

Зависимость водостойкости прессованных материалов на основе воздушных вяжущих веществ от величины открытой пористости

© А.В. Каклюгин^а, Н.С. Ступень^б, Л.И. Касторных^а, В.В. Коваленко^б

^аДонской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

^бБрестский государственный университет имени А.С. Пушкина, г. Брест, Республика Беларусь

Резюме: Цель работы – исследование возможности получения высокопрочных и водостойких изделий на основе модифицированных воздушных вяжущих веществ методом прессования и оценка влияния на водостойкость получаемых искусственных камневидных материалов их структурных характеристик, в том числе открытой пористости. Модификацию гипсового вяжущего осуществляли за счет совместного введения в его состав карбонатсодержащего шлама химводоочистки теплоэлектростанций и моноаммонийфосфата, а магнезиального цемента – микрокремнезема и тонкомолотой горелой породы шахт. Физико-механические характеристики контрольных образцов определяли по стандартным и общепринятым методам. Повышение водостойкости прессованных модифицированных композитов оценивали по изменению коэффициента размягчения. Показано, что при использовании низкообжиговых гипсовых вяжущих веществ повышение прочности и водостойкости прессованных изделий на их основе может быть достигнуто за счет изменения структурообразования прессованного материала и образования на поверхности элементов его мелкокристаллической структуры экранирующих защитных пленок из труднорастворимых фосфатов кальция. Повышение прочности и водостойкости прессованных изделий из модифицированных магнезиальных вяжущих объясняется появлением в структуре затвердевшего искусственного камня труднорастворимых гидросиликатов, гидроалюминатов и гидроалюмосиликатов магния, а также образованием сложной комбинированной структуры, содержащей коагуляционную, конденсационную и кристаллизационную фазы. Установлено, что предлагаемые способы модификации гипсовых и магнезиальных вяжущих веществ обеспечивают повышение прочности и водостойкости прессованных изделий на их основе. Технические характеристики полученных материалов являются достаточными для их использования, в частности, в ограждающих конструкциях зданий. Получена аналитическая зависимость коэффициента размягчения исследуемых материалов от величины их открытой пористости.

Ключевые слова: гипсовые вяжущие вещества, магнезиальный цемент, метод прессования, прочность, водостойкость, шлам химводоочистки теплоэлектростанций, моноаммонийфосфат, горелая порода, микрокремнезем

Информация о статье: Дата поступления 17 января 2020 г.; дата принятия к печати 20 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2020 г.

Для цитирования: 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;10(1):68–75. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-1-68-75>

Dependence of water resistance of moulded materials containing air-setting binders on effective porosity

Alexander V. Kaklyugin, Nonna S. Stupen,
Luybov I. Kastornykh, Viktor V. Kovalenko

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Brest State A.S. Pyshkin University, Brest, the Republic of Belarus

Abstract: This paper is aimed at studying the possibility of obtaining high-strength and waterproof products on the basis of modified air-setting binders using compression moulding, as well as at assessing the impact of their structural characteristics (including effective porosity) on the water resistance of the obtained artificial stone-like materials. Modification of a gypsum binder was performed by adding carbonate-containing sludge produced by thermal power plants during chemical water treatment and monoammonium phosphate. Conversely, magnesia cement was modified by the addition of silica fume and finely-ground fused rock. The physicomachanical properties of control samples were determined according to standard and generally-accepted methods. The increase in water

resistance of modified moulded composites was evaluated by changing the softening coefficient. It is shown that an increase in the strength and water resistance of moulded products can be achieved when using low-calcined gypsum binders by changing the structural formation of the moulded material and thus forming protective films of sparingly-soluble calcium phosphates on the surface of the elements of its fine-crystalline structure. The increase in strength and water resistance of moulded articles on the basis of modified magnesia cement is explained by the formation of poorly soluble magnesium hydrosilicates, hydroaluminates and aluminosilicate hydrates in the structure of hardened artificial stone, as well as by the formation of a complex combined structure including coagulation, condensation and crystallisation phases. It is established that the proposed methods for modifying gypsum and magnesia binders provide increased strength and water resistance of articles moulded on such a basis. The technical characteristics of the obtained materials are sufficient for their specific use in building envelopes. The analytical dependence of the softening coefficient of the studied materials on the value of their effective porosity is determined.

