

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 187–196.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (6): 187–196.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-187-196

EDN: RUTEPa

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ДРЕВЕСНО-ГИПСОВОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДОБАВЛЕНИИ В ЕГО СОСТАВ ЦЕМЕНТА

**Тимофей Иванович Горохов, Александр Владимирович Ерофеев,
Никита Святославович Ковалев**

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

Аннотация. Актуальность. Использование цемента при производстве древесно-гипсового композитного материала в качестве модифицирующей добавки приводит к повышению его прочностных характеристик. Это определяет необходимость исследования процесса структурообразования древесно-гипсового материала с добавлением цемента с позиции научного обоснования повышения прочностных характеристик.

Целью настоящего исследования является определение методом ртутной порометрии диаметра пор и их количественного распределения в структуре материала для образцов древесно-гипсового композитного материала с добавлением цемента и без его использования.

Методология. Исследование проводилось методом ртутной порометрии, основанным на измерении давления для вдавливания несмачивающей ртутной жидкости в поры образца.

Результаты исследования позволили оценить изменение структуры древесно-гипсового композитного материала при введении цемента.

Ключевые слова: гипс, древесно-гипсовый композит, отделочный материал, ртутная порометрия, структурообразование, цемент

Финансирование: в работе применялось оборудование ЦКП НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Для цитирования: Горохов Т.И., Ерофеев А.В., Ковалев Н.С. Анализ изменения структуры древесно-гипсового композитного материала при добавлении в его состав цемента // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 187–196. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-187-196. EDN: RUTEPa

ORIGINAL ARTICLE

ANALYSIS OF CEMENT-MODIFIED STRUCTURE OF WOOD-GYPSUM COMPOSITE

Timofey I. Gorokhov, Aleksandr V. Yerofeyev, Nikita S. Kovalev
Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract. The cement use in the production of wood-gypsum composites to modify their structure leads to an increase in its strength properties. It is therefore necessary to study the

structure modification of wood-gypsum composites by the addition of cement in terms of the scientific justification of improving strength properties. The composite structure with and without the cement addition is studied using mercury injection.

Purpose: The aim of this work is to determine the pore size and their quantitative distribution in the material structure using mercury injection in wood-gypsum composite samples with and without the cement addition.

Methodology: Mercury injection is based on measuring the pressure of non-wetting mercury liquid in the porous structure.

Research findings: The obtained results evaluate the wood-gypsum composite structure modified by the cement addition.

Keywords: gypsum, wood-gypsum composite, finishing material, mercury injection, structure formation, cement

Funding: The research was carried out using the equipment of the Center for Sharing Use “Nanomaterials and Nanotechnologies” of Tomsk Polytechnic University supported by the RF Ministry of Education and Science project No. 075-15-2021-710.

For citation: Gorokhov T.I., Erofeev A.V., Kovalev N.S. Analysis of Cement-Modified Structure of Wood-Gypsum Composite. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 187–196. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-187-196. EDN: RUTEPA

Введение

Одним из способов повышения эксплуатационных характеристик разработанного древесно-гипсового композитного материала [1] является применение различных модифицирующих добавок. Так, введение цемента в состав древесно-гипсового композитного материала на стадии производства позволяет повысить его механические характеристики [2]. Исследования показали, что замещение до 16,5 % гипсового вяжущего в составе древесно-гипсового композитного материала на цемент позволяет повысить прочность на растяжение при изгибе более чем в 5 раз и прочность на сжатие более чем в 3 раза. Дальнейшее замещение гипса цементом приводит к обратному результату: наблюдается снижение прочностных показателей [Там же].

Зависимости изменения прочностных характеристик древесно-гипсового композитного материала от процентного содержания цемента, строго говоря, подчиняется нормальному распределению с экстремумом, соответствующим процентному содержанию цемента 16,5 %. Объяснение такой зависимости изменения прочностных характеристик композитного материала лежит в области структурообразования. При затворении смеси гипса с цементом водой, т. е. в начале процесса гидратации, алюминатные составляющие цементного клинкера вступают в реакцию с полуводным гипсом, результатом которой является образование этtringита. Этtringит представляет собой высокосульфатную форму гидросульфалюмината кальция [3, 4]. Он имеет кристаллическую структуру, состоящую из колонок, связанных между собой водородной связью, $[\text{Ca}_3 \cdot \text{Al}(\text{OH})_6]^{3+}$. Промежутки заполнены ионами сульфата и молекулами воды [5]. Элементарная ячейка этtringита представлена на рис. 1.

