

of the Energy of Donbass Regional Enterprise, Starobeshevskaya TPP]. *Portal magistrrov Donetskogo tekhnicheskogo universiteta* [Donetsk Technical University Master's Portal]. Available at: masters.donntu.runparso.ru.

24. Solokha N. S. Tendentsii razvitiya stroitelstva teplovikh elektrostantsii v Rossii [Trends in the development of thermal power plant construction in Russia]. *Studencheskii nauchnii forum : sbornik materialov XVIII Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii* [Student Scientific Forum: Proceedings of the XVIII International Student Scientific Conference]. 2026. Available at: scienceforum.ru.

© Р. И. Шаяхмедов, Ю. И. Убогович, В. Ф. Протопопов

Ссылка для цитирования:

Шаяхмедов Р. И., Убогович Ю. И., Протопопов В. Ф. Использование процесса доменного пиролиза для переработки бытовых и промышленных отходов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 26–33.

УДК 691.311

DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-33-37

ПОЛУЧЕНИЕ ФИБРОПЕНОГИПСА НА ОСНОВЕ ФОСФОГИПСА

А. А. Провоторов, Е. В. Тарарушкин

Провоторов Алексей Александрович, аспирант, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; e-mail: prov40@mail.ru;

Тарарушкин Евгений Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; e-mail: evgeny.tararushkin@yandex.ru

Использование фосфогипса при производстве строительных материалов и изделий является актуальным благодаря утилизации многоотнажных отходов химической промышленности и дешевизне минерального вяжущего. В настоящей работе рассмотрены вопросы, связанные с получением фибропеногипса на основе фосфогипса. Рассмотрены такие вопросы, как получение стабильной пены на основе синтетического пенообразователя, равномерное распределение в пене полипропиленовой фибры, дозировка фосфогипса в заранее подготовленную пену с фиброй, формование и твердение фибропеногипсовой смеси. В результате исследования получены образцы фибропеногипса плотностью 284 кг/м³. Прочность образцов на сжатие составила 0,6 МПа, а прочность при изгибе – 0,05 МПа. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов показало, что композитный материал на основе фосфогипса относится к I классу.

Ключевые слова: утилизация отходов химической промышленности, фосфогипс, фибропеногипс, прочность, активность радионуклидов.

FIBER-REINFORCED LIGHTWEIGHT FOAMED COMPOSITE BASED ON PHOSPHOGYPSUM

A. A. Provotorov, Ye. V. Tararushkin

Provotorov Aleksey Aleksandrovich, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation; e-mail: prov40@mail.ru;

Tararushkin Yevgeniy Viktorovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Buildings and Structures in Transport Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation; e-mail: evgeny.tararushkin@yandex.ru

The utilization of phosphogypsum in building materials presents a promising avenue for recycling high-volume industrial waste while providing a low-cost mineral binder. This study investigates the production of a lightweight, fiber-reinforced foam composite from phosphogypsum. Key procedural steps—including the generation of stable foam with a synthetic agent, uniform dispersion of polypropylene fiber, precise dosing of phosphogypsum, and subsequent molding and curing – are examined. The resulting composite exhibits a density of 284 kg/m³, with compressive and flexural strengths of 0,6 MPa and 0,05 MPa, respectively. Radiological assessment confirms that the specific effective activity of natural radionuclides classifies the material as Class I, confirming its safety for use in construction.

Keywords: waste disposal, phosphogypsum, fiber-reinforced foam gypsum, strength, radionuclide activity.