Keywords: low-temperature calcined gypsum binder, sorel cement, compaction pressing, strength, water resistance, slime of water purification of thermoelectric power station, monoammonium phosphate, burnt rock, microsilica

Information about the article: Received January 17, 2020; accepted for publication February 20, 2020; available online March 31, 2020.

For citation: Kaklyugin AV, Stupen NS, Kastornykh LI., Kovalenko VV. 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.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-1-68-75>

Введение

Гипсовые и магнезиальные вяжущие вещества издавна и с успехом применяют в строительстве. От других видов воздушных и гидравлических вяжущих веществ они выгодно отличаются быстрым твердением, способностью связывать органические и неорганические заполнители, а также высокими декоративными свойствами изделий на их основе. Однако материалы на основе гипсовых и магнезиальных вяжущих веществ имеют ограниченное применение в связи с низкой водостойкостью. Низкая водостойкость затвердевшего дигидрата сульфата кальция обусловлена его значительной растворимостью (около 2 г на 1 л воды), что приводит к снижению связей между его кристаллами при увлажнении [1], а также расклинивающим действиям на структуру материала водных пленок, адсорбирующихся на внутренних поверхностях микротрещин и пор [2]. Причиной недостаточной водостойкости магнезиального цемента является состав продуктов его твердения. Так, гидроксид магния в присутствии хлорида магния относительно легко растворим в воде. Оксихлориды магния, составляющие основу затвердевшего цементного камня, неустойчивы при действии воды и подвергаются гидролизу [3]. Повысив прочность и водостойкость изделий на основе воздушных вяжущих веществ можно в значительной степени расширить область их применения в строительстве [4–11]. Этого можно достичь, воздействуя на физико-химические процессы, происходящие при их твердении, а также увеличивая плотность материала. В этих целях наиболее целесообразным нам представляется, с одной стороны, модифицирование вяжущих

веществ эффективными химическими добавками и наполнителями, а с другой – применение для уплотнения жестких формовочных смесей методом прессования под высокими давлениями. При этом химическое взаимодействие модифицирующих добавок с компонентами вяжущих веществ и между собой, должно обеспечить образование труднорастворимых соединений, в том числе в виде экранящих защитных пленок на кристаллах возникающих гидратных новообразований. Использование метода полусухого прессования изделий на основе воздушных вяжущих веществ позволяет значительно уменьшить объем жидкой фазы до ее теоретического или близкого к теоретическому количеству, необходимого для полной гидратации вяжущего. При этом образующиеся продукты твердения фиксируются в структуре в высокодисперсном состоянии, что приводит к значительному повышению прочности материала [12]. Следует также отметить, что уменьшение количества затворителя (раствора хлорида магния – бишофита) снижает содержание несвязанных хлорид-ионов в затвердевшем магнезиальном камне. Это обуславливает понижение растворимости образующихся гидроксида и оксихлоридов магния, а также появление высолов на поверхности изделий.

Методы

В экспериментальных исследованиях применяли низкообжиговое гипсовое вяжущее вещество Г-5 Б II по ГОСТ 125-2018 и магнезиальное вяжущее с содержанием 75,8% MgO. В качестве тонкодисперсного наполнителя в гипсовых смесях использовали шлам химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростова-на-Дону. Высушенный

шлам представляет собой порошок желтоватого цвета с удельной поверхностью 780 м²/кг, состоящий, согласно данным химического, дериватографического и ряда других анализов, на 75% из карбоната кальция. Роль химической модифицирующей добавки выполнял однозамещенный фосфат аммония (моноаммонийфосфат) NH₄H₂PO₄. Для оценки влияния применяемых добавок на свойства искусственного прессованного материала приготавливали композиционные вяжущие, в которых до 60 % гипсового вяжущего заменяли шламом химводоочистки ТЭЦ. Смесь сухих компонентов в процессе перемешивания затворяли водным раствором моноаммонийфосфата. При этом расход безводной химической добавки изменяли от 0 до 3% массы вяжущего и шлама, а водотвердое отношение – от 0,17 до 0,20.

