

8. Bellefqih H., Bourquier V., Bilal E., et al. Effect of  $\text{HPO}_4^{2-}$  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](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 proizvedeniykh 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  $\beta$ - и  $\alpha$ -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  $\beta$ -модификации соответствует марка Г-2, а  $\alpha$ -модификации – марка Г-10. Для обоих типов фосфогипса характерно нарастание прочности к 60-м и 90-м суткам для  $\beta$ - и  $\alpha$ -модификаций соответственно. Прирост прочности на сжатие для  $\beta$ -модификации составил 384 % по сравнению с прочностью в возрасте двух часов, а для  $\alpha$ -модификации – 99 %.

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

## TIME-DEPENDENT STRENGTH DEVELOPMENT OF 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 strength development kinetics of hydrated phosphogypsum was investigated. Two types of phosphogypsum with mainly content of  $\beta$ - and  $\alpha$ -hemihydrate, respectively, were examined. Samples with the addition of polypropylene fiber were also produced. Determinations of material density, compressive strength, and flexural strength were conducted over a period of 3 months. Density measurements of the samples showed that the most intensive evaporation of water occurs on the 7th day for both types of phosphogypsum. Strength tests at 2 hours of age indicated that the  $\beta$ -hemihydrate corresponds to grade G-2, while the  $\alpha$ -hemihydrate corresponds to grade G-10. The study of strength development kinetics revealed that for both types of phosphogypsum, strength increases up to 60 and 90 days for  $\beta$ - and  $\alpha$ -hemihydrate, respectively. The increase in compressive strength for  $\beta$ -hemihydrate amounted to 384 % compared to the strength at 2 hours of age, while for  $\alpha$ -hemihydrate, the increase was 99 %.

**Keywords:** *phosphogypsum, phosphorus impurities, hardening, density, porosity, strength, time-dependent strength development.*

### Введение

При производстве строительных материалов широко используются различные формы безводного и водного сульфата кальция, такие как ангидрит, бассанит и гипс. Гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) является неотъемлемой составляющей портландцемента, а различные формы ангидрита ( $\text{CaSO}_4$ ) и бассанита ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) активно применяются при производстве штукатурных смесей и гипсокартонных листов [1–4]. В то же время существует значительная экологическая проблема, связанная с накоплением огромных объемов гипсо-содержащих отходов (фосфогипса), являющихся побочным продуктом переработки фосфоритов в минеральные удобрения [5, 6]. Накопление фосфогипса (ФГ) в мировом масштабе является значительным и оценивается в 100–300 млн т ежегодно [7]. Прогнозируется, что к 2050 г. его общий объем может достичь 11 млрд т [8]. В Российской Федерации объемы накопленного неочищенного ФГ также существенны и продолжают увеличиваться, что создает серьезную угрозу экологической устойчивости. В связи с этим актуальной задачей является поиск эффективных способов утилизации фосфогипса. Одним из наиболее перспективных считается использование ФГ в строительных материалах [9–11].

Широкому применению фосфогипса препятствуют следующие факторы: нестабильность химического и фазового состава получаемого минерального вяжущего [12]; наличие примесей, в первую очередь соединений фосфора [13]; потенциально высокая активность радионуклидов [11]. Однако современные технологии очистки ФГ постоянно совершенствуются, что позволяет получать материал с минимальным содержанием примесей и приемлемым уровнем радиоактивности. Так, в Китайской Народной Республике за последние 10 лет доля перерабатываемого фосфогипса возросла с 20 до 45 % [14, 15]. Это открывает перспективы для широкого использования очищенного ФГ в производстве различных строительных материалов.

Библиометрические исследования [11, 16] свидетельствуют о резком росте научного интереса к утилизации фосфогипса: за последние 20 лет число соответствующих публикаций возросло более чем в десять раз. При этом большинство работ посвящено вопросам очистки ФГ от примесей и его применению

в строительной отрасли. Интерес к этой проблематике растет и в Российской Федерации [17]. Однако сведения о кинетике набора прочности очищенного фосфогипса в литературе отсутствуют, хотя такие исследования различных вяжущих дают важную информацию о формировании минеральных фаз и структуре материала в процессе твердения [18, 19].

