

---

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

---

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Известия вузов. Строительство. 2024. № 1. С. 47–57.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2024; (1): 47–57.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.54:539.217.3

DOI: 10.32683/0536-1052-2024-781-1-47-57

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ВОДОСТОЙКОСТЬ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

Нонна Степановна Ступень<sup>1</sup>, Александр Викторович Каклюгин<sup>2</sup>,  
Любовь Ивановна Касторных<sup>2</sup>, Виктор Викторович Коваленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина,  
Брест, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Донской государственный технический университет,  
Ростов-на-Дону, Россия

**Аннотация.** Представлены результаты исследований, направленных на повышение длительной водостойкости строительных изделий на основе магнезиального цемента. Данная цель была достигнута за счет использования микрокремнезема в качестве модифицирующей добавки и применения для уплотнения формовочных смесей метода прессования под давлением 40 МПа. Оценка длительной водостойкости прессованных модифицированных композитов производили по изменению значений коэффициентов размягчения и водостойкости контрольных образцов после их выдерживания в воде в течение 1, 7, 28, 60 и 90 сут. Состав продуктов твердения на разных этапах испытаний определяли с использованием физико-химических методов исследования. Выявлено, что модификация магнезиального вяжущего микрокремнеземом и уплотнение формовочных смесей прессованием позволяют получить прочные и долговечные композиты для изготовления мелкоштучных прессованных изделий для стен и полов зданий с влажностью воздуха внутри помещений более 75 %. Использование в составе формовочных смесей вторичного ресурса должно способствовать снижению себестоимости изделий.

**Ключевые слова:** магнезиальные вяжущие вещества, микрокремнезем, прессованные композиты, длительная водостойкость, коэффициент водостойкости, коэффициент размягчения

**Для цитирования:** Ступень Н.С., Каклюгин А.В., Касторных Л.И., Коваленко В.В. Оценка влияния добавки микрокремнезема на длительную водостойкость магнезиальных композитов // Известия вузов. Строительство. 2024. № 1. С. 47–57. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-781-1-47-57.

Original article

## ASSESSMENT OF THE EFFECT OF MICROSILICA ADDITIVE ON LONG-TERM WATER RESISTANCE OF MAGNESIA COMPOSITES

Nonna S. Stupen<sup>1</sup>, Alexander V. Kaklyugin<sup>2</sup>, Lyubov I. Kastornykh<sup>2</sup>,  
Victor V. Kovalenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Brest State A.S. Pushkin University, Brest, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

**Abstract.** The results of estimation of modifying influence of microsilica additive on water resistance of magnesia composites made by pressing under pressure 40 MPa are presented. Assessment of long-term water resistance of pressed modified composites was carried out by changing values of softening coefficients and water resistance of control samples after their soaking in water for 1, 7, 28, 60 and 90 days. The composition of the hardening products at different stages of the tests was determined by physico-chemical research methods. It was found out that the modification of magnesia binder with microsilica and compaction of molding sand by pressing allows obtaining strength and durability composites for making small piece molded products for walls and floors of buildings with indoor humidity over 75 %. The use of a secondary resource in the composition of molding mixtures should help to reduce the cost price of products.

**Keywords:** magnesia binders, microsilica, pressed composites, long-term water resistance, water resistance coefficient, softening coefficient

**For citation:** Stupen N.S., Kaklyugin A.V., Kastornykh L.I., Kovalenko V.V. Assessment of the effect of microsilica additive on long-term water resistance of magnesia composites. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; (1): 47–57. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2024-781-1-47-57.

**Введение.** Строительные материалы и изделия на основе магнезиальных вяжущих веществ обладают хорошими физико-механическими и эксплуатационными свойствами, не требуют тепловой обработки в процессе производства, могут изготавливаться с использованием заполнителей не только минерального, но и растительного происхождения [1, 2]. Существенным недостатком таких изделий является их низкая водостойкость, значительно ограничивающая область применения и, в частности, не позволяющая их использование в ограждающих конструкциях зданий, а также в помещениях с влажностью более 75 % [3–5].