Введение

При производстве строительных материалов широко применяются различные виды природных соединений на основе сульфата кальция – ангидрит (CaSO₄), бассанит (CaSO₄·0,5H₂O) и гипс (CaSO₄·2H₂O) [1–4]. Гипс является неотъемлемой составляющей портландцемента, а различные формы ангидрита и бассанита активно используются при производстве штукатурных смесей и гипсокартонных листов [1–5]. В то же время существует значительная экологическая проблема, связанная с накоплением огромных

объемов гипсосодержащих отходов (фосфогипса), являющихся побочным продуктом переработки фосфоритов в минеральные удобрения [6, 7]. Ежегодный объем образования фосфогипса (ФГ) в мире оценивается в 100–300 млн т [8]. Проблема его утилизации стоит достаточно остро, и одним из перспективных направлений является использование ФГ в строительной отрасли [9, 10]. Однако широкому применению фосфогипса препятствуют нестабильность химического и фазового состава, а также наличие примесей, в частности соединений фосфора [11–13].

В последнее время технологии очистки фосфогипса совершенствуются, что позволяет получать продукт с минимальным содержанием примесей. Например, в Китайской Народной Республике за последние 10 лет доля перерабатываемого ФГ возросла с 20 до 45 % [12]. Библиометрическое исследование [14] показывает, что за последние 20 лет количество публикаций, посвященных утилизации фосфогипса, выросло как минимум на порядок. Причем большинство исследований посвящено проблемам наличия примесей в ФГ и его применению в строительной отрасли. Совершенствование методов очистки фосфогипса открывает перспективы для его использования при производстве различных строительных материалов и изделий, в том числе пеногипса. В то же время в нашей стране сведений о производстве пеногипса на основе ФГ и его характеристиках крайне мало, хотя за рубежом такие исследования проводятся [15].

Пеногипс является эффективным теплоизоляционным материалом, обладающим рядом положительных свойств: хорошая формуемость и удобоукладываемость смеси; короткие сроки схватывания и, следовательно, быстрый технологический процесс; повышенные теплоизоляционные характеристики; хорошая огнестойкость; хорошая обрабатываемость изделий; доступная стоимость исходных компонентов [16]. В связи с этим впервые вводится национальный стандарт на пеногипс (ГОСТ Р 72224-2025 «Теплоизоляционные материалы и изделия. Пеногипс и изделия из него. Технические условия»), устанавливающий технические требования к этому материалу [17]. Данный стандарт распространяется только на изделия из пеногипса, предназначенные для применения в качестве теплоизоляции в конструкциях, защищенных от воздействия влаги. Тем самым подчеркивается один из главных недостатков данного материала – низкая водостойкость. Несмотря на это, перспективы применения изделий из пеногипса достаточно высоки, прежде всего благодаря доступной стоимости исходных компонентов. При использовании фосфогипса себестоимость пеногипса становится еще ниже. В то же время при изготовлении пеногипса на основе ФГ могут возникать как технологические проблемы, так и проблемы, связанные с экологическими вопросами. Например, непостоянство химического состава как пенообразователя, так и самого вяжущего. Из-за нестабильности их составов возможно формирование неоднородных пеногипсовых смесей и, как следствие, появление брака при производстве. Известна также трудность с радиоактивностью гипса и фосфогипса (особенно последнего). Поэтому в ГОСТ Р 72224-2025 указано, что удельная эффективная активность естественных радионуклидов в изделиях из пеногипса не должна превышать 370 Бк/кг.

Целью настоящей работы является изучение возможности получения фибропеногипса на основе очищенного ФГ, разработка предварительной рецептуры композита, а также определение его физико-механических характеристик и удельной активности естественных радионуклидов.

Материалы

В качестве минерального вяжущего для получения фибропеногипса использовали фосфогипс завода минеральных удобрений АО «ВМУ», предварительно подвергнутый комплексной очистке от примесей. Результаты физико-химических исследований показали, что после отмывания в нем по-прежнему остаются так называемые Р-примеси в количестве 1–2 % [18]. При этом основной фазой в ФГ является минерал бассанит ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) в виде α -полугидрата.