В настоящей работе исследована кинетика набора прочности образцов из очищенного ФГ. Полученные данные необходимы для оценки стабильности физико-механических характеристик фосфогипса во времени при эксплуатации изделий в нормальных условиях. В ходе работы на разных стадиях твердения определяли среднюю плотность, прочность при сжатии и изгиб образцов двух типов затвердевшего ФГ, а также для сравнения коммерческого гипса.

### Материалы и методы

В качестве минерального вяжущего использовали отход производства фосфорных удобрений завода АО «ВМУ», предварительно подвергнутый комплексной очистке. После очистки применяли известные методы варки для получения в его составе преимущественно  $\beta$ - или  $\alpha$ -модификации полугидрата сульфата кальция ( $\beta$ - и  $\alpha$ -ФГ). Известно, что  $\beta$ -полугидрат имеет рыхлый и пористый габитус, то есть кристаллиты в образце  $\beta$ -ФГ должны быть мелкими, дефектными и пористыми. В то же время  $\alpha$ -полугидрат характеризуется плотным и компактным габитусом, то есть кристаллиты в образце  $\alpha$ -ФГ должны быть крупными, призматическими и плотными. Исследование проб  $\beta$ - и  $\alpha$ -модификации полугидрата сульфата кальция с помощью оптической микроскопии подтверждает эти особенности (рис. 1).

Результаты физико-химических исследований проб  $\beta$ -ФГ показали, что после отмывания в нем по-прежнему остаются так называемые Р-примеси (соединения фосфора, например,  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) в количестве 1–2 % [20]. Некоторые из этих примесей в виде анион-радикалов можно также выявлять с помощью электронного парамагнитного резонанса [21], что, возможно, позволит повысить точность определения их содержания.

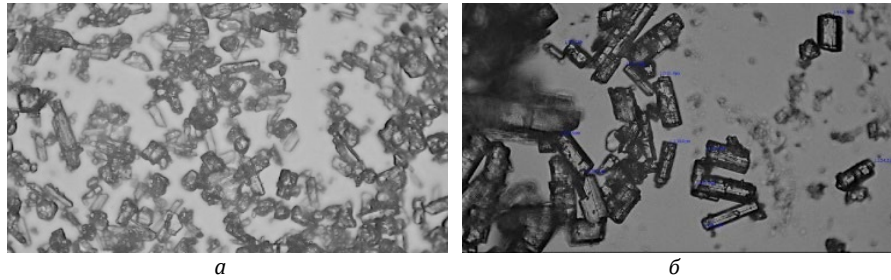


Рис. 1. Фотографии кристаллитов образцов ФГ: а –  $\beta$ -ФГ; б –  $\alpha$ -ФГ (иллюстрация авторов)  
 Fig. 1. Images of the phosphogypsum crystals: a –  $\beta$ -PG; b –  $\alpha$ -PG (illustration by the authors)

Удельную поверхность проб фосфогипса и коммерческого гипса определяли на приборе ПСХ-10. В результате измерений удельная поверхность вяжущего  $\beta$ -ФГ составила  $8276 \text{ см}^2/\text{г}$ , а  $\alpha$ -ФГ –  $3659 \text{ см}^2/\text{г}$ . Полученные значения подтверждают, что в  $\beta$ -ФГ преимущественно содержатся кристаллиты  $\beta$ -полуhydrата, обладающие большей удельной поверхностью, а в  $\alpha$ -ФГ – кристаллиты  $\alpha$ -полуhydrата, обладающие меньшей удельной поверхностью. Значение удельной поверхности коммерческого гипса (КГ) составило  $6098 \text{ см}^2/\text{г}$ , что указывает на преимущественное содержание  $\alpha$ -полуhydrата в его составе.