Повышению водостойкости магнезиальных вяжущих веществ и изделий на их основе посвящено много исследований отечественных и зарубежных ученых. Ряд исследователей предлагают в этих целях использовать органические модификаторы (синтетические смолы, латексы, эфиры, спирты), например, в виде пропиток, образующих защитные пленки на поверхности материала [6–8]. Другим направлением является введение в систему активных минеральных добавок, обеспечивающих формирование структуры искусственного магнезиального камня из труднорастворимых комплексов [9–12].

По нашему мнению, один из наиболее эффективных минеральных модификаторов магнезиальных вяжущих веществ – микрокремнезем, представляющий собой побочный продукт, образующийся при восстановлении высококачественного кварца углем в дуговых печах при изготовлении кристаллического

кремния и ферросилиция. Ультрадисперсные сферические частицы микрокремнезема состоят из аморфного оксида кремния, что обуславливает их высокую пуццоланическую активность [13, 14]. Результаты наших предшествующих исследований показали, что в сочетании с прессованием как способом уплотнения формовочных смесей добавка микрокремнезема способна значительно повысить водостойкость затвердевшего магнезиального камня за счет появления в его структуре труднорастворимых соединений [15, 16]. Комплексом методов физико-химического анализа установлен фазовый и минералогический состав продуктов твердения прессованных магнезиальных кремнеземсодержащих композитов. Наряду с традиционными гидроксихлоридами магния типа  $5\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$  и  $3\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$  [17, 18] в структуре затвердевшего модифицированного магнезиального камня обнаружены труднорастворимые гидросиликаты магния типа серпентина  $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и сепиолита  $8\text{MgO} \cdot 12\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Сочетание кристаллической и аморфной фаз, включающих субмикроструктурные новообразования, обуславливает формирование плотной структуры, что повышает прочность и водостойкость прессованных композитов.

Водостойкость чаще всего оценивают по величине снижения прочности после кратковременного насыщения водой. На наш взгляд, более точно прогнозировать долговечность композиционных строительных материалов на основе магнезиальных вяжущих можно по результатам длительных лабораторных испытаний, предусматривающих продолжительное выдерживание контрольных образцов в воде, а также оценку их способности восстанавливать первоначальную прочность по завершении повторного высушивания.

*Целью* настоящих исследований является оценка влияния модифицирующей добавки микрокремнезема, обладающей пуццоланическими свойствами, на длительную водостойкость прессованных магнезиальных композитов, определяемую по изменению физико-механических характеристик контрольных образцов после их продолжительной выдержки в воде.

**Материалы и методы.** В экспериментальных исследованиях использовали магнезиальное вяжущее вещество марки ПМК-75 по ГОСТ 1216–87 «Порошки каустические магнезитовые. Технические условия», активность которого составляет 40 МПа при сжатии и 18 МПа при изгибе. В качестве модифицирующей добавки в составе формовочных смесей применяли микрокремнезем, представляющий собой ультрадисперсный порошок (удельная поверхность  $2000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), содержащий не менее 85 % аморфного  $\text{SiO}_2$ . В исследованных составах микрокремнеземом заменяли 10, 15, 20 и 25 % магнезиального вяжущего. В качестве затворителя использовали природный бишофит (концентрация 30 %), основным компонентом которого является  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  при соотношении  $\text{MgCl}_2/\text{MgO}$  в формовочной смеси равном 0,072.

Оценку длительной водостойкости кремнеземсодержащих магнезиальных композитов проводили с использованием контрольных образцов, отформованных из смесей, составы которых в предварительных опытах показали наилучшие результаты по прочности на сжатие и водостойкости (составы 3–6). Образцы изготавливали методом прессования под давлением 40 МПа в специальных пресс-формах цилиндрах высотой 50,5 мм. Для проведения

сравнительных испытаний использовали образцы без добавки микрокремнезема, уплотненные методом вибрирования и изготовленные из теста нормальной густоты с водотвердым отношением (В/Т) 0,55 (состав 1). Нормальную густоту теста определяли с помощью прибора Вика в соответствии с ГОСТ 30744. Образцы состава 2 также не содержали модифицирующей добавки микрокремнезема и были отпрессованы под давлением 40 МПа (В/Т отношение 0,19). Составы исследуемых формовочных смесей и физико-механические характеристики отформованных из них образцов приведены в таблице.