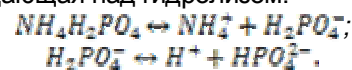
В качестве пуццолановых добавок в магнезиальный цемент использовали микрокремнезем и тонкомолотую горелую породу шахт Ростовской области. Микрокремнезем (микрокремний, микросилика, кремниевая пыль) – побочный продукт производства кремниевых и феррокремниевых сплавов, представляющий собой высокодисперсную пыль кремнезема (удельная поверхность 2000 м²/кг), улавливаемую фильтрами из отходящих газов и содержащую не менее 85% аморфного SiO₂. Используемая горелая порода относится к высокоактивным горелым породам с глинисто-железистым модулем 0,49. Для оценки влияния микрокремнезема и горелой породы на прочность и водостойкость магнезиального цемента приготавливали композиционные вяжущие с содержанием добавок до 25% по массе. В качестве затворителя использовали раствор природного бишофита плотностью 1,28 г/см³. Приготовление исследуемых сырьевых смесей осуществляли на лабораторной бегунковой растворомешалке. Продолжительность перемешивания увлажненной формовочной смеси устанавливали опытным путем и варьировали в пределах от 2 до 20 мин. [13].

Физико-механические характеристики материалов определяли по стандартным и общепринятым методикам на образцах-цилиндрах высотой и диаметром 50,5 мм, изготавливаемых прессованием под давлением от 20 до 60 МПа в специальных пресс-формах. Контрольные образцы твердели в воздушно-сухих условиях. Продолжительность твердения образцов, отформованных из модифицированного гипсового вяжущего, составляла 3 сут., а магнезиального цемента – 28 суток. Перед испытанием гипсовые образцы высушивали в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре (55±2) °С, а из магнезиального цемента – (105±2) °С. После этого половину образцов каждой серии погружа-

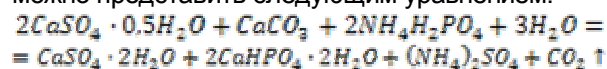
ли в воду на 48 ч. Высушенные и водонасыщенные образцы испытывали на предел прочности при сжатии. По полученным результатам определяли коэффициент размягчения материала, как отношение его прочности на сжатие в водонасыщенном и сухом состоянии.

Результаты и их обсуждение

Результаты ранее проведенных исследований [14–16] показывают, что комплексная модификация гипсового вяжущего карбонатсодержащим наполнителем и моноаммонийфосфатом оказывает положительное влияние на структуру, прочность и водостойкость затвердевшего прессованного материала. Обусловлено это, прежде всего, химическим взаимодействием моноаммонийфосфата с сульфатом кальция вяжущего и карбонатом кальция наполнителя. Моноаммонийфосфат в водных растворах имеет слабокислую реакцию (рН~3,8), благодаря тому, что в воде наряду с гидролизом этой соли происходит диссоциация дигидрофосфат-иона, преобладающая над гидролизом:



Протекающие химические превращения можно представить следующим уравнением:



Процесс взаимодействия компонентов в указанном направлении обусловлен образованием наряду с дигидратом сульфата кальция CaSO₄ · 2H₂O труднорастворимого дигидрата дикальцийфосфата CaHPO₄ · 2H₂O (брушита). Его растворимость составляет всего 0,025 г в 100 л воды. Согласно данным Т.И. Розенберг¹, при высокой скорости образования и малой растворимости появление дигидрата дикальцийфосфата наиболее вероятно в слое насыщения непосредственно у частиц и на поверхности зерен гипса. Описанные химические процессы приводят к значительному замедлению схватывания гипсового вяжущего, что является желательным технологическим фактором при прессовании смесей с низкими водогипсовыми отношениями. Образование дигидрата дикальцийфосфата возможно также в результате взаимодействия карбоната кальция шлама с ионами H⁺ и HPO₄²⁻ добавки моноаммонийфосфата по схеме:

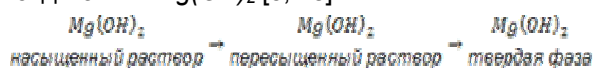


Образующийся CaHPO₄ · 2H₂O адсорбируется на поверхности частичек наполнителя, изменяя состояние его поверхности. Таким образом, в результате модификации сырьевой смеси, состоящей из гипсового вяжущего и шлама, водным раствором моноаммонийфосфата значительная часть как вяжущего, так и наполнителя экранируются фазовыми пленками из трудно-

¹Розенберг Т.И. Исследование механизма твердения гипса и действия добавок: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1957. 230 с.