Образование этtringита влечет за собой увеличение твердой фазы, что в свою очередь приводит к увеличению объема гипсового камня. Однако до

настоящего времени исследователи так и не пришли к общему мнению, объясняющему процессы, протекающие внутри материала, связанные с его увеличением. П.П. Будников, И.В. Кравченко и ряд других исследователей дают объяснения на основе предложенной ими теории расширения, согласно которой расширение обусловлено силами кристаллизационного давления, которые возникают по мере роста кристаллов этtringита [7]. Ряд других исследователей, например В.В. Михайлов, считают, что роль кристаллизационного давления не является решающей в процессе расширения, а процесс обусловлен переходом моносulfатной формы в трехsulfатную [8, 9].

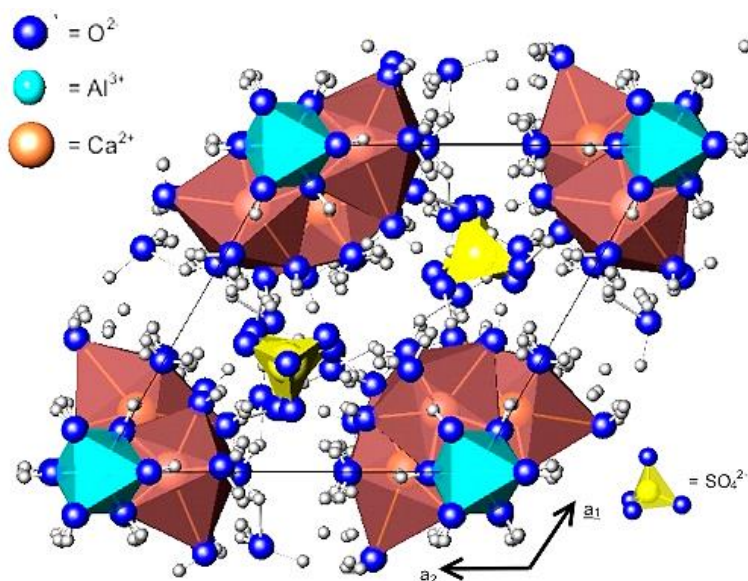


Рис. 1. Элементарная ячейка этtringита [6]
Fig. 1. The ettringite unit cell [6]

Увеличение объема роста кристаллов этtringита игольчатой или нитевидной формы (рис. 2), вне зависимости от причин и механизма их образования и роста, на начальном этапе должно приводить к заполнению порового пространства твердеющей системы, что в свою очередь должно повышать плотность материала и вести к повышению прочностных характеристик. Также стоит отметить, что кристаллы этtringита, упорядочивая структуру, выполняют роль армирующих материалов.

С учетом того, что в системе «гипсовое вяжущее – древесные опилки» в контактной зоне при твердении гипса отсутствуют химические реакции между вяжущим и наполнителем в виде древесных опилок, выступающих в качестве инертного наполнителя, древесные опилки не участвуют в химическом процессе структурообразования древесно-гипсового композитного материала. Инертный наполнитель (древесные опилки) в гипсовой матрице связывается за счет механической адгезии. Однако с учетом такого свойства древесины, как сжимаемость, рост кристаллов этtringита позволяет изменить ячеистую струк-

туру древесины путем сжатия, при этом количество пор в структуре древесины уменьшается, следовательно, растут механические характеристики.