Для оценки стойкости при длительном водонасыщении контрольные образцы погружали в емкости с водой, в которых их выдерживали 1, 7, 28, 60 и 90 сут при температуре  $(25\pm 3)$  °С. Через указанные промежутки времени из воды извлекали по 10 образцов, половину из которых немедленно испытывали на прочность при сжатии в водонасыщенном состоянии, а остальные – после высушивания в сушильном шкафу при температуре  $(100\pm 5)$  °С до постоянной массы. По изменению массы образцов до и после их выдерживания в воде рассчитывали водопоглощение по массе. Длительную водостойкость исследованных составов оценивали по изменению коэффициентов размягчения (отношение среднего значения прочности на сжатие контрольных образцов в водонасыщенном и высушенном состояниях до постоянной массы) и водостойкости (частное от деления прочности материала в высушенном состоянии после выдержки соответствующее время в воде к его прочности до начала испытаний).

Фазовый, минералогический, химический составы исходных сырьевых материалов, а также составы продуктов твердения магнизиальных композитов на всех стадиях испытания изучали термическим, рентгенофазовым, петрографическим, химическим и спектральным методами исследования.

**Результаты исследования.** Характер изменения предела прочности при сжатии контрольных образцов после их водонасыщения в течение 1, 7, 28, 60

**Составы формовочных смесей и физико-механические характеристики модифицированных вяжущих**

**Compositions of molding mixtures and physico-mechanical characteristics of modified binders**

Состав	Содержание, мас. %		Предел прочности образцов при сжатии, МПа		Коэффициент размягчения	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водопоглощение, мас. %	Открытая пористость, %
	магнезиальное вяжущее	микрокремнезем	сухих	водонасыщенных				
1	100	–	41,1	22,1	0,54	1900	13,9	26,41
2	100	–	46,1	26,3	0,57	2000	8,9	17,8
3	90	10	66,7	53,6	0,80	2080	5,8	12,06
4	85	15	62,8	44,6	0,71	2088	5,7	11,90
5	80	20	54,7	37,2	0,68	2080	6,5	13,50
6	75	25	46,8	29,3	0,62	2075	8,5	17,64

и 90 сут представлен на рис. 1. Анализ результатов исследований показывает, что прочность высушенных и водонасыщенных образцов, отформованных из всех исследованных составов, изменяется немонотонно. В первые 7 сут испытаний прочность образцов составов 3–5 (с добавкой микрокремнезема) возрастает и в сухом, и водонасыщенном состояниях. Отмеченное увеличение прочности прессованных модифицированных магнетитовых композитов на этом этапе испытаний можно объяснить сложными физико-химическими процессами, происходящими в их структуре в водной среде. Они связаны с дополнительной гидратацией оксида магния, а также частичным переходом аморфной фазы гидросиликатов магния в кристаллическую, что подтверждается данными комплексного физико-химического анализа. Установлено, что на ранних стадиях твердения (1–7 сут) интенсивно протекают реакции гидратации оксида магния с образованием гидрооксихлоридов магния. В поздние сроки твердения (28 сут и более) и при дополнительном увлажнении происходит образование труднорастворимых гидросиликатов магния, обуславливающих повышение водостойкости искусственного камня. Появление в структуре затвердевшего цементного камня новообразований типа гидросиликатов магния и увеличение количества гидрооксихлоридов магния приводит к уплотнению структуры затвердевшего камня и снижению его открытой пористости [19]. По мере увеличения продолжительности выдержки образцов в воде происходит снижение прочности. У образцов, отформованных из чистого вяжущего без модифицирующего наполнителя и уплотненным вибрированием (состав 1) и прессованием (состав 2), после 28 сут их выдержки в воде, наблюдается потеря прочности на 63 % и 13 % соответственно. Разрушение образцов состава 1 произошло до 60 сут их хранения в воде.