растворимого фосфата кальция, что изменяет характер их контакта и способствует повышению прочности и водостойкости прессованного материала. Наиболее высокими физико-механическими показателями (прочность на сжатие 45–65 МПа, коэффициент размягчения 0,65–0,70) обладают образцы, изготовленные из смесей, содержащих 60–80% гипсового вяжущего, 20–40% шлама и 2% моноаммонийфосфата [14–16]. Материал выдержал от 25 до 35 циклов попеременного замораживания и оттаивания, что является достаточным для его использования в ограждающих конструкциях. Модифицирование магнезиального цемента микрокремнеземом и тонкомолотой горелой породой также приводит к повышению прочности и водостойкости прессованного материала. Это обусловлено, с одной стороны, появлением среди продуктов его твердения труднорастворимых соединений, а с другой – изменением процесса структурообразования в твердеющем вяжущем камне.

Основным продуктом твердения магнезиального цемента без добавок является гидроксид магния $Mg(OH)_2$ [3, 18]:



Физико-химическими методами исследования установлено, что в модифицированном микрокремнеземом цементном камне содержится гидроксид магния понижается, а появляются труднорастворимые гидросиликаты магния типа серпентина $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ и сепиолита $8MgO \cdot 12SiO_2 \cdot nH_2O$. Композиты с горелой породой, кроме гидросиликатов, содержат еще гидроалюминаты и гидроалюмосиликаты магния типа польгорскита $MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 5H_2O$. Термодинамические аспекты образования этих соединений при обычных условиях твердения доказаны [18]. Кроме этого выявлено, что твердение идет через гелевидную фазу в сочетании с образованием микрокристаллических гидросиликатов, гидроалюмосиликатов и оксихлоридов магния, а коллоидные частицы микрокремнезема и горелой породы являются дополнительными центрами кристаллизации этих новообразований. Наиболее высокими физико-механическими показателями обладают образцы, изготовленные из смесей, содержащих 10–15% микрокремнезема: прочность на сжатие – 60–65 МПа, коэффициент размягчения – 0,78–0,84. При использовании в качестве пуццолановой добавки 20–25% дисперсной горелой породы прочность модифицированного магнезиального цемента на сжатие составила 45–50 МПа, а коэффициент размягчения – 0,85–0,90. Разработанные составы композиционных магнезиальных вяжущих рекомендуются для производства прессованных строительных изделий, эксплуатируемых в помещениях с влажностью более 60% [19, 20]. Следует отметить, что прессование, как способ

уплотнения, позволяет более чем в два раза сократить содержание жидкой фазы хлорида магния в композиционных вяжущих, что обеспечивает уменьшение растворимости образующихся оксихлоридов и гидроксида магния и предотвращает появление высолов на поверхности изделий на основе модифицированного магнезиального цемента. Исследования, проведенные с привлечением методов физико-химического анализа, показали, что предлагаемые способы модификации гипсовых и магнезиальных вяжущих веществ оказывают положительное влияние на формирование структуры прессованных композиционных материалов на их основе. При введении в состав гипсовой формовочной смеси шлама и моноаммонийфосфата в структуре уплотненного материала уменьшается общая пористость и увеличивается количество закрытых пор, что положительно сказывается на его водостойкости. При этом уменьшается наибольший средний радиус капиллярных пор (λ_1) и средний размер пор ($\bar{\lambda}$) при одновременном увеличении показателя их однородности (α). Следует отметить, что полученные нами расчетные параметры пористости прессованного модифицированного гипсового вяжущего незначительно отличаются от аналогичных показателей порового пространства легких бетонов на водостойких гипсоцементнопуццолановых вяжущих, полученных в работах А.В. Ферронской [21]. Структуру прессованного материала из затвердевшего модифицированного гипсового вяжущего также можно охарактеризовать как средне- и крупнопористую ($1 < \bar{\lambda} < 7$), а по однородности пор – как структуру средней однородности ($0,15 < \alpha < 7$). Это указывает на тесную взаимосвязь между водостойкостью гипсовых материалов и параметрами их порового пространства.

За счет введения в состав магнезиального цемента микрокремнезема и горелых пород также удается значительно улучшить параметры пористости затвердевшего прессованного материала. По сравнению с исходным затвердевшим магнезиальным цементом у модифицированного показатель однородности пор в два раза больше, а средний размер пор в три раза меньше. Это объясняется тем, что образующиеся в модифицированном цементном камне гидросиликаты, гидроалюминаты и гидроалюмосиликаты магния, а также их комплексы с хлоридом магния, имеют несколько больший объем, чем исходные вещества. Новообразования заполняют часть капиллярных и других открытых пор затвердевшего материала, что согласуется с уменьшением его водопоглощения.