Для исследования влияния дисперсного армирования на процессы структурообразования вяжущих были изготовлены образцы  $\alpha$ -модификация полуhydrата сульфата кальция и КГ с добавлением полипропиленовой фибры длиной 6 мм в количестве 0,47 % от массы вяжущего. Образцы, содержащие фибру, обозначали индексом «ф» ( $\alpha$ -ФГф и КГф).

Водогипсовое отношение (В/Г) для каждого типа вяжущего подбирали исходя из условия обеспечения распыла гипсового теста диаметром  $180 \pm 5 \text{ мм}$  согласно ГОСТ 23789-2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний». В результате значения В/Г составили 0,41; 0,34 и 0,39 для неармированных вяжущих  $\beta$ -ФГ,  $\alpha$ -ФГ и КГ, а для образцов с дисперсным армированием – 0,34 и 0,39 для  $\alpha$ -ФГф и КГф соответственно.

Начало и конец схватывания затворенных водной минеральных вяжущих определяли с помощью прибора Вика согласно ГОСТ 23789-2018. Начало схватывания для неармированных вяжущих  $\beta$ -ФГ,  $\alpha$ -ФГ и КГ составило 8, 12 и 6 мин. соответственно, а конец – 12, 22 и 8 мин. Добавление фибры в состав образцов  $\alpha$ -ФГф способствует сокращению сроков схватывания: начало схватывания – 9 мин., а конец – 14 мин. Введение фибры в коммерческий гипс (КГф) не привело к сокращению сроков схватывания (начало – 6 мин., конец – 8 мин.). Согласно ГОСТ 125-2018 «Вяжущие гипсовые. Технические условия», коммерческий гипс (КГ и КГф) можно отнести к нормально твердеющим вяжущим, образцы же ФГ ( $\beta$ -ФГ,  $\alpha$ -ФГ и  $\alpha$ -ФГф) – к медленно твердеющим вяжущим. Медленное схватывание фосфогипса обусловлено наличием Р-примесей. Однако добавление фибры в небольшом количестве способствует интенсификации процесса схватывания теста на основе ФГ.

После определения водогипсового отношения и сроков схватывания были изготовлены образцы-

балочки размером  $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}^3$  для последующих испытаний на изгиб и сжатие, а также для определения средней плотности материалов. Испытания проводили в следующие сроки: 2 ч, 1, 3, 7, 14, 28, 45, 60 и 90 сут. Все методики изготовления и испытаний образцов соответствовали ГОСТ 23789-2018. Образцы хранили в нормальных условиях.

#### Результаты и обсуждения

Зависимость средней плотности образцов  $\beta$ -ФГ от времени представлена на рисунке 2. Плотность образцов  $\beta$ -ФГ через 2 ч после затворения составляет  $1773 \text{ кг}/\text{м}^3$ . С течением времени плотность затвердевшего ФГ снижается. Наибольшее снижение плотности (с  $1707$  до  $1563 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) наблюдается в период с первых по седьмые сутки, что связано с интенсивным испарением избыточной воды затворения. Как известно, для полной гидратации полуhydrата сульфата кальция необходимо 18,6 % воды от массы вяжущего [1]. В данном исследовании количество воды было больше для обеспечения заданного распыла теста согласно ГОСТ 23789-2018. После семи суток плотность образцов продолжает снижаться за счет дальнейшего испарения избыточной воды, но менее интенсивно. К 90-м сут. средняя плотность  $\beta$ -ФГ составляет  $1496 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Для образцов  $\alpha$ -ФГ и  $\alpha$ -ФГф значения плотности через два часа составили  $1876$  и  $1868 \text{ кг}/\text{м}^3$  соответственно. Плотность образцов КГ и КГф –  $1892$  и  $1930 \text{ кг}/\text{м}^3$  (рис. 3). Наиболее интенсивное испарение избыточной воды затворения как для образцов ФГ ( $\alpha$ -ФГ и  $\alpha$ -ФГф), так и для коммерческого гипса (КГ и КГф), наблюдается к седьмым суткам. В отличие от образцов  $\beta$ -ФГ, для обоих типов материалов после семи суток дальнейшего заметного испарения воды не происходит. К 90-м сут. плотность образцов  $\alpha$ -ФГ и  $\alpha$ -ФГф составила  $1645$  и  $1698 \text{ кг}/\text{м}^3$  соответственно, а для КГ и КГф –  $1598$  и  $1572 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Более низкая плотность образцов КГ и КГф связана с большим водогипсовым отношением, что приводит к формированию материала с более высокой пористостью. Следует также отметить, что у образцов с фиброй ( $\alpha$ -ФГф и КГф) наблюдаются более значительные колебания плотности в период с 7-х по 45-е сут. Возможным объяснением этому может служить неравномерный транспорт воды при ее испарении в зонах контакта фибры с гипсовой матрицей, где пористость отличается от пористости объемной матрицы без фибры.