Согласно ГОСТ Р 72224-2025 для производства пеногипса необходимо применение синтетических пенообразователей на основе вторичных алкилсульфонатов натрия. Поэтому для формирования пены использовали синтетический пенообразователь ПБ-2000 – водный раствор анионных поверхностно-активных веществ (ПАВ) со стабилизирующими добавками. В качестве ПАВ в данном пенообразователе применяются алкилсульфонаты натрия с различной длиной алкильной цепи ($\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{OSO}_3\text{Na}$, $n = 7, 9, 11, 13$), а в качестве стабилизаторов – спирты синтанол и бутанол.

Для дисперсного армирования пеногипса использовали полипропиленовую фибру длиной 12 мм.

Вода соответствовала требованиям ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

Указанные компоненты использовали для получения фибропеногипса со средней плотностью 250–300 кг/м³ в сухом состоянии.

Результаты и обсуждение

Технология поризации композитного материала включала отдельное приготовление пены и введение сухого вяжущего – использовали метод сухой минерализации. Процесс был разделен на три основные стадии: генерация пены с использованием фибры; добавление сухого фосфогипса в предварительно приготовленную пену с фиброй; формирование смеси.

Генерация пены с добавлением фибры осуществлялась в высокоскоростном смесителе. Сначала в смеситель подавали воду, затем вводили пенообразователь и потом фибру. После добавления всех компонентов проводили их перемешивание. Частота вращения рабочего органа смесителя составляла около 370 об/мин. Было установлено, что скорость перемешивания является критически важным параметром, обеспечивающим решение следующих задач: интенсивный подвод энергии, необходимый для получения стабильной пены с равномерным распределением пузырьков воздуха; эффективное диспергирование и смачивание фибры, что предотвращает ее слипание и образование комков. В результате кратность пены составила $K = 10$, что является приемлемым значением для изготовления ячеистых строительных композитов [19].

Сразу после приготовления пены с добавлением фибры в тот же смеситель порционно вводили расчетное количество ФГ. Перемешивание смеси проводили на высоких оборотах в течение 2–3 мин.

Готовую фибропеногипсовую смесь разливали в стальные формы размером 100 × 100 × 100 мм³ и 40 × 40 × 160 мм³ для последующих испытаний на

прочность при сжатии и изгибе (рис. 1). Начало и конец схватывания смеси составили в среднем 15 и 30 мин. Оба значения соответствуют требованиям ГОСТ Р 72224-2025, согласно которому начало схватывания должно быть не более 20 ± 5 мин., а конец – не более 40 ± 5 мин. Как известно, высокая скорость твердения гипса является ключевым технологическим преимуществом. Быстрый набор прочности позволяет проводить распалубку и дальнейшую обработку изделий в сжатые сроки, что ускоряет технологический процесс их изготовления [16].

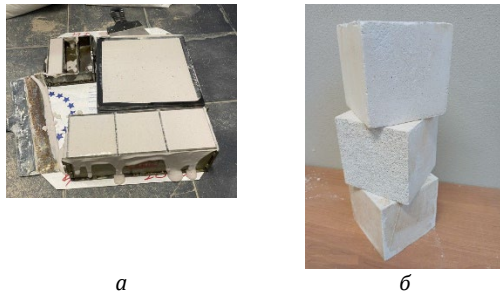


Рис. 1. Приготовление образцов фибропеногипса на основе фосфогипса:

а – заливка смеси в стальные формы; б – образцы-кубы (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Preparation of fiber-reinforced foam gypsum samples based on phosphogypsum:

a – pouring the mixture into steel molds; b – cube samples (illustration by the authors)

В ходе серии испытаний были проверены, уточнены составы и параметры технологических операций. В результате для получения 1 м^3 опытного образца был обоснован и установлен следующий массовый расход компонентов, который указан в таблице 1.