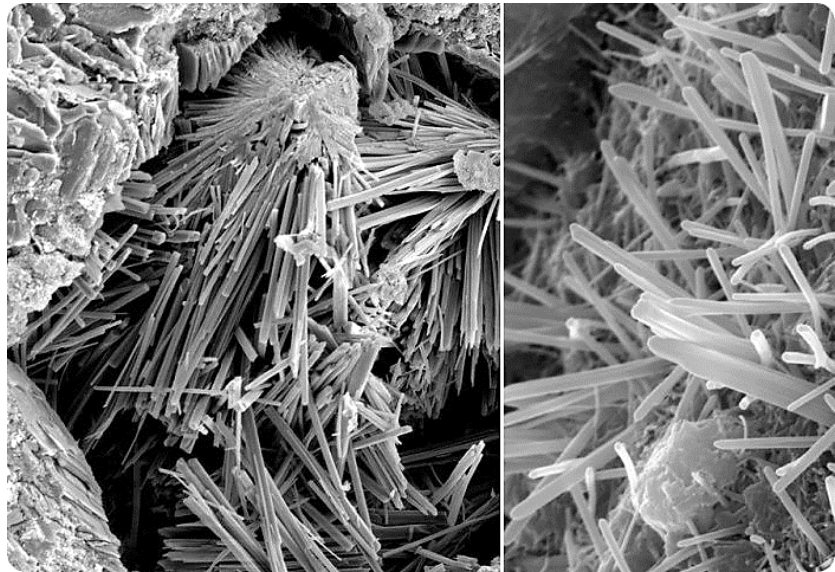


Рис. 2. Кристаллы этtringита
Fig. 2. Ettringite crystals

Для подтверждения вышеизложенного необходимо изучить структуру древесно-гипсового композитного материала с добавлением цемента и без него, а также провести сравнительный анализ полученных результатов.

Методы и принципы исследования

Исследования проводились на ртутном порометре Poremaster 33 (производитель Anton Paar, быв. Quantachrome) по методике «ISO 15901-1:2005 Распределение пор по размерам и определение пористости твердых материалов методами ртутной порометрии и адсорбции газа. Часть 1. Ртутная порометрия».

Метод ртутной порометрии относится к экспериментальным методам исследования структуры материала. Он применяется для измерения пористости и распределения пор по размерам. Метод основан на способности ртути под воздействием приложенного давления проникать в поры материала. В связи с тем, что ртуть, имея большой краевой угол смачивания, не смачивает большинство твердых поверхностей, она не заполняет поры материала без приложения внешнего давления. При этом чем меньше диаметр пор, тем большее давление требуется для проникновения ртути [10].

Исследование порометрии проводилось при температуре 20 °С, угол наклона ртути составлял 140° при значении ее поверхностного натяжения 480 эрг/см². В результате были определены следующие характеристики: минимальный и максимальный диаметры пор; средний, модальный и медианный диаметры пор; удельная площадь поверхности пор; общая пористость, межчастичная и внутривчастичная пористость.

Основные результаты

График интегральной зависимости объема пор от их размеров для древесно-гипсового композитного материала без добавки представлен на рис. 3, *а*, а график аналогичной зависимости для древесно-гипсового композитного материала с замещением гипсового вяжущего цементом (16,5 % от общей массы вяжущего) – на рис. 3, *б*.