Испытания образцов  $\beta$ -ФГ на прочность при сжатии и изгибе в возрасте двух часов показали, что

марка материала по ГОСТ 125-2018 соответствует Г-2 (табл.). Таким образом,  $\beta$ -модификация фосфогипса относится к низкомарочному гипсовому вяжущему. Низкая прочность вяжущего в возрасте двух часов объясняется наличием Р-примесей, которые замедляют процессы схватывания, гидратации и твердения гипсовых вяжущих [1].

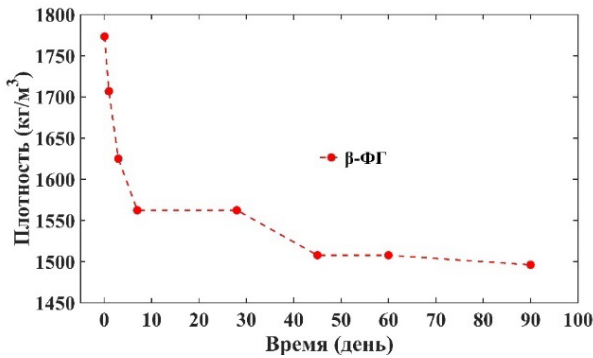


Рис. 2. Изменение во времени средней плотности затвердевших образцов из  $\beta$ -модификации вяжущего (иллюстрация авторов)  
 Fig. 2. Time depending of the density of hydrated  $\beta$ -hemihydrate specimens (illustration by the authors)

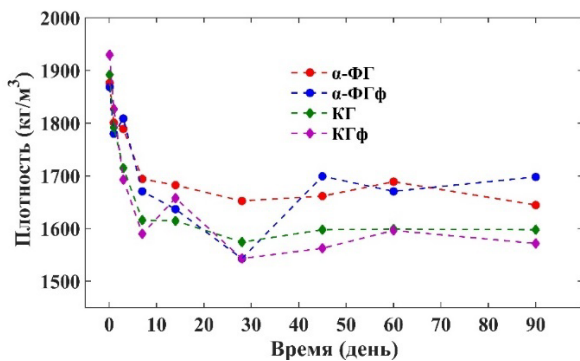


Рис. 3. Изменение во времени средней плотности затвердевших образцов из  $\alpha$ -модификации вяжущего (иллюстрация авторов)  
 Fig. 3. Time depending of the density of hydrated  $\alpha$ -hemihydrate specimens (illustration by the authors)