Таблица 1

Расход компонентов для получения фибропеногипса на основе фосфогипса

№ п/п	Компоненты смеси	Содержание компонентов, % по массе
1	2	3
2	Фосфогипс (очищенный)	65,4
3	Пенообразователь	0,17
4	Фибра	0,23
5	Вода	34,2

После твердения образцы высушивали до постоянной массы. По результатам измерений геометрических параметров образцов-кубов и их массы средняя плотность фибропеногипса составила 284 кг/м^3 . Таким образом, было выполнено требование ГОСТ Р 72224-2025, согласно которому плотность пеногипса не должна превышать 300 кг/м^3 . Для сравнения были также изготовлены образцы пеногипса на основе ФГ без добавления фибры; их средняя плотность составила 279 кг/м^3 .

Испытания на прочность при сжатии проводили по ГОСТ Р 72224-2025 на образцах-кубах при постоянной скорости нарастания нагрузки (50 ± 10) Н·с⁻¹; при изгибе – на образцах-балочках со скоростью

нагрузки ($0,05 \pm 0,02$) Н/мм²·с⁻¹ (ГОСТ 25485-2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия»). Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Согласно ГОСТ Р 72224-2025 предел прочности при сжатии пеногипса должен составлять не менее 0,5 МПа. Как видно, значения прочности при сжатии образцов фибропеногипса и пеногипса превышают требуемый показатель. Испытания при изгибе показали незначительный прирост прочности у образцов с фиброй, что является ожидаемым.

Таблица 2

Результаты прочности на сжатие и изгиб фибропеногипса на основе фосфогипса

№ п/п	Наименование материала	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа
1	2	3	4
2	Фибропеногипс	0,6	0,05
3	Пеногипс	0,6	0,04

Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов в образцах фибропеногипса проводили на гамма-спектрометре DSPec фирмы ORTEC. Исследование проб в порошкообразном состоянии показало, что удельная эффективная активность радионуклидов составляет 40 Бк/кг, что ниже максимального допустимого значения (370 Бк/кг), установленного ГОСТ Р 72224-2025. Основной вклад в радиоактивный фон материала вносят радий (²²⁶Ra) и торий (²³²Th); их удельные активности составили 33 и 5 Бк/кг соответственно.

Выводы

В результате испытаний получены образцы фибропеногипса на основе предварительно очищенного фосфогипса. Полученные материалы соответствуют требованиям введенного ГОСТ Р 72224-2025 «Теплоизоляционные материалы и изделия. Пеногипс и изделия из него. Технические условия» по плотности, прочности и удельной эффективной активности естественных радионуклидов.

В дальнейшем планируется проведение исследований по определению других свойств материала: теплопроводности, паропроницаемости, сорбционной влажности, водопоглощения. Предполагается также выполнить подбор оптимального состава фибропеногипса с использованием методов планирования экспериментов.

Следует также отметить, что тема производства строительных материалов из отходов промышленности и строительного сноса не является новой. Так, еще Е. Г. Челиев в книге 1825 г. [20] предложил метод производства мертеля или цемента низкого качества (мертель № 3) из «мусора стенного и штукатурного» (карбонизированная гашеная известь, толченая черепица, кирпичная мука), в том числе с добавлением «крепко перезженного гипса» для лучшего твердения мертеля. Однако до сих пор отсутствует системный подход к использованию отходов промышленности и строительства для производства новых строительных материалов и изделий.