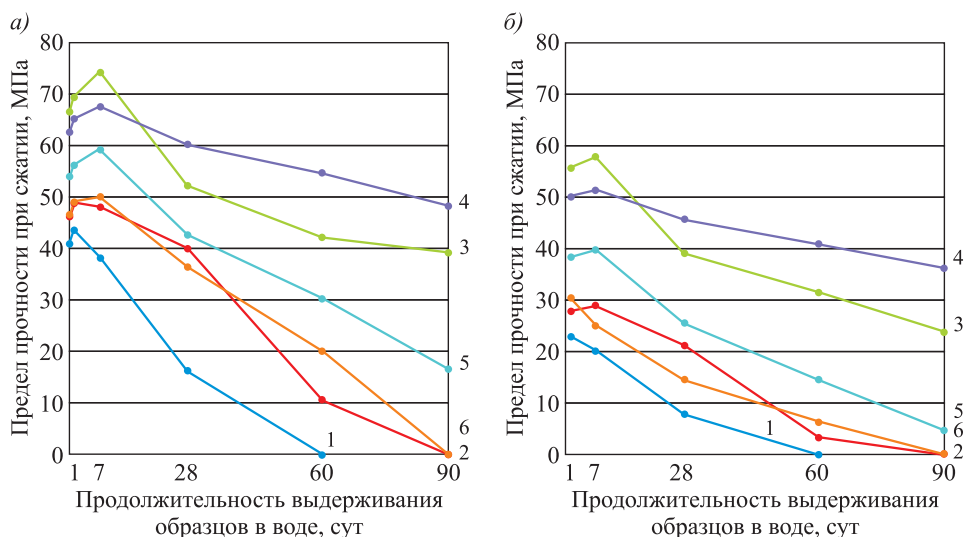


Рис. 1. Влияние продолжительности выдерживания контрольных образцов в воде на их прочность в высушенном (а) и водонасыщенном (б) состояниях

1–6 – номера составов

Fig. 1. The effect of the duration of exposure of control samples in water on their strength in the dried (a) and water-saturated (b) state

1–6 – composition numbers

Прессованные образцы (состав 2) выдержали 60 сут испытаний, а при дальнейшей выдержке в воде разрушились. Это свидетельствует о преимуществе прессования как способа уплотнения формовочных смесей.

Гораздо устойчивыми к длительной выдержке в воде оказались образцы, отформованные прессованием из составов 3, 4 (10 % и 15 % микрокремнезема соответственно). После 28 сут выдержки образцов в воде прочность прессованных магниальных композитов в высушенном и водонасыщенном состояниях снижается. В наименьшей степени это происходит у образцов состава 4, содержащего 15 % модифицирующей добавки микрокремнезема. Потеря прочности в высушенном состоянии составила 4 %, а в водонасыщенном – 8,8 %. Образцы состава 4 оказались наиболее водостойкими и после 90 сут выдержки в воде. Снижение прочности на сжатие материала равно 21,3 % и 27,7 % в высушенном и водонасыщенном состояниях соответственно. Дальнейшее увеличение содержания микрокремнезема до 20 % в магниальное вяжущее дает низкие показатели прочности (состав 5). После 90 сут выдержки в воде прочность образцов составила 16,6 МПа в высушенном состоянии и 4,68 МПа – в водонасыщенном. Образцы состава 6 (25 % микрокремнезема) обладают низкими показателями прочности в водонасыщенном состоянии даже на начальном этапе испытания и разрушаются до 90 сут испытаний.