выделить два этапа набора прочности: первый – наиболее интенсивное увеличение при сжатии и изгибе в период с первых по седьмые сутки; второй – менее интенсивный рост при изгибе с 7-х по 60-е сут., но столь же интенсивное увеличение прочности при сжатии. Как было указано выше, с первых по седьмые сутки наблюдается наиболее интенсивное испарение свободной воды. Это способствует высыханию материала и выделению дугидрата сульфата кальция, что и приводит к росту его прочности. В то же время интенсивное испарение избыточной воды способствует формированию макропористости, которая особенно сильно влияет на прочность при изгибе. Упрочнению материала также способствует процесс срастания контактов сформировавшихся кристаллитов дугидрата сульфата кальция, который протекает в течение длительного времени [1]. Поэтому на втором этапе набора прочности (с 7-х по 60-е сут.) интенсивный рост прочности при сжатии обусловлен в основном развитием кристаллизационных контактов. Отсутствие значительного роста прочности при изгибе объясняется уже сформированной на первом этапе макропористостью материала. К 90-м сут. прочностные характеристики материала примерно такие же, как и к 60-м суткам, что указывает на завершение процесса высыхания и окончательное формирование его кристаллической структуры.

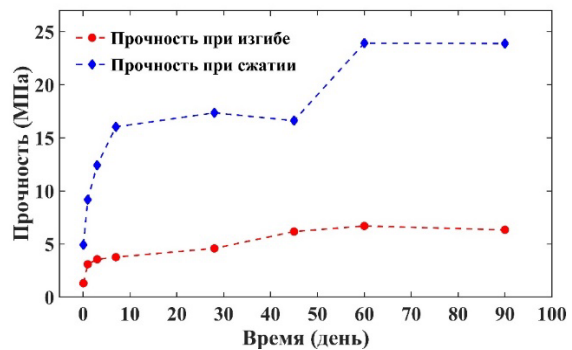


Рис. 4. Изменение во времени прочностей при изгибе и сжатии затвердевших образцов  $\beta$ -ФГ (иллюстрация авторов)  
 Fig. 4. Time depending of the bending and compressive strengths of hydrated  $\beta$ -FG specimens (illustration by the authors)

**Результаты прочности образцов в возрасте двух часов**

№ п/п	Образец	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа	Марка по ГОСТ 125-2018
1	2	3	4	5
2	$\beta$ -ФГ	4.9	1.3	Г-2
3	$\alpha$ -ФГ	16.8	4.8	Г-10
4	$\alpha$ -ФГф	17.9	4.8	Г-10
5	КГ	15.0	5.5	Г-13
6	КГф	14.0	5.4	Г-10

С течением времени наблюдается прирост прочности образцов  $\beta$ -ФГ (рис. 4). При этом можно

Для обоих типов образцов  $\alpha$ -ФГ и  $\alpha$ -ФГф марка вяжущего составила Г-10. У коммерческого гипса марки составили Г-13 и Г-10 для КГ и КГф (табл.). Таким образом, введение полипропиленовой фибры не приводит к повышению марки  $\alpha$ -ФГ, а в случае коммерческого гипса даже снижает ее.

В отличие от  $\beta$ -модификации ФГ, для образцов с преимущественным содержанием  $\alpha$ -полугидрата наблюдается интенсивный прирост прочности при изгибе и сжатии до 14-х сут. (рис. 5 и 6). Этот период также связан с наиболее активным испарением воды и высыханием материалов. После 14-и суток как для образцов  $\alpha$ -ФГ, так и для КГ прироста прочности при изгибе не наблюдается, что указывает на завершение формирования их макропористой

структуры. Ответственность макропористости за прекращение роста прочности при изгибе была отмечена для образцов из цементно-песчаных растворов [19].

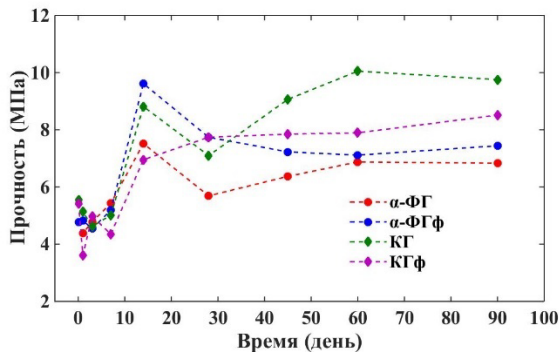


Рис. 5. Изменение во времени прочности при изгибе затвердевших образцов из  $\alpha$ -модификации вяжущего (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Time depending of the bending strength of hydrated  $\alpha$ -hemihydrate specimens (illustration by the authors)