Список литературы

1. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) : справочник / под общ. ред. А. В. Ферронской. – Москва : АСВ, 2004. – 488 с.
2. Соколова Ю. А. Эффективные композиционные материалы на основе низкомарочного строительного гипса / Ю. А. Соколова, И. В. Морева. – Москва : ООО «Русайнс», 2024. – 332 с.
3. Губская А. Г. Гипс и материалы на его основе / А. Г. Губская, О. Н. Лебедева, В. С. Меленько, Е. А. Урецкая. – Минск : Стринко, 2009. – 184 с.
4. Бурьянов А. Ф. Гипс, его исследование и применение – от П. П. Будникова до наших дней / А. Ф. Бурьянов // Строительные материалы. – 2005. – № 9. – С. 40–44.
5. Братчун В. И. Исследование стыков гипсокартонных плит KNAUF при изгибе / В. И. Братчун, Р. И. Игнатенко // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2014. – № 6 (110). – С. 57–63.
6. Охинько В. А. Актуальные проблемы экологии и экологической безопасности и возможные пути их решения / В. А. Охинько, В. В. Милованов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2015. – № 3 (13). – С. 37–38.
7. Bilal E. Phosphogypsum circular economy considerations: a critical review from more than 65 storage sites worldwide / E. Bilal, H. Bellefqih, V. Bourgier, et al. // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 414. – P. 137561. – <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137561>.
8. Bellefqih H. Effect of HPO_4^{2-} and brushite on gypsum reactivity and implications for utilization of phosphogypsum in plaster production / H. Bellefqih, V. Bourgier, E. Bilal, et al. // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 451. – P. 142013. – <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142013>.
9. Соболев Ю. Б. Новые технологические подходы в производстве искусственного гипсового камня из фосфогипса / Ю. Б. Соболев, А. М. Абрамов, Э. В. Полумиев // Строительные материалы. – 2022. – № 8. – С. 31–35. – <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-31-35>.
10. Алфимова Н. И. Использование фосфогипса как сырья для производства многокомпонентных вяжущих и сульфоалюминатных цементов / Н. И. Алфимова, К. М. Левицкая, А. Ф. Бурьянов // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 2 (59). – С. 30–46. – https://doi.org/10.54734/20722958_2024_2_30.
11. Murakami K. Procedures for the chemical analysis of impurities of phosphogypsum / K. Murakami, H. Tanaka, K. Sato // Gypsum & Lime. – 1967. – Vol. 91. – P. 249–255.
12. Yang J. Review on high-value utilization of phosphogypsum: Utilization of calcium and oxygen resources present in phosphogypsum / J. Yang, S. Dong, L. Ma, et al. // Separation and Purification Technology. – 2024. – Vol. 344. – P. 127246. – <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127246>.
13. Xie Z. Application of the industrial byproduct gypsum in building materials: A review / Z. Xie, X. Liu, Z. Zhan, et al. // Materials. – 2024. – Vol. 17. – P. 1837. – <https://doi.org/10.3390/ma17081837>.
14. Wei Z. Research hotspots and trends of comprehensive utilization of phosphogypsum: Bibliometric analysis / Z. Wei, Z. Deng // Journal of Environmental Radioactivity. – 2022. – Vol. 242. – P. 106778. – <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106778>.
15. Tian T. Utilization of original phosphogypsum for the preparation of foam concrete / T. Tian, Y. Yan, Z. Hu, et al. // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 115. – P. 143–152. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.028>.
16. Бессонов И. В. Пеногипс в современном малоэтажном строительстве / И. В. Бессонов, А. Ф. Бурьянов // Жилищное строительство. – 2024. – № 5. – С. 26–34. – <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-5-26-34>.
17. Бессонов И. В. Утвержден национальный стандарт на пеногипсовый утеплитель / И. В. Бессонов, А. Ф. Бурьянов // Жилищное строительство. – 2025. – № 8. – С. 5–8. – <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-838-8-5-8>.
18. Провоторов А. А. Влияние поверхностно-активного вещества на твердение и прочность фосфогипса / А. А. Провоторов, Е. В. Тарарушкин // Экономика строительства. – 2026. – № 1. – С. 590–593.
19. Бессонов И. В. Пеногипс в строительстве / И. В. Бессонов, А. Ф. Бурьянов. – Москва : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2024. – 132 с.
20. Челиев Е. Г. Полное наставление, как приготавливать дешевый и лучший мертель или цемент, весьма прочный для подводных строений, как-то: каналов, мостов, бассейнов, плотин, подвалов, погребов, и штукатурки каменных и деревянных строений. Изданное по опыту произведенных в натуре строений, начальником Московской военнорабочей бригады мастерских команд 2 го разряда, 6 го класса и кавалером Челиевым / Е. Г. Челиев. – Москва : Вольная типография Пономарева, 1825. – 28 с.