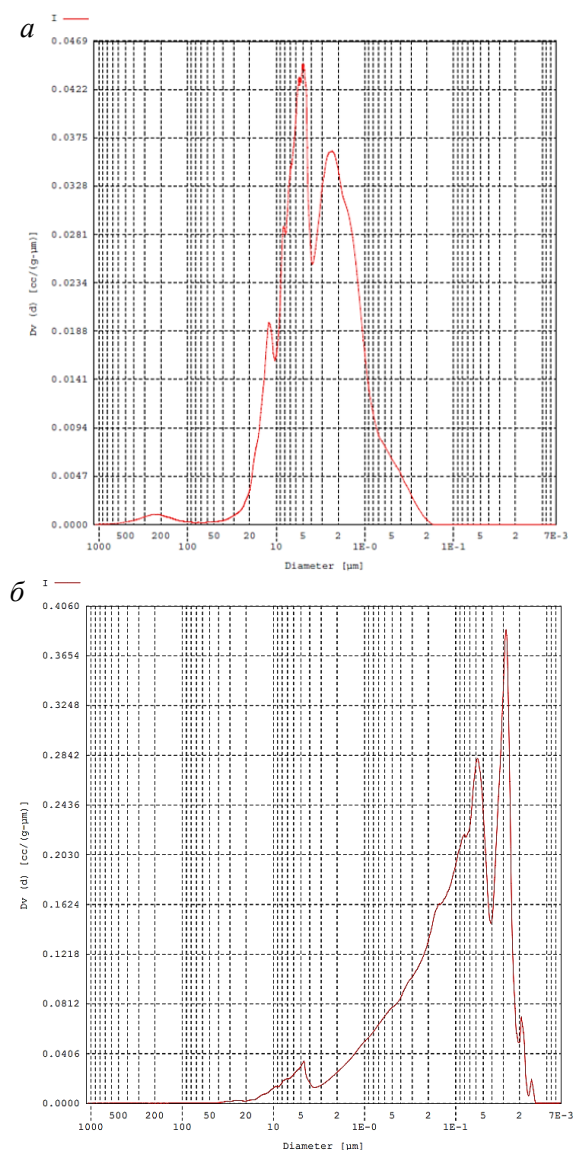


Рис. 3. Графики интегральной зависимости объема пор от их размеров для древесно-гипсового композита без добавки (*а*) и для древесно-гипсового композита с добавкой цемента (*б*)

Fig. 3. Integral dependences between the pore volume and size for wood-gypsum composite without (*a*) and with (*b*) cement addition

График дифференциальной зависимости объема пор от их размеров для древесно-гипсового композитного материала без добавки представлен на рис. 4, а, а график аналогичной зависимости для древесно-гипсового композитного материала с замещением гипсового вяжущего цементом (16,5 % от общей массы вяжущего) – на рис. 4, б.

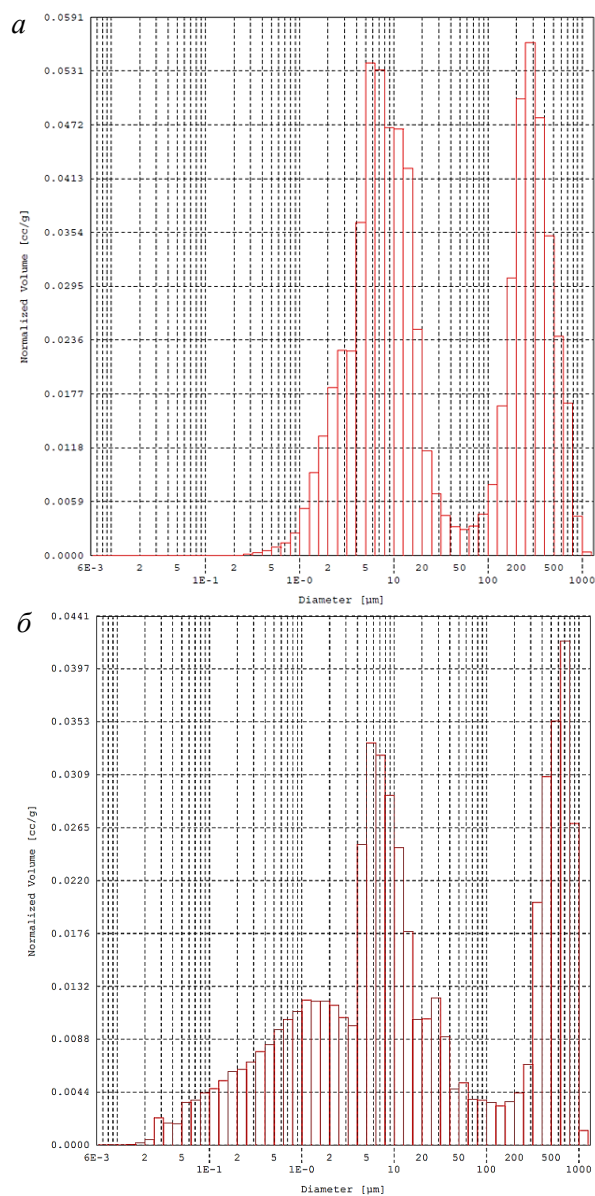


Рис. 4. Графики дифференциальной зависимости объема пор от их размеров для древесно-гипсового композита без добавки (а) и для древесно-гипсового композита с добавкой цемента (б)

Fig. 4. Differential dependences between the pore volume and size for wood-gypsum composite without (a) and with (b) cement addition

Численные значения порометрического анализа даны в таблице.