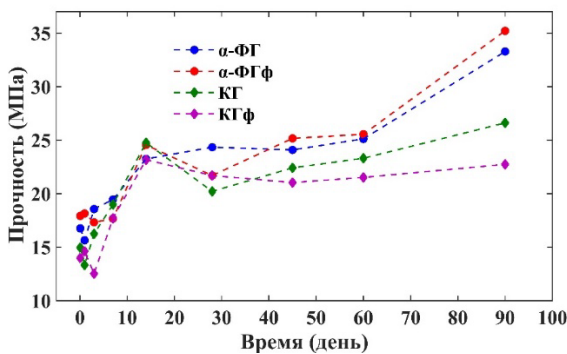


Рис. 6. Изменение во времени прочности при сжатии затвердевших образцов из  $\alpha$ -модификации вяжущего (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Time depending of the compressive strength of hydrated  $\alpha$ -hemihydrate specimens (illustration by the authors)

После 14 сут. заметного прироста прочности при сжатии для образцов из коммерческого гипса не наблюдается, и к 90-м сут. прочность составляет 26,6 и 22,7 МПа для КГ и КГф соответственно (рис. 6). В то же время для образцов на основе  $\alpha$ -полугидрата фосфогипса – значительный прирост прочности после 60-х сут., к 90-м сут. прочность образцов достигает 33,3 и 35,2 МПа для  $\alpha$ -ФГ и  $\alpha$ -ФГф. Вероятно, этот прирост прочности к 90-м сут. обусловлен более медленным формированием кристаллизационных контактов в  $\alpha$ -ФГ из-за наличия Р-примесей.

### Выводы

Исследование изменения плотности во времени показало, что наиболее интенсивное снижение его

у образцов фосфогипса наблюдается в течение первых семи суток после затворения водой. Для образцов  $\beta$ -ФГ доля снижения плотности в течение семи суток составляет 76 %, для  $\alpha$ -ФГ – 79 %, а для образцов с фиброй  $\alpha$ -ФГф – 99 %. Таким образом, наиболее интенсивное испарение свободной воды происходит в течение первой недели после затворения для всех типов вяжущих. Введение полипропиленовой фибры в  $\alpha$ -модификации ФГ влияет на процессы испарения воды и высыхания образцов.

Испытания образцов на прочность в возрасте двух часов после затворения водой показали, что вяжущему  $\beta$ -ФГ соответствует марка Г-2. Следовательно, это вяжущее является низкомарочным, что объясняется медленным твердением из-за наличия фосфорных примесей. Вяжущим  $\alpha$ -ФГ и  $\alpha$ -ФГф соответствует марка Г-10. Дисперсное армирование полипропиленовой фиброй длиной 6 мм и концентрацией 0,47 % от массы вяжущего не позволяет повысить его марку по прочности.

Исследование кинетики набора прочности показало, что для образцов  $\beta$ -модификации фосфогипса характерно двухэтапное увеличение прочности, продолжающееся до 60-х сут. Наибольший прирост прочности при сжатии и изгибе наблюдается в период с первых по седьмые сутки за счет испарения избыточной воды затворения. На втором этапе (с 7-х по 60-е сут.) прирост прочности при сжатии также остается значительным, что объясняется продолжительным формированием кристаллической структуры материала. В результате прирост прочности при сжатии к 60-м сут. составил 384 %, по сравнению с прочностью в возрасте двух часов.

Для образцов  $\alpha$ -модификации ФГ с фиброй и без нее также наблюдается двухэтапный набор прочности: в период с 1-х по 14-е сут. – интенсивный рост прочности при изгибе и сжатии; с 14-х по 90-е сут. – при сжатии. Эти этапы твердения также характеризуются интенсивным испарением воды, формированием макропористости и достаточно длительным формированием кристаллической структуры из-за наличия фосфорных примесей в вяжущем. Прирост прочности при сжатии к 90-м сут. составил 99 %, по сравнению с прочностью в возрасте двух часов.

