водопроницаемость этого материала примерно такая же, как у пылеватых песков и супесей.

Отличительной особенностью фосфогипса, кроме низкой прочности, является практически полное отсутствие морозостойкости, что характерно для всех строительных материалов и изделий на гипсовом вяжущем [19].

*Продукт дигидратного производства.* Исследуемый материал, уплотненный до коэффициента уплотнения 0,95, может быть отнесен к среднедеформируемым грунтам, а при меньшем уплотнении – к сильнодеформируемым грунтам. Причем, если насыщение водой образцов с коэффициентом уплотнения 0,95 практически не влияло на сжимаемость, то у образцов с меньшей исходной плотностью это приводило к быстрому нарастанию деформаций.

Полученные значения коэффициентов консолидации характерны для сильно деформируемых грунтов, что, скорее всего, объясняется не медленным удалением воды из пор или ползучестью скелета, как в глинистых водонасыщенных грунтах, а растворением частиц.

Как оказалось, фосфогипс имеет значения удельного сцепления и угла внутреннего трения, характерные для песков или супесей, причем, как и у этих грунтов, указанные величины слабо зависят от условий испытания.

По значению сопротивления недренированному сдвигу фосфогипс с коэффициентом уплотнения 0,95; 0,90 и 0,80 относится к грунтам высокой, средней и низкой прочности соответственно [20].

Фосфогипс с коэффициентом уплотнения 0,95 обладает слабым набуханием, при меньшей исходной плотности набухания не происходило. Усадка не наблюдалась при любой плотности образцов. Фосфогипсу свойственны просадочность и суффозионное сжатие. Длительная фильтрация воды через его массив приведет к развитию суффозионной осадки.

*Рекомендации к применению фосфогипса.* Проведенные комплексные лабораторные исследования двух типов фосфогипса показали, что этот материал может иметь лишь ограниченное применение в качестве грунтового материала, например: в основании и теле земляного полотна автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения и переходным покрытием, заполнения карьерных выемок и т.п. Возможно применение при устройстве ограждающих дамб на накопителях твердых бытовых и промышленных отходов, а также при технической рекультивации указанных накопителей. При этом рекомендуется укладку дигидрата сульфата кальция выполнять с уплотнением до коэффициента уплотнения не менее 0,95, что позволит снизить его водопроницаемость и достичь максимально возможных значений деформационно-прочностных характеристик. Для формирования монолитного массива из полугидрата сульфата кальция с наибольшими значениями предела прочности время его транспортировки от места погрузки не должно превышать срока начала схватывания.

При использовании этого отхода химической промышленности следует принимать во внимание его низкую морозостойкость и подверженность химической суффозии, а также необходимость нейтрализации содержащихся в нем кислот.

## Библиографический список

1. Study on the Properties of Waste Apatite Phosphogypsum as a Raw Material of Prospective Applications / K. Grabas, A. Pawełczyk, W. Stręk, E. Szełęg, S. Stręk // Waste and Biomass Valorization. – 2019. – Iss. 10, – P. 3143–3155. DOI: 10.1007/s12649-018-0316-8.
2. Effects of pH and Fineness of Phosphogypsum on Mechanical Performance of Cement–Phosphogypsum-Stabilized Soil and Classification for Road-Used Phosphogypsum / B. Peng, Z. Yang, Z. Yang, J. Peng // Coatings. – 2020. – Vol. 10. – P. 1021. DOI: 10.3390/coatings10111021.
3. Условия получения фосфогипса как отхода – побочного продукта производства азотно–фосфорных удобрений / А.В. Кочетков, Н.В. Щеголева, С.А. Коротковский, В.В. Талай, Ю.Э. Васильев, И.Г. Шашков // Транспортные сооружения. – 2019. – Вып. 10. – С. 6–2.
4. Производство и применение в строительстве вяжущих и изделий на основе фосфогипса: сб. трудов. – Каунас: НИИСиА Госстроя ЛитССР, 1983.
5. Новые методы переработки и применения каменных материалов и отходов промышленности в дорожном строительстве. – М.: СоюздорНИИ, 1982.
6. Проблемы производства экстракционной фосфорной кислоты и охрана природы: тезисы докладов. – М.: НИУИФ, 1985.
7. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material // Cleaner Production. – 2017. – № 166. – С. 732–743. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049.