Проведенные исследования показали, что водостойкость прессованных изделий на основе воздушных вяжущих веществ, оцениваемая по величине коэффициента размягчения, зависит от вида и количества вводимых добавок, во-

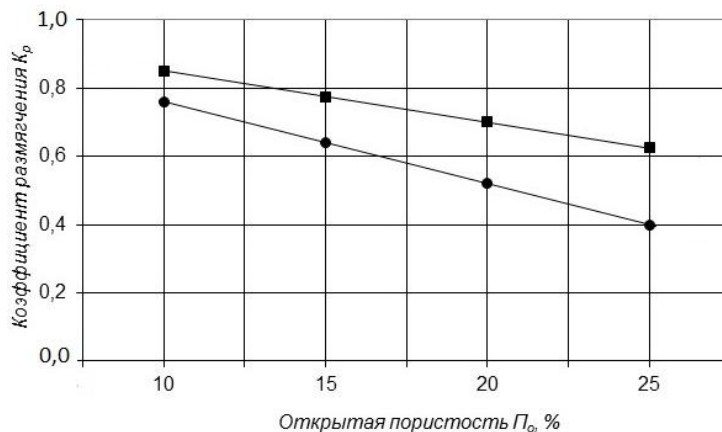
дотвердого отношения и величины прессующего давления, а для магнезиального цемента также и от концентрации бишофита [14, 15, 22, 23]. Однако при любых сочетаниях перечисленных рецептурных и технологических факторов, коэффициент размягчения исследуемых материалов тесно связан с величиной их открытой пористости. В результате статистической обработки результатов всех выполненных экспериментов и использования методов регрессионного анализа, нами получена линейная зависимость коэффи-

циента размягчения (K_p) затвердевших модифицированных композитов от величины водопоглощения по объему, %, характеризующего их открытую пористость (Π_o), %:

$$K_p = 1 - \alpha \Pi_o,$$

где $\alpha = 0,015$ – для магнезиального цемента; $\alpha = 0,024$ – для гипсового вяжущего.

Графически полученные зависимости представлены на рисунке.



Зависимость коэффициента размягчения прессованных композитов от величины их открытой пористости (водопоглощения по объему):

■ – на основе магнезиального цемента; ● – на основе гипсового вяжущего

Dependence of softening factor of pressed composites on value of their open porosity (water absorption by volume):

■ – based on soret cement; ● – based on low-temperature calcined gypsum binder

Как видно из данных рисунка, коэффициент размягчения прессованных материалов на основе воздушных вяжущих веществ увеличивается с уменьшением открытой пористости. Однако, при одной и той же ее величине коэффициент размягчения затвердевшего модифицированного магнезиального цемента выше коэффициента размягчения прессованного модифицированного гипсового вяжущего. Так, при величине открытой пористости, например, 15% коэффициент размягчения прессованного материала на основе магнезиального цемента составляет 0,78, а на основе гипсового вяжущего – только 0,64. Это можно объяснить тем, что, как уже отмечалось выше, растворимость дигидрата сульфата кальция в воде значительно выше растворимости гидроксида магния и, тем более, гидросиликатов, гидроалюминатов и гидроалюмосиликатов магния, которые являются основными продуктами твердения прессованного модифицированного магнезиального цемента.

Выводы

Проведенные исследования показали возможность получения высокопрочных и водостойких изделий на основе воздушных вяжущих веществ методом прессования. При использова-

нии низкообжиговых гипсовых вяжущих веществ это достигается за счет их модификации добавками тонкодисперсного карбоната кальция и однозамещенной соли ортофосфорной кислоты, оказывающих влияние на процесс организации структуры материала и способствующих образованию на поверхности элементов кристаллизационной структуры затвердевшего материала экраняющих защитных пленок из труднорастворимых фосфатов кальция.