References

1. Ferronskaya A. V. (ed.) *Gipsovie materialy i izdeliya (proizvodstvo i primeneniye)* [Gypsum materials and products (production and application)]. Moscow: ASV; 2004, 488 p.
2. Sokolova Yu. A., Moreva I. V. *Effektivnie kompozitsionnie materialy na osnove nizkomarochnoogo stroitel'nogo gipsa* [Effective composite materials based on low-grade building gypsum]. Moscow: ООО "Rusains"; 2024, 332 p.
3. Gubskaya A. G., Lebedeva O. N., Melenko V. S., Uretskaya Ye. A. *Gips i materialy na ego osnove* [Gypsum and materials based on it]. Minsk : Strinko; 2009, 184 p.
4. Buryanov A. F. Gips, yego issledovanie i primeneniye - ot P. P. Budnikova do nashikh dnei [Gypsum, its research and application - from P. P. Budnikov to the present day]. *Stroitel'nie materialy* [Building Materials]. 2005, no. 9, pp. 40–44.
5. Bratchun V. I., Ignatenko R. I. Issledovanie stykov gipsokartonnykh plit KNAUF pri izgibe [Study of joints of KNAUF gypsum plasterboards during bending]. *Vestnik Donbasskoi natsionalnoi akademii stroitel'stva i arkhitekturi* [Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 6 (110), pp. 57–63.
6. Okhinko V. A., Milovanov V. V. Aktualnie problemi ekologii i ekologicheskoi bezopasnosti i vozmozhnie puti ikh resheniya [Current problems of ecology and environmental safety and possible solutions]. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2015, no. 3 (13), pp. 37–38.
7. Bilal E., Bellefqih H., Bourgier V., et al. Phosphogypsum circular economy considerations: a critical review from more than 65 storage sites worldwide. *Journal of Cleaner Production*. 2023, vol. 414, pp. 137561. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137561>.