Полученные закономерности хорошо согласуются с изменением водопоглощения по массе образцов по мере увеличения времени их выдержки в воде (рис. 2). Сопоставляя данные изменения прочности образцов (см. рис. 1) и их водопоглощения по массе с увеличением времени выдержки образцов в воде, можно проследить следующую закономерность: чем больше прирост прочности материала в первые 7 сут испытаний, тем одновременно заметнее снижается его водопоглощение. Резкое увеличение водопоглощения после 28 сут хранения в воде наблюдается у образцов составов 1 и 2, что

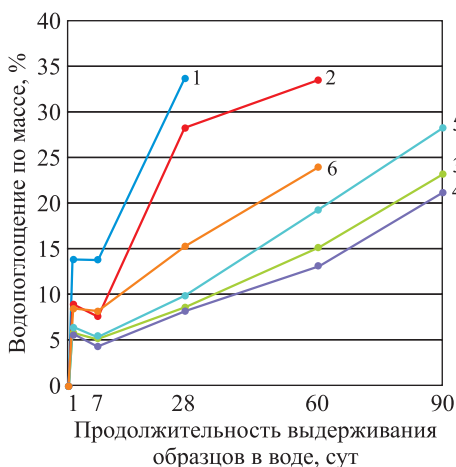


Рис. 2. Влияние времени выдерживания образцов в воде на их водопоглощение  
1–6 – номера составов

Fig. 2. The effect of the holding time of samples in water on their water absorption  
1–6 – composition numbers

сопровождается значительной потерей прочности и в высушенном, и в водонасыщенном состояниях. Следует отметить, что избыточное содержание микрокремнезема (состав 6) после 60 сут хранения в воде негативно сказывается на открытой пористости образцов, о чем свидетельствует увеличение водопоглощения, и образцы разрушаются до 90 сут выдержки в воде.

Таким образом, результаты исследований показывают, при длительной выдержке в воде происходят дополнительная гидратация и кристаллизация аморфных гидросиликатов магния, приводящие к уменьшению пористости прессованных композитов. Уплотнение образцов прессованием позволяет более чем в два раза сократить содержание хлорида маг-

ния в составе затворителя, сохраняя концентрацию раствора бишофита 30 %, что способствует уменьшению растворимости образующихся гидроксихлоридов магния ( $5\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$  и  $3\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ ). Кроме этого, прессование как способ уплотнения предотвращает высолообразование на поверхности образцов из модифицированных составов.

Процесс твердения прессованных магнезиальных композитов, модифицированных микрокремнеземом в оптимальном количестве (15 % по массе), сопровождается образованием сложной комбинированной структуры, содержащей коагуляционную, конденсационную и кристаллизационную фазы. При увеличении продолжительности испытаний вода оказывает все более растворяющее и расклинивающее действие на кристаллизационные контакты в структуре прессованных композитов, что приводит к увеличению водопоглощения по массе и снижению прочности.

На рис. 3, а и б представлены зависимости изменения коэффициентов размягчения и водостойкости соответственно. Изменение значений коэффициентов размягчения и водостойкости для составов 3–6 согласуется с характером изменения прочности образцов в высушенном и водонасыщенном состояниях.

Наибольшим коэффициентом размягчения до испытаний обладали образцы составов 3 и 4 (0,80 и 0,71 соответственно). После 90 сут водонасыщения коэффициент размягчения состава 3 снизился до 0,61, а у образцов из состава 4 он наоборот несколько увеличился до 0,75. Это еще раз подтверждает, что наилучшую структуру композитов с оптимальным содержанием труднорастворимых соединений обеспечивает содержание микрокремнезема 15 % по массе. Не модифицированные микрокремнеземом образцы (составы 1 и 2)