Основные параметры образцов
Main parameters of wood-gypsum composites

Параметр	Исходный образец	Образец с добавлением цемента
Основные параметры образцов		
Масса образца, г	0,5316	1,0009
Объем образца, см ³	1,0000	1,0000
Температура измерений, °C	20	20
Диаметры пор		
Максимальный диаметр пор, мкм	1077,8	1073,0
Минимальный диаметр пор, мкм	0,00710	0,0074
Средний диаметр, мкм · 10 ⁻¹	~ 8,045	~ 2,5
Модальный диаметр, мкм	~ 4,89	~ 1,3
Медианный диаметр, мкм	~ 14,58	–
Объемная пористость		
Общий объем введенной ртути, см ³ /г	0,7264	0,5264
Общая пористость, %	~ 38,62	~ 52,64
Межчастичная пористость, %	~ 33,22	~ 46,22
Внутричастичная пористость, %	~ 5,39	~ 8,85
Удельная площадь поверхности, м ² /г	0,3612	2,7

На основании экспериментальных данных, приведенных в таблице, можно сделать вывод о том, что частичное замещение 16,5 % гипсового вяжущего цементом в составе древесно-гипсового композитного материала приводит к изменению структуры материала, а именно наблюдается формирование более мелкопористой структуры. В количественных показателях это выражается в снижении среднего диаметра пор более чем в 3 раза, а модального – почти в 4 раза. При этом увеличивается общая пористость материала с 38,62 до 52,64 %. Также стоит отметить, что для древесно-гипсового композитного материала без добавки основной вклад в пористость вносят поры диаметра от 7 до 15 мкм, в отличие от композитного материала с добавкой, для которого основной диапазон размера пор составляет от 0,5 до 10 мкм. Кроме того, увеличение удельной площади поверхности почти в 7,5 раза также подтверждает вывод о том, что количество пор значительно увеличилось, а их размер уменьшился. Основным объяснением особенности изменения структуры древесно-гипсового композитного материала является выдвинутое предположение о заполнении межчастичного пространства

древесно-гипсовой структуры кристаллами этtringита. В результате формируется материал с более высоким количеством замкнутых пор меньшего размера, имеющих округлую форму, стремящуюся к сферической, что обуславливает уменьшение количества дефектов структуры материала путем формирования более плотной и однородной структуры, что, в свою очередь, также сказывается на росте механических характеристик.

Заключение

Частичное замещение гипсового вяжущего цементом в составе древесно-гипсового композитного материала способствует образованию и росту кристаллов этtringита. На начальном этапе новообразованные кристаллы заполняют поровое пространство композитного материала, сжимая древесные опилки, тем самым улучшая механические характеристики и выступая в качестве армирующих элементов. Все это на уровне образования структуры древесно-гипсового композитного материала позволяет повысить его прочностные характеристики. Однако при полном заполнении порового пространства и максимальном сжатии древесных опилок наступает стадия невозможности увеличения твердой фазы. В результате дальнейший рост кристаллов этtringита приводит к образованию дополнительных внутренних напряжений, что снижает прочностные характеристики материала.

Таким образом, для повышения прочностных характеристик древесно-гипсового композитного материала возможно использование цемента в качестве добавки. Однако количество цемента должно соответствовать требуемому объему образования и роста кристаллов этtringита для заполнения порового пространства и максимального сжатия древесных опилок. Результаты исследования показали, что оптимальным содержанием цемента для изготовления древесно-гипсового композитного материала с повышенными прочностными характеристиками является 16,5 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 2788603 С1 Российская Федерация, МПК C04B 28/14, C04B 18/26. Древесно-гипсовый композит : № 2022108904 : заявл. 04.04.2022 : опубл. 23.01.2023 / Ерофеев А.В., Горохов Т.И., Ковалев Н.С., Горохов С.И. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». EDN: BPWIRU
2. Ковалев Н.С., Горохов Т.И., Ерофеев А.В. О результатах использования цемента в качестве добавки для повышения прочностных характеристик при производстве древесно-гипсового композитного материала // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной 45-летию Института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета, Тамбов, 13–14 июня 2024 г. Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2024. С. 271–274. EDN: ZOILZP
3. Самченко С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня. Москва : НИУ МГСУ, 2016. Электрон. дан. и прогр. (14 Мб). (Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ). URL: <http://www.iprbookshop.ru>
4. Мирюк О.А. Учебное пособие по дисциплине «Вяжущие вещества». Магнитогорск : МГТУ, 2006. 163 с. ISBN 5-89514-698-8.
5. Еленова А.А. Разработка комплексной добавки для ускоренного твердения цементного камня : специальность 05.17.11 «Технология силикатных и тугоплавких неметаллических