8. Bellefqih H., Bourquier V., Bilal E., et al. Effect of HPO_4^{2-} and brushite on gypsum reactivity and implications for utilization of phosphogypsum in plaster production. *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 451, pp. 142013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142013>.
9. Sobol Yu. B., Abramov A. M., Polumiev E. V. Novie tekhnologicheskie podkhodi v proizvodstve iskusstvennogo gipsovogo kamnya iz fosfogipsa [New technological approaches in the production of artificial gypsum stone from phosphogypsum]. *Stroitelnie materialy* [Building Materials]. 2022, no. 8, pp. 31–35. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-31-35>.
10. Alfimova N. I., Levitskaya K. M., Buryan A. F. Ispolzovanie fosfogipsa kak sirya dlya proizvodstva mnogokomponentnykh vyazhushchikh i sulfoaluminatnykh tsementov [Use of phosphogypsum as a raw material for the production of multicomponent binders and sulfoaluminate cements]. *Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo* [Regional Architecture and Construction]. 2024, no. 2 (59), pp. 30–46. https://doi.org/10.54734/20722958_2024_2_30.
11. Murakami K., Tanaka H., Sato K. Procedures for the chemical analysis of impurities of phosphogypsum. *Gypsum & Lime*. 1967, vol. 91, pp. 249–255.
12. Yang J., Dong S., Ma L., et al. Review on high-value utilization of phosphogypsum: Utilization of calcium and oxygen resources present in phosphogypsum. *Separation and Purification Technology*. 2024, vol. 344, pp. 127246. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127246>.
13. Xei Z., Liu X., Zngang Z., et al. Application of the industrial byproduct gypsum in building materials: A review. *Materials*. 2024, vol. 17, pp. 1837. <https://doi.org/10.3390/ma17081837>.
14. Wei Z., Deng Z. Research hotspots and trends of comprehensive utilization of phosphogypsum: Bibliometric analysis. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022, vol. 242, pp. 106778. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106778>.
15. Tian T., Yan Y., Hu Z., et al. Utilization of original phosphogypsum for the preparation of foam concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 115, pp. 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.028>.
16. Bessonov I. V., Buryanov A. F. Penogips v sovremennom maloetazhnom stroitelstve [Foam gypsum in modern low-rise construction]. *Zhilishchnoe stroitelstvo* [Housing Construction]. 2024, no. 5, pp. 26–34. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-5-26-34>.
17. Bessonov I. V., Buryanov A. F. Utverzhden natsionalnii standart na penogipsovii uteplitel [National standard for foam gypsum insulation approved]. *Zhilishchnoe stroitelstvo* [Housing Construction]. 2025, no. 8, pp. 5–8. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-838-8-5-8>.
18. Provotorov A. A., Tararushkin Ye. V. Vliyanie poverhnostno-aktivnogo veshchestva na tverdenie i prochnost fosfogipsa [Effect of surfactant on hardening and strength of phosphogypsum]. *Ekonomika stroitelstva* [Construction Economics]. 2026, no. 1, pp. 590–593.
19. Bessonov I. V., Buryanov A. F. *Penogips v stroitelstve* [Foam gypsum in construction]. Moscow: Natsionalnii issledovatel'skii Moskovskii gosudarstvennii stroitel'nii universitet; 2024, 132 p.
20. Cheliev Ye. G. *Polnoe nastavlenie, kak prigotovlyat deshevii i luchshii mertel ili tsement, vesma prochnii dlya podvodnykh stroenii, kak-to: kanalov, mostov, basseinov, plotin, podvalov, pogrebov, i shtukaturki kamennykh i derevyannykh stroenii. Izdannoe po opytu proizvedeniih v nature stroenii, nachalnikom Moskovskoi voennorabochei brigadi masterskikh komand 2-go razryada, 6-go klassa i kavalerom Chelievym* [Complete instructions on how to prepare a cheap and best mortar or cement, very strong for underwater structures, such as canals, bridges, pools, dams, basements, cellars, and plastering stone and wooden buildings. Published based on the experience of buildings built in kind, by the head of the Moscow military labor brigade of workshop teams of the 2nd category, 6th class and cavalier E.G. Cheliev]. Moscow: Volnaya tipografiya Ponomareva; 1825, 28 p.

© А. А. Провоторов, Е. В. Тарарушкин

Ссылка для цитирования:

Провоторов А. А., Тарарушкин Е. В. Получение фибропеногипса на основе фосфогипса // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 33–37.

УДК 691.311
DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-37-43

КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ ФОСФОГИПСА

А. А. Провоторов, Е. В. Тарарушкин

Провоторов Алексей Александрович, аспирант, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; e-mail: prov40@mail.ru;

Тарарушкин Евгений Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; e-mail: evgeny.tararushkin@yandex.ru

Исследована кинетика набора прочности гидратированного фосфогипса. В качестве вяжущих рассмотрено два типа очищенного фосфогипса с преимущественным содержанием β - и α -модификаций полугидрата сульфата кальция соответственно. На их основе изготовили также образцы с добавлением полипропиленовой фибры. Измерения плотности материалов, их прочности при сжатии и изгибе проводили в течение трех месяцев. Исследование показало, что наиболее интенсивное испарение воды из образцов происходит к седьмым суткам для обоих типов фосфогипса. В результате испытаний на прочность в возрасте двух часов установлено, что β -модификации соответствует марка Г-2, а α -модификации – марка Г-10. Для обоих типов фосфогипса характерно нарастание прочности к 60-м и 90-м суткам для β - и α -модификаций соответственно. Прирост прочности на сжатие для β -модификации составил 384 % по сравнению с прочностью в возрасте двух часов, а для α -модификации – 99 %.

Ключевые слова: фосфогипс, фосфорные примеси, твердение, плотность, пористость, прочность, кинетика набора прочности.