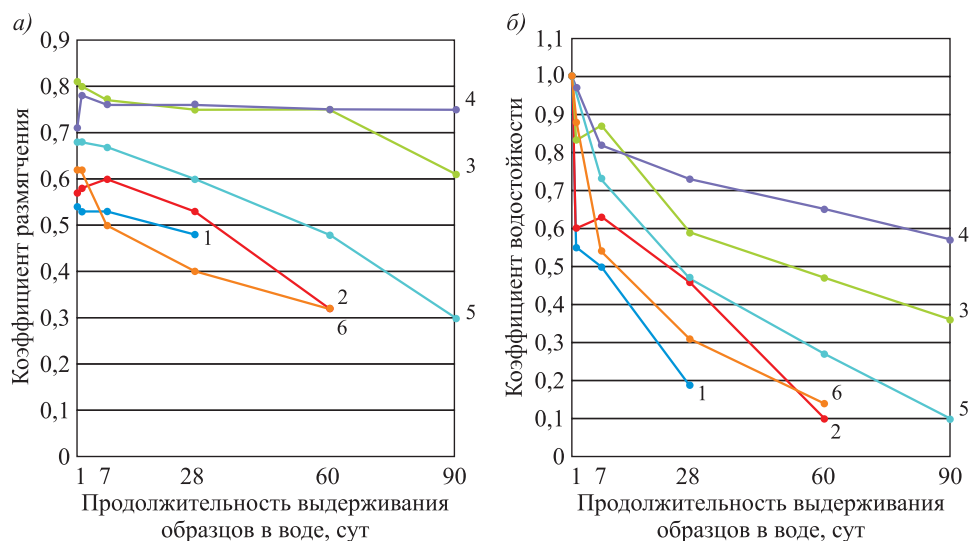


Рис. 3. Изменение коэффициентов размягчения (а) и водостойкости (б) с увеличением продолжительности выдерживания контрольных образцов в воде

1–6 – номера составов

Fig. 3. Change in softening coefficients (a) and water resistance (b) with an increase in the duration of holding control samples in water

1–6 – composition numbers

при значениях коэффициентов размягчения 0,48 и 0,32 соответственно начинают разрушаться, вероятно, вследствие высокой растворимости кристаллизационных контактов.

Как видно из рис. 3, б, образцы без добавки микрокремнезема, уплотненные вибрированием (состав 1), характеризуются низким начальным коэффициентом водостойкости ( $k_b = 0,54$ ), величина которого после 7 сут испытаний снижается незначительно ( $k_b = 0,50$ ). Затем после 28 сут испытаний коэффициент водостойкости понижается до 0,19 и к 60 сут образцы разрушаются. Своего минимального значения коэффициенты водостойкости составов 2 и 6 достигают после 60 сут испытаний (соответственно 0,10 и 0,14), а состава 5 – через 90 сут ( $k_b = 0,1$ ). Образцы с 10 % микрокремнезема (состав 3) после 90 сут выдержки в воде характеризовались низким значением коэффициента водостойкости 0,36, при увеличении содержания микрокремнезема до 15 % (состав 4) значение составило 0,57.

**Заключение.** Проведенные исследования показали, что замена части магниезального вяжущего вещества модифицирующим наполнителем из микрокремнезема, содержащего не менее 85 % аморфного  $\text{SiO}_2$  и обладающего пуццоланическими свойствами, благоприятно сказывается на длительной водостойкости пресованных магниезальных композитов. Это обусловлено образованием в структуре затвердевшего вяжущего камня труднорастворимых гидросиликатов магния типа серпентина и сепиолита.

Установлено, что наиболее высокой стойкостью при длительном хранении в воде обладают магниезальные композиты, содержащие 15 % модифицирующего наполнителя микрокремнезема. После 90 сут испытаний на длительную водостойкость коэффициент размягчения этого состава композиционного вяжущего составил 0,75, а коэффициент водостойкости – 0,57. Образцы, не модифицированные микрокремнеземом, отформованные методом вибрирования с В/Т отношением 0,55, разрушаются после 60 сут испытаний на длительную водостойкость, а аналогичные образцы, уплотненные пресованием под давлением 40 МПа, – через 90 сут.

Разработанные составы композиционных магниезальных вяжущих с 15 % микрокремнезема рекомендуются для производства пресованных строительных изделий, эксплуатируемых в помещениях с влажностью более 75 %. Использование в составе формовочных смесей вторичного ресурса позволяет снизить себестоимость изделий из магниезальных композитов.