- материалов»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Еленова Аурика Алмазовна. Москва, 2017. 22 с. EDN: RYJDOC
6. Еленова А.А., Кривобородов Ю.Р. Влияние гидродинамически активированной добавки кристаллогидрата на гидратацию и твердение цементного камня // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 7 (176). С. 36–38. EDN: XEBKXX
 7. Будников П.П. Гипс, его исследование и применение. Москва : Стройиздат, 1951. 372 с.
 8. Самченко С.В. Роль этtringита в формировании и генезисе структуры камня специальных цементов. Москва : Федеральное агентство по образованию, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2005. 154 с. ISBN 5-7237-0514-0. EDN: QNDVZV
 9. Самченко С.В. Структурообразование при твердении сульфатированных цементов : специальность 05.17.11 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2005.
 10. Методические указания по порометрии капиллярно-пористых строительных материалов / разраб. В.М. Казанский [и др.] ; Гос. НИИ строит. материалов и изделий. Киев : [Б. и.], 1983. 71 с.

REFERENCES

1. Yerofeev A.V., Gorokhov T.I., Kovalev N.S., Gorokhov S.I. “Wood-gypsum composite”. Patent Russ. Fed. No. 2788603. 2023. EDN: BPWIRU (In Russian)
2. Kovalev N.S., Gorokhov T.I., Erofeev A.V. Cement as an additive to wood-plaster composition for its strength improvement. In: *Proc. 10th Int. Sci. Conf. ‘Stable Development of the Region: Architecture, Construction, Transport’*. June 13–14. Tambov: Tambov State Technical University, 2024. Pp. 271–274. EDN: ZOILZP (In Russian)
3. Samchenko S.V. Formation and genesis of cement stone structure. Moscow, 2016. Available: www.iprbookshop.ru (In Russian)
4. Miryuk O.A. Binding Materials. Magnitogorsk, 2006. 163 p. ISBN 5-89514-698-8. (In Russian)
5. Elenova A.A. ‘Development of a complex additive for accelerated hardening of cement stone’. PhD Abstract. Moscow, 2017. 22 p. EDN: RYJDOC (In Russian)
6. Elenova A.A., Krivoborodov Yu.R. The Effect of a Hydrodynamically Activated Crystallohydrate Additive on Cement Hydration and Hardening. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2016; 30 (7); 36–38. (In Russian)
7. Budiikov P.P. Gypsum Research and Application. Moscow: Stroyizdat, 1951. 372 p. (In Russian)
8. Samchenko S.V. Ettringite Role in the Formation and Genesis of Structure of Special Hydrated Cement. Moscow, 2005. 154 p. (In Russian)
9. Samchenko S.V. “Structure formation during hardening of sulfated cements”. DSc Thesis. Moscow, 2005. (In Russian)
10. Kazansky V.M., et al. (Eds.) Methodological Guidelines for Mercury Injection of Capillary-Porous Building Materials. Kiev, 1983. 71 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Горохов Тимофей Иванович, аспирант, Тамбовский государственный технический университет, 392000, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Д, gorohowt@yandex.ru

Ерофеев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет, 392000, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Д, AV.Erofeev@yandex.ru

Ковалев Никита Святославович, студент, Тамбовский государственный технический университет, 392000, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Д, kov.nik.01@mail.ru

Authors Details

Timofey I. Gorokhov, Research Assistant, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, gorohowt@yandex.ru

Aleksandr V. Yerofeyev, PhD, A/Professor, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, AV.Erofeev@yandex.ru

Nikita S. Kovalev, Student, Research Assistant, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, kov.nik.01@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.01.2025
Одобрена после рецензирования 10.10.2025
Принята к публикации 13.10.2025

Submitted for publication 27.01.2025
Approved after review 10.10.2025
Accepted for publication 13.10.2025