В результате исследования кинетики набора прочности различных типов очищенного фосфогипса обнаружено отсутствие заметных спадов прочности. Это свидетельствует об отсутствии значительных внутренних напряжений, которые могут возникать при длительном твердении гипсовых вяжущих [22]. Таким образом, использование очищенного ФГ для производства строительных материалов и изделий является целесообразным и перспективным направлением.

### 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. 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.
6. 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>.
7. Bellefqih H. Effect of  $\text{HPO}_4^{2-}$  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>.
8. Maina L. Challenges and strategies for the sustainable environmental management of phosphogypsum / L. Maina, K. Kiegiel, G. Zakrzewska-Kohtuniewicz // Sustainability. – 2025. – Vol. 17. – P. 3473. – <https://doi.org/10.3390/su17083473>.
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 сульфаталюминатных 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](https://doi.org/10.54734/20722958_2024_2_30).
11. Akfas F. Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? / F. Akfas, A. Elghali, A. Aboulaich, et al. // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 908. – P. 168196. – <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168196>.
12. Zhang J. Phosphogypsum-based building materials: Resource utilization, development, and limitation / J. Zhang, K. Cui, J. Chang, L. Wang // Journal of Building Engineering. – 2024. – Vol. 91. – P. 109734. – <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2024.109734>.
13. 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.
14. Xie Z. Application of the industrial byproduct gypsum in building materials: A review / Z. Xie, X. Liu, Z. Znan, et al. // Materials. – 2024. – Vol. 17. – P. 1837. – <https://doi.org/10.3390/ma17081837>.
15. 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>.
16. 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>.
17. Bumanis G. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste / G. Bumanis, J. Zorica, D. Bajare, A. Korjakin // Energy Procedia. – 2018. – Vol. 147. – P. 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.096>.
18. Tararushkin E. V. A study of strength fluctuations of Portland cement by FTIR spectroscopy / E. V. Tararushkin, T. N. Shchelokova, V. D. Kudryavtseva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 919. – P. 022017. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/2/022017>.
19. Tararushkin E. V. Daily strength testing of the Portland cement mortars / E. V. Tararushkin, T. N. Shchelokova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862. – P. 022031. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/2/022031>.
20. Провоторов А. А. Исследование кинетики набора прочности фосфогипса / А. А. Провоторов, Е. В. Тарарушкин // Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2025 (ICMSSTE 2025): материалы международной научно-практической конференции. – Симферополь : Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, 2025. – С. 93–97.
21. Насиров Р. Анион-радикалы органических соединений / Р. Насиров, А. А. Копашева, Б. К. Куспанова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2012. – № 2 (3). – С. 45–48.
22. Lyashkevich I. M. Structure and properties of pressed gypsum and gypsum-cement materials / I. M. Lyashkevich, G. Danko, G. S. Raptunovich // Cement and Concrete Research. – 1990. – Vol. 20. – P. 357–368.