#### Список источников

1. *Miryuk O.* Journal of Physics: Conference Series. 1967(1):01, 2054 (2021) doi: 10.1088/1742-6596/1967/1/012054.
2. *Ivanov I., Kramar L., Orlov A.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 262, 012028 (2017) doi: 10.1088/1757-899X/262/1/012028.
3. *Zyryanova V., Lytkina E., Ochur-Ool A.* In Defect and Diffusion Forum, 410, 790–798 (2021) doi:10.4028/www.scientific.net/ddf.410.790.
4. *Dolzhikov P., Prokopov A., Prokopova M., Hamidullina N.* MATEC Web of Conferences, 196, 3008 (2018) doi: 10.1051/mateconf/201819603008.
5. *Ayman M., S.El-Mahllawy Medhat, Hassan Hassan A., Sufe Waleed H., Zeedan Sayieda R.* Effect of type of mixing water and sand on the physico-mechanical properties of magnesia cement masonry units // HBRC Journal. 2012. Issue 1, no. 8. P. 8–13.



6. *Мирюк О.А.* Влияние наполнителей на свойства жидкостекольных композиций // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2019. Т. 62. Вып. 12. С. 51–56.
7. *Kastiukas G., Ruan S., Unluer C., Liang X., Zhou A.* Case Study in Europe, Sustainability, 11(24), 6957 (2019) doi: 10.3390/su11246957.
8. *Zhang R., Panesar D.K.* Sulfate resistance of carbonated ternary mortar blends: Portland cement, reactive MgO and supplementary cementitious materials // J. Clean. Prod. 2019. 238.
9. *Chen H.* Preparation and Performance of Magnesia Cement Plate Modified by Some Modifiers // International Conference on Agricultural and Natural Resources Engineering Advances in Biomedical Engineering. 2011. Vol. 3-5. P. 261–265.
10. *Garda-Trinanes P., Morgeneyer M., Casares J., Bao M.* Use of organic byproducts as binders in the roll compaction of caustic magnesia // Powder Technology. 2012. Vol. 226. P. 173–179.
11. *Chernykh T.* Energy-saving magnesium oxychloride cement intensifier // SGEM International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts. 2015. Vol. 1. P. 359–363.
12. *Орлов А.А., Черных Т.Н., Крамар Л.Я.* Стекломагнезиальные листы: проблемы производства, применения и перспективы развития // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 48–52.
13. *Прокофьева В.В.* Декоративно-технические свойства строительных материалов на основе магнезиального сырья // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 2. С. 169–173.
14. *Плеханова Т.А.* Магнезиальные композиционные материалы, модифицированные сульфатными добавками: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2005. 22 с.
15. *Kaklyugin A., Stupen N., Kastornykh L., Kovalenko V.* Pressed composites based on gypsum and magnesia binders modified with secondary resources // Materials Science Forum. 2020. Vol. 1011. P. 52–58.
16. *Ступень Н.С., Каклюгин А.В., Касторных Л.И., Коваленко В.В.* Повышение водостойкости прессованных композитов на основе магнезиального вяжущего // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, № 2. С. 176–185.
17. *Митина Н.А., Лотов В.А., Кабанова В.В., Сухушина А.В.* Особенности гидратации магнезиального цемента // Фундаментальные исследования. 2013. № 8. С. 676–680.
18. *Лотов В.А., Митина Н.А.* Получение водостойкого магнезиального вяжущего // Техника и технология силикатов. 2010. Т. 17, № 3. С. 19–22.
19. *Каклюгин А.В., Ступень Н.С., Касторных Л.И., Коваленко В.В.* Зависимость водостойкости прессованных материалов на основе воздушных вяжущих веществ от величины открытой пористости // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10, № 1. С. 68–75.

## References

1. *Miryuk O.* Journal of Physics: Conference Series. 1967(1):01, 2054 (2021) doi: 10.1088/1742-6596/1967/1/012054.
2. *Ivanov I., Kramar L., Orlov A.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 262, 012028 (2017) doi: 10.1088/1757-899X/262/1/012028.
3. *Zyryanova V., Lytkina E., Ochur-Ool A.* In Defect and Diffusion Forum, 410, 790–798 (2021) doi:10.4028/www.scientific.net/ddf.410.790.
4. *Dolzhirov P., Prokopov A., Prokopova M., Hamidullina N.* MATEC Web of Conferences, 196, 3008 (2018) doi: 10.1051/mateconf/201819603008.
5. *Ayman M., S.El-Mahllawy Medhat, Hassan Hassan A., Sufe Waleed H., Zeedan Sayieda R.* Effect of type of mixing water and sand on the physico-mechanical properties of magnesia cement masonry units. *HBRC Journal*. 2012; 1(8): 8–13.