8. Павич М.П. Проектирование и строительство грунтовых плотин особого типа. – М.: Энергоиздат, 1981.
9. Анализ основных направлений утилизации фосфогипса – отхода производства фосфорной кислоты / И.А. Трунова, Р.В. Сидоренко, С.В. Вакал, Э.А. Карпович // *Екологічна безпека*. – 2010. – Вып. 2. – С. 31–35.
10. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of phosphogypsum / T. Lu, W. Wang, Z. Wei, Y. Yang, G. Cao // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – № 1. DOI: 10.1007/s11356-020-12148-2.
11. Кудашов Е.С. Инженерно-геологическое обоснование устойчивости намывных гипсонакопителей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2015.
12. Файзиев Х.М., Сагдиев Т.Г. Ограждающие дамбы гидроотвалов, возводимые из отходов производства – фосфогипсов // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева* – 2008. – № 250. – С. 100–107.
13. Фосфогипсовые отходы химической промышленности в производстве стеновых изделий / Р.Н. Мирсаев, С.С. Юнусова, В.В. Бабков, Л.К. Кузнецов, И.В. Недосеко, А.И. Габитов. – М.: Химия, 2004. – 176 с.
14. Башкатов Н.Н. Минеральные воздушные вяжущие вещества. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 148 с.
15. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. – М.: Высш. школа, 1980. – 472 с.
16. Нурмагомедов Т.Н. Изученность фильтрационных процессов разрушения гипсосодержащих пород оснований гидротехнических сооружений // *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 676–679.
17. Influence of  $\alpha$ -Calcium Sulfate Hemihydrate on Setting, Compressive Strength, and Shrinkage Strain of Cement Mortar / B. Lee, G. Kim, J. Nam, K. Lee, G. Kim, S. Lee, K. Shin, T. Koyama // *Materials*. – 2019. – № 12. – С. 163. DOI: 10.3390/ma12010163.
18. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 463 с.
19. Lushnikova N., Dvorkin L. Sustainability of gypsum products as a construction material // *Sustainability of Construction Materials*. – 2nd edition. – 2016. – Chapter 25. – P. 643–682.
20. Uniform Building Code. – California, USA: International Conference of Building Officials, 1997.

## References

1. Grabas K., Pawełczyk A., Stręk W., Szełęg E., Stręk S. Study on the Properties of Waste Apatite Phosphogypsum as a Raw Material of Prospective Applications. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, iss. 10 (10) pp. 3143–3155. DOI: 10.1007/s12649-018-0316-8.
2. Peng B., Yang Z., Yang Z., Peng J. Effects of pH and Fineness of Phosphogypsum on Mechanical Performance of Cement–Phosphogypsum-Stabilized Soil and Classification for Road-Used Phosphogypsum. *Coatings*, 2020 iss. 10 p. 1021. DOI: 10.3390/coatings10111021.
3. Kochetkov A.V., Shchegoleva N.V., Korotkovsky S.A., Talalay V.V., Vasiliev Yu.E., Shashkov I.G. Usloviya polucheniya fosfogipsa kak otkhoda – pobochnogo produkta proizvodstva azotno–fosfornykh udobreniy [Conditions for obtaining phosphogypsum as a waste – a by-product of the production of nitrogen-phosphorus fertilizers] *Transportnyye sooruzheniya*, 2019, vol. 10 no. 10, pp. 6–2.

4. Proizvodstvo i primeneniye v stroitel'stve vyazhushchikh i izdeliy na osnove fosfogipsa [Production and use in construction of binders and products based on phosphogypsum] – proceedings, Kaunas, USSR: NIISIA Gosstroya LitSSR, 1983.