#### 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 nizkomarochного stroitel'nogo gipsa* [Effective composite materials based on low-grade building gypsum]. Moscow: OOO "Rusains"; 2024, 332 p.
3. Gubskay 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]. *Stroitelnie materialy* [Building Materials]. 2005, no. 9, pp. 40–44.
5. 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-stroitelniy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2015, no. 3 (13), pp. 37–38.
6. 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>.
7. Bellefqih H., Bourgier V., Bilal E., et al. Effect of  $\text{HPO}_4^{2-}$  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>.
8. Maina L., Kiegiel K., Zakrzewska-Kohtuniewicz G. Challenges and strategies for the sustainable environmental management of phosphogypsum. *Sustainability*. 2025, vol. 17, pp. 3473. <https://doi.org/10.3390/su17083473>
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](https://doi.org/10.54734/20722958_2024_2_30).
11. Akfas F., Elghali A., Aboulaich A., et al. Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? *Science of the Total Environment*. 2024, vol. 908 pp. 168196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168196>
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. Murakami K., Tanaka H., Sato K. Procedures for the chemical analysis of impurities of phosphogypsum. *Gypsum & Lime*. 1967, vol. 91, pp. 249–255.
14. Xei Z., X. Liu, Z. Zngang, 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>.
15. 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>.
16. 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>.
17. Bumanis G., Zorica J., Bajare D., Korjajins A. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste. *Energy Procedia*. 2018, vol. 147, pp. 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.096>.
18. Tararushkin E. V., Shchelokova T. N., Kudryavtseva V. D. A study of strength fluctuations of Portland cement by FTIR spectroscopy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 919, pp. 022017. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/2/022017>.
19. Tararushkin E. V., Shchelokova T. N. Daily strength testing of the Portland cement mortars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 862, pp. 022031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/2/022031>.
20. Provotorov A. A., Tararushkin Ye. V. Issledovanie kinetiki nabora prochnosti fosfogipsa [Study of the Kinetics of Phosphogypsum Strength Gain]. *Materialovedenie, formoobrazuyushchie tekhnologii i oborudovanie 2025 (ICMSSTE 2025) : materiali mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Materials Science, Form-Generating Technologies and Equipment 2025 (ICMSSTE 2025): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Simferopol: Krimskii federalnii universitet imeni V. I. Vernadskogo; 2025, pp. 93–97.
21. Nasirov R., Kopasheva A. A., Kuspanova B. K. Anion-radikali organicheskikh soedinenii [Anion radicals of organic compounds]. *Inzhenerno-stroitelnyi vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2012, no. 2 (3), pp. 45–48.
22. Lyashkevich I. M., Danko G., Raptunovich G. S. Structure and properties of pressed gypsum and gypsum-cement materials. *Cement and Concrete Research*. 1990, vol. 20, pp. 357–368.

© А. А. Провоторов, Е. В. Тарарушкин

**Ссылка для цитирования:**

Провоторов А. А., Тарарушкин Е. В. Получение фибропеногипса на основе фосfogипса // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 37–43.

УДК 69.059.7  
DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-43-49

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНЦЕПЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА  
В ОСВОБОЖДЕННОМ ГОРОДЕ С УЧАСТИЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ ДРУГИХ РЕГИОНОВ**

**Ю. И. Тилинин**

**Тилинин Юрий Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, тел.: + 7 (905) 232-16-34; e-mail: tilsp@inbox.ru

Анализ практического опыта восстановления зданий и сооружений в Мариуполе показал важность формирования строительного комплекса города для производства масштабных строительных работ. В начальный период осуществляется экстренное восстановление объектов жизнеобеспечения, в основной формируется строительный комплекс, в нормальный – строительный комплекс формируется с учетом стратегии развития города. Научная проблема заключается в выборе эффективной технологии производства работ, на основе которой складывается строительный комплекс. На основе многокритериальной экспертной оценки установлено, что применение монолитных технологий остается приоритетным. Стоимость монолитного строительства ниже в связи с наличием местных материалов (песка и щебня) и благоприятного климата в Мариуполе. Сборное строительство возможно только с использованием комплектов из соседних регионов, что увеличивает стоимость по сравнению с монолитными технологиями с использованием местных материалов.

**Ключевые слова:** масштабная реконструкция, техническое состояние, объемы работ, ресурсное обеспечение, концепция, строительный комплекс, сравнение технологий, монолитное строительство, местные материалы.

**TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS OF THE CONCEPT OF FORMING A CONSTRUCTION COMPLEX  
IN A LIBERATED CITY WITH THE PARTICIPATION OF ENTERPRISES FROM OTHER REGIONS**

**Yu. I. Tilin**

**Tilin Yuriy Ivanovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Construction Technology Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation, phone: + 7 (905) 232-16-34; e-mail: tilsp@inbox.ru