6. *Miryuk O.A.* The influence of fillers on the properties of liquid glass compositions. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = News of universities. Chemistry and chemical technology.* 2019; 62(12): 51–56. (In Russ.).
7. *Kastiukas G., Ruan S., Unluer C., Liang X., Zhou A.* Case Study in Europe, Sustainability, 11(24), 6957 (2019) doi: 10.3390/su11246957.
8. *Zhang R., Panesar D.K.* Sulfate resistance of carbonated ternary mortar blends: Portland cement, reactive MgO and supplementary cementitious materials. *J. Clean. Prod.* 2019; 238.
9. *Chen H.* Preparation and Performance of Magnesia Cement Plate Modified by Some Modifiers. International Conference on Agricultural and Natural Resources Engineering Advances in Biomedical Engineering. 2011; 3-5: 261–265.
10. *Garda-Trinanes P., Morgeneyer M., Casares J., Bao M.* Use of organic byproducts as binders in the roll compaction of caustic magnesia. *Powder Technology.* 2012; 226: 173–179.
11. *Chernykh T.* Energy-saving magnesium oxychloride cement intensifier. SGEM International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts. 2015; 1: 359–363.
12. *Orlov A.A., Chernykh T.N., Kramar L.Ya.* Glass-magnesia sheets: problems of production, application and development prospects. *Stroitel'nyye materialy = Construction materials.* 2014; (3): 48–52. (In Russ.).
13. *Prokof'yeva V.V.* Decorative and technical properties of building materials based on magnesian raw materials. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin of civil engineers.* 2012; (2): 169–173. (In Russ.).
14. *Plekhanova T.A.* Magnesia composite materials modified with sulfate additives: Abstract ... PhD. Kazan, 2005. 22 p. (In Russ.).
15. *Kaklyugin A., Stupen N., Kastornykh L., Kovalenko V.* Pressed composites based on gypsum and magnesia binders modified with secondary resources. *Materials Science Forum.* 2020; 1011: 52–58.
16. *Stupen' N.S., Kaklyugin A.V., Kastornykh L.I., Kovalenko V.V.* Increasing the air resistance of pressed composites based on magnesia binder. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU.* 2021; 16(2): 176–185. (In Russ.).
17. *Mitina N.A., Lotov V.A., Kabanova V.V., Sukhushina A.V.* Features of hydration of magnesian cement. *Fundamental'nyye issledovaniya = Fundamental research.* 2013; (8): 676–680. (In Russ.).
18. *Lotov V.A., Mitina N.A.* Getting a water-resistant magnesian binder. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov = Technique and technology of silicates.* 2010; 17(3): 19–22. (In Russ.).
19. *Kaklyugin A.V., Stupen N.S., Kastornykh L.I., Kovalenko V.V.* Dependence of water resistance of moulded materials containing air-setting binders on effective porosity. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2020; 10(1): 68–75. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

**Н.С. Ступень** – кандидат технических наук, доцент, chemskorp@yandex.ru

**А.В. Каклюгин** – кандидат технических наук, доцент, kaklugin@gmail.com

**Л.И. Касторных** – кандидат технических наук, доцент, likas9@mail.ru

**В.В. Коваленко** – старший преподаватель, kvv0407@rambler.ru

#### **Information about the authors**

**N.S. Stupen** – PhD, Ass. Professor, chemskorp@yandex.ru

**A.V. Kaklyugin** – PhD, Ass. Professor, kaklugin@gmail.com

**L.I. Kastornykh** – PhD, Ass. Professor, likas9@mail.ru

**V.V. Kovalenko** – Senior Lecturer, kvv0407@rambler.ru

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.11.2023  
Одобрена после рецензирования 04.12.2023  
Принята к публикации 11.12.2023

The article was submitted 03.11.2023  
Approved after reviewing 04.12.2023  
Accepted for publication 11.12.2023

---