Повышение прочности и водостойкости магнезиальных вяжущих, модифицированных микрокремнеземом и тонкомолотыми горелыми породами, объясняется появлением в структуре затвердевшего цементного камня труднорастворимых гидросиликатов, гидроалюминатов и гидроалюмосиликатов магния, а также образованием сложной комбинированной структуры, содержащей коагуляционную, конденсационную и кристаллизационную фазы. Полученные зависимости коэффициента размягчения прессованных материалов на основе гипсовых и магнезиальных вяжущих веществ от величины их открытой пористости можно использовать для прогнозирования водостойкости без проведения длительных испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Будников П.П. Гипс, его исследование и применение. М.: Стройиздат, 1951. 418 с.
2. Ребиндер П.А. Физико-химические основы водопроницаемости строительных материалов. М.: Госстройиздат, 1953. 184 с.
3. Вайвад А.Я. Магнезиальные вяжущие вещества. Рига: Зинатне, 1991. 331 с.
4. Коровяков В.Ф. Гипсовые вяжущие и их применение в строительстве // Российский химический журнал. 2003. Т. XLVII. № 4. С. 18–25.
5. Domanskaya I., Bednyagin S., Fisher H.B. Water-Resistant Gypsum Binding Agents and Concretes Based Thereof as Promising Materials for Building Green. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 177. № 1. P. 012–029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/177/1/012029>
6. Khalil A.A., Tawfik A., Hegazy A.A. Plaster Composites Modified Morphology with Enhanced Compressive Strength and Water Resistance Characteristics // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 167. P. 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.165>
7. Zhao. F.Q., Liu H.J., Hao L.X., Li Q. Water Resistant Block from Desulfurization Gypsum // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 27, Iss. 1. P. 531–533. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.011>
8. Katulskaya A.S., Parfenova L.M. Effective Modifiers of Gypsum Binders Substance // European and national dimension in research: electronic collected materials of X Junior Researcher's Conference. Novopolotsk, 10–11 May 2018) / ed. D. Lazouski. Novopolotsk: PSU, 2018. P. 12–14.
9. Устинова Ю.В., Наносова А.Е., Козлов В.В. Повышение водостойкости магнезиальных вяжущих // Вестник МГСУ. 2010. Т. 3. № 4. С. 123–127.
10. Головнев С.Г. Высокоэффективные строительные технологии и материалы на основе магнезиального вяжущего // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2009. № 3. С. 86–87.
11. Unluer C., Al-Tabbaa A. Characterization of Light and Heavy Hydrated Magnesium Carbonates Using Thermal Analysis // J Therm Anal Calorim. 2014. № 115. P. 595–607.
12. Волженский А.В., Рожкова К.Н. Структура и прочность дигидрата, образующегося при гидратации полуводного гипса // Строительные материалы. 1972. № 5. С. 26–28.
13. Пат. 2078745, Российская Федерация, МПК С 04 В 28/14/С 04 В 111:20. Сырьевая смесь для изготовления гипсовых изделий и способ ее приготовления. / А.В. Каклюгин, А.Н. Юндин; заявители и патентообладатели Каклюгин А.В., Юндин А.Н. № 94027027/03; заявл. 18.07.1994; опубл. 10.05.1997. Бюл. № 6. 6 с.
14. Юндин А.Н., Каклюгин А.В. Оптимизация некоторых факторов, определяющих водостойкость прессованного гипса // Прочность и долговечность строительных материалов: сб. науч. ст. Ростов н/Д: Ростовская государственная академия строительства, 1994. С. 87–92.
15. Юндин А.Н., Каклюгин А.В., Аюкджанов Р.Г. Увеличение прочности и водостойкости прессованного строительного гипса // Эффективные технологии и материалы для стеновых и ограждающих конструкций: материалы Международной научно-практической конференции (12–15 декабря 1994 г.). Ростов н/Д: Ростовская государственная академия строительства, 1994. С. 87–92.
16. Юндин А.Н., Каклюгин А.В. О повышении водостойкости прессованных изделий на основе строительного гипса // Прочность и долговечность строительных материалов: сб. науч. ст. Ростов н/Д: Ростовская государственная академия строительства, 1994. С. 28–35.
17. Ступень Н.С., Мальцев В.Т., Юндин А.Н. Фазовый и минеральный состав продуктов твердения модифицированного магнезиального цемента // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 1994. № 2. С. 142–146.
18. Мальцев В.Т., Ступень Н.С. Трансформация продуктов твердения композиционных магнезиальных вяжущих во времени // Прочность и долговечность строительных материалов: сборник научных статей. Ростов н/Д: Ростовская государственная академия строительства, 1994. С. 42–47.
19. Пат. 2035427, Российская Федерация, МПК С 04 В 9/00. Вяжущие / А.Н. Юндин, В.Т. Мальцев, Н.С. Ступень; заявители и патентообладатели А.Н. Юндин, В.Т. Мальцев, Ступень Н.С. № 92011154/33; заявл. 09.12.1992; опубл. 20.05.1995. Бюл. № 5. 6 с.
20. Пат. 2038335, Российская Федерация, МПК С 04 В 9/00. Вяжущие / В.Т. Мальцев, А.Н. Юндин, Н.С. Ступень; заявители и патентообладатели В.Т. Мальцев, А.Н. Юндин, Н.С. Ступень № 5058172/33; заявл. 07.08.1992; опубл. 27.06.1995. Бюл. № 6. 4 с.
21. Ферронская А.В. Долговечность гипсовых материалов, изделий и конструкций. М.: Стройиздат, 1984. 286 с.
22. Ступень Н.С. Строительные материалы на базе силикатов магния // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. 2005. Серыя 5. № 3 (24). С. 75–78.
23. Ступень Н.С. Силикаты магния – перспективное сырье для производства современных строительных материалов // Сб. материалов Международной. науч.-практ. конф. по химии и химическому образованию «Менделеевские чтения-2016» (26 февраля 2016 г). Брест: БрГУ им. А.С. Пушкина, 2016. С. 74–77.