5. Novyye metody pererabotki i primeneniya kamennykh materialov i otkhodov promyshlennosti v dorozhnom stroitel'stve [New methods of processing and use of stone materials and industrial waste in road construction]. Moscow, USSR: SoyuzdorNII, 1982.

6. Problemy proizvodstva ekstraktsionnoy fosfornoй kisloty i okhrana prirody [Problems of extraction phosphoric acid production and nature conservation]. proceedings, Moscow, USSR: NIUIF, 1985.

7. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material. *Cleaner Production*, 2017, no. 166, pp. 732–743, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049.

8. Pavchich M.P. Proyektirovaniye i stroitel'stvo gruntovykh plotin osobogo tipa [Design and construction of special type earth dams]. – Moscow, Russia: Energoizdat, 1981.

9. Trunova I.A., Sidorenko R.V., Vakal S.V., Karpovich E.A. Analiz osnovnykh napravleniy utilizatsii fosfogipsa – otkhoda proizvodstva / fosfornoй kisloty [Analysis of the main directions of utilization of phosphogypsum – production waste / phosphoric acid]. *Ekologichna bezpeka*, 2010, vol. 2, pp. 31–35.

10. Lu T., Wang W., Wei Z., Yang Y., Cao G. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of phosphogypsum. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, no. 1, DOI: 10.1007/s11356-020-12148-2.

11. Kudashov Ye.S. Inzhenerno-geologicheskoye obosnovaniye ustoychivosti namyvnykh gipsonakopiteley [Engineering-geological substantiation of the stability of reclaimed gypsum pits] Abstract of Ph.D. thesis Sankt-Peterburg, 2015.

12. Fayziyev KH.M., Sagdiyev T.G. Ograzhdayushchiye damby gidrootvalov, vozvodimyye iz otkhodov proizvodstva – fosfogipsov [Fencing dams of hydraulic dumps, constructed from production waste – phosphogypsum]. *Izvestia VNIIG im. B.E. Vedeneeva*, 2008, no. 250, pp. 100–107.

13. Mirsayev R.N., Yunusova S.S., Babkov V.V., Kuznetsov L.K., Nedoseko I.V., Gabitov A.I. Fosfogipsovyye otkhody khimicheskoy promyshlennosti v proizvodstve stenovykh izdeliy [Phosphogypsum wastes of the chemical industry in the production of wall products], Moscow: Khimiya, 2004, 176 p.

14. Bashkatov N.N. Mineral'nyye vozdushnyye vyazhushchiye veshchestva [Mineral air binders]. – Ekaterinburg: Ural University publishing, 2018, 148 p.

15. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh materialov [Chemical technology of binders], Moscow, Vysshaya Shkola, 1980, 472 p.

16. Nurmagedov T.N. Izuchennost' fil'tratsionnykh protsessov razrusheniya gipsosoderzhashchikh porod osnovaniy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Study of filtration processes of destruction of gypsum-containing rocks of the foundations of hydraulic structures], *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy*, 2018, vol. 1, no 9, pp. 676–679.

17. Lee B., Kim G., Nam J., Lee K., Kim G., Lee S., Shin K., Koyama T. Influence of  $\alpha$ -Calcium Sulfate Hemihydrate on Setting, Compressive Strength, and Shrinkage Strain of Cement Mortar. *Materials*, 2019, no. 12, pp. 163. DOI: 10.3390/ma12010163.

18. Volzhenskiy A.V. Mineral'nyye vyazhushchiye veshchestva [Mineral binders], 4th ed., Moscow, Strojizdat, 1986, 463 p.

19. Lushnikova N., Dvorkin L. Sustainability of gypsum products as a construction material // Sustainability of Construction Materials, 2nd edition, 2016, Chapter 25, pp. 643–682.

20. Uniform Building Code 1997 (California: International Conference of Building Official).