REFERENCES

1. Budnikov PP. Gypsum, its research and application. Moscow: Stroyizdat; 1951. 418 p. (In Russ.)
2. Rebinder PA. Physico-chemical basis for the water permeability of building materials. Moscow: Gosstroyizdat; 1953. 184 p. (In Russ.)
3. Vaivad AYa. Magnesia binders. Riga: Zinatne; 1991. 331 p. (In Russ.)
4. Korovyakov VF. Gypsum binders and their use in construction. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal* = Russian Chemical Journal. 2003;XLVII(4);18–25. (In Russ.)
5. Domanskaya I, Bednyagin S, Fisher H.B. Water-Resistant Gypsum Binding Agents and Concretes Based Thereof as Promising Materials for Building Green. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018;177(1):012–029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/177/1/012029>
6. Khalil AA, Tawfik A, Hegazy AA. Plaster Composites Modified Morphology with Enhanced Compressive Strength and Water Resistance Characteristics. *Construction and Building Materials*. 2018;167:55–64. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.165>
7. Zhao FQ, Liu HJ, Hao LX, Li Q. Water Resistant Block from Desulfurization Gypsum. *Construction and Building Materials*. 2012;27(1):531–533. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.011>
8. Katulskaya AS, Parfenova LM. Effective Modifiers of Gypsum Binders Substance. *European and national dimension in research: electronic collected materials of X Junior Researcher's Conference*. Novopolotsk, 10–11 May 2018 / ed. D. Lazouski. Novopolotsk: PSU; 2018. p. 12–14.
9. Ustinova YuV, Nanosova AE, Kozlov VV. Increasing the water resistance of magnesia binders. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* = Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering. 2010;3(4):123–127. (In Russ.)
10. Golovnev SG. Highly effective building technologies and materials based on magnesia binder. *Akademicheskii vestnik Ural'skogo nauchno-issledovatel'skogo i proyektno-konstruktorskogo instituta Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk* = Academic Bulletin of the Ural Research and Design Institute of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences. 2009;3:86–87. (In Russ.)
11. Unluer C, Al-Tabbaa A. Characterization of Light and Heavy Hydrated Magnesium Carbonates Using Thermal Analysis. *J Therm Anal Calorim*. 2014;115:595–607.
12. Volzhensky AV, Rozhkova KN. The structure and strength of hemihydrate formed during hydration of semi-aquatic gypsum. *Stroitel'nyye materialy* = Building Materials. 1972;5:26–28. (In Russ.)
13. Kaklyugin AV, Yundin AN. Raw meal for manufacturing gypsum products and method of preparation thereof. Patent RF, no. 2078745, 1997. (In Russ.)
14. Yundin AN, Kaklyugin AV. Optimization of some factors determining the water resistance of pressed gypsum. *Prochnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov: sbornik nauchnykh statey* = Strength and durability of building materials: a collection of scientific articles. Rostov-on-Don: Rostov-on-Don State Academy of Civil Engineering; 1994: p. 87–92. (In Russ.)
15. Yundin AN, Kaklyugin AV. The increase in strength and water resistance of pressed building gypsum. *Effektivnyye tekhnologi i imaterialy dlya stenovykh i ograzhdayushchikh konstruksiy: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* = Effective technologies and materials for wall and walling: Materials of the international scientific-practical conference (12–15 December 1994). Rostov-on-Don: Rostov-on-Don State Academy of Civil Engineering; 1994. p. 87–92. (In Russ.)
16. Yundin AN, Kaklyugin AV. On increasing the water resistance of pressed products based on building gypsum]. *Prochnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov: sbornik nauchnykh statey* = Strength and durability of building materials: a collection of scientific articles. Rostov-on-Don: Rostov-on-Don State Academy of Civil Engineering; 1994. p. 28–35. (In Russ.)
17. Stupen NS, Maltsev VT, Yundin AN. Phase and mineral composition of hardening products of modified magnesia cement. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Yestestvennyye nauki* = News of universities. North Caucasus region. Natural Sciences. 1994;2:142–146. (In Russ.)
18. Maltsev VT, Stupen NS. Transformation of hardening products of composite magnesia binders over time. *Prochnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov: sbornik nauchnykh statey* = Strength and durability of building materials: a collection of scientific articles. Rostov-on-Don: Rostov-on-Don State Academy of Civil Engineering; 1994. p. 42–47. (In Russ.)
19. Yundin AN, Maltsev VT, Stupen NS. Binder. Patent RF, no. 2035427, 1995. (In Russ.)
20. Maltsev VT, Yundin AN, Stupen NS. Binder. Patent RF, no. 2038335, 1995. (In Russ.)
21. Ferronskaya A.V. Durability of gypsum materials, products and structures. Moscow: Stroyizdat, 1984. 286 p. (In Russ.)
22. Stupen NS. Building materials based on magnesium silicates. *Vestnik Brestskaya Universiteta* = Bulletin of the Brest University. 2005;3(24):75–78. (In Russ.)
23. Stupen NS. Magnesium silicates – a promising raw material for the production of modern building materials. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po khimii i khimicheskomu obrazovaniyu «Mendeleyevskiyechteniya 2016»* = Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on Chemistry and Chemical Education «Mendelev Reading 2016»; 2016. p. 74–77. (In Russ.)

Критерии авторства

Каклюгин А.В., Ступень Н.С., Касторных Л.И., Коваленко В.В. имеют равные авторские права. Каклюгин А.В. несет ответственность за плагиат.

Contribution

Kaklyugin A.V., Stupen N.S., Kastornykh L.I., Kovalenko V.V. have equal author's rights. Kaklyugin A.V. bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Сведения об авторах

Каклюгин Александр Викторович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры строительных материалов,
Донской государственной технической
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
✉e-mail: kaklugin@gmail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1808-0208>

Information about the authors

Alexander V. Kaklyugin,
Cand. Sci (Eng.), Associate Professor
of the Department of Building Materials,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St.,
Rostov-on-Don 344022, Russia,
✉e-mail: kaklugin@gmail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1808-0208>

Ступень Нонна Степановна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры химии,
Брестский государственный университет
им. А.С. Пушкина,
224016, г. Брест, бульвар Космонавтов, 21,
Республика Беларусь,
e-mail: chemskorp@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9468-3062>

Nonna S. Stupen,
Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the
Department of Chemistry,
Brest State A.S. Pyshkin University,
21 Kosmonavtov Boulevard,
Brest 224016, the Republic of Belarus
e-mail: chemskorp@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9468-3062>

Касторных Любовь Ивановна
кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии вяжущих веществ,
бетонов и строительной керамики,
Донской государственной технической
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
e-mail: likas9@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8968-2543>

Luybov I. Kastornykh,
Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the
Department of Technology of Binders,
Concrete and Building Ceramics,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St.,
Rostov-on-Don 344022, Russia,
e-mail: likas9@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8968-2543>

Коваленко Виктор Викторович
старший преподаватель кафедры химии,
Брестский государственный университет
им. А.С. Пушкина,
224016, г. Брест, бульвар Космонавтов, 21,
Республика Беларусь,
e-mail: kvv0407@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9860-5774>

Viktor V. Kovalenko,
Senior lecturer of the Department of Chemistry,
Brest State A.S. Pyshkin University,
21 Kosmonavtov Boulevard, Brest 224016,
the Republic of Belarus,
e-mail: kvv0407@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9860-5774>