

Н.В. ЛЮБОМИРСКИЙ¹, А.С. БАХТИН¹, Т.А. БАХТИНА¹, В.В. НИКОЛАЕНКО¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», г. Симферополь, Россия

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТКОВОЙ ПЫЛИ И МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ИЗВЕСТНЯКА

Аннотация. В работе представлены исследования по разработке строительных материалов с низкой эмиссией CO₂ на основе техногенного вторичного сырья. Определены оптимальные рецептурно-технологические параметры получения материалов на основе известковой пыли образующейся механическим осаждением в циклонах и рукавных фильтрах шахтных печей, а также мелкодисперсного мраморовидного известняка фракцией до 5 мм. Проведенные исследования показали, что из данного вторичного сырья методом принудительной карбонизации в течение трех часов возможно получить строительный материал с прочностью при сжатии более 40 МПа. При этом для получения таких прочностных показателей оптимальное содержание известковой пыли в сырьевых составах находится в пределах 35-40 % мас. при водосодержании смеси 6-7 % мас. Карбонизированный материал, полученный при указанных технологических параметрах будет обладать средней плотностью 1,95-2,0 г/см³ и водопоглощением по массе не более 12 %. Соответственно, полученные данные позволяют судить о возможности получения качественной строительной продукции с достаточными для строительных материалов физико-механическими, физико-химическими, гидрофизическими и др. свойствами.

Ключевые слова: строительные материалы, принудительная карбонизация, свойства, вторичное сырье.

N.V. LYUBOMIRSKIY¹, A.S. BAKHTIN¹, T.A. BAKHTINA¹, V.V. NIKOLAENKO¹

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

BUILDING MATERIALS BASED ON LIMESTONE DUST AND FINELY DISPERSED LIMESTONE

Abstract. The paper presents research on the development of building materials with low CO₂ emissions based on industrial man-made materials. The optimal recipe-technological parameters for the production of materials based on lime dust generated by mechanical deposition in cyclones and bag filters of shaft furnaces, as well as finely divided marble-like limestone with a fraction of up to 5 mm were determined. Studies have shown that it is possible to obtain a building material with compressive strength of more than 40 MPa from this recycled material by forced carbonization for three hours. Moreover, to obtain such strength indicators, the optimal content of lime dust in the raw materials is in the range of 35-40% wt. when the water content of the mixture is 6-7% wt. The carbonized material obtained at the indicated technological parameters will have an average density of 1.95-2.0 g / cm³ and water absorption by weight of not more than 12%. Accordingly, the data obtained make it possible to judge the possibility of obtaining high-quality construction products with physico-mechanical, physico-chemical, hydrophysical, and other properties sufficient for building materials.

Keywords: building materials, forced carbonization, properties, recycled materials.

Введение

Начиная с середины прошлого столетия наблюдается значительный экономический рост развитых стран Мира, связанный с развитием промышленного производства, а соответственно и с высоким потреблением природных ресурсов. Результатом роста промышленного производства стали определенные экологические проблемы, в том числе

проблемы с изменением климата, вызванные значительными выбросами парниковых газов в атмосферу, в особенности CO_2 . Значимость этих проблем и соответственно необходимость реагирования на них, направляет мировую экономику к поиску нового вектора развития. Появляется понятие «низкоуглеродной экономики», в которой углеродный след будет основным критерием оценки любой человеческой деятельности, в особенности техногенной. В частности, в программах ЕС, включая «Дорожную карту по продвижению к низкоуглеродной экономике до 2050 года» [1], приоритеты снижения эмиссии CO_2 были включены во всех отраслях промышленного производства. Ведущим целевым показателем являются пути сокращения промышленных выбросов CO_2 как основного техногенного газа, вызывающего существенное изменение климата на планете. Такие нововведения закрепились на законодательном уровне в странах ЕС, США, Канады, Австралии, Китая и, в первую очередь, должны стимулировать организацию и проведение научно-исследовательских работ по поиску путей сокращения выбросов углекислого газа без нанесения вреда экономике государств. Для достижения обозначенных приоритетов Международным энергетическим агентством был определен перечень промышленных производств, в которых целесообразно организовывать научно-исследовательские работы по сокращению эмиссии CO_2 . Согласно этому перечню, одной из перспективных отраслей промышленности является индустрия производства различных строительных материалов. Наиболее масштабным по эмиссии CO_2 процессом в этой индустрии является производство портландцемента и различных известковых вяжущих, на которые суммарно приходится до 10 % техногенных выбросов CO_2 во всем мире (2,9-3,1 Гт в год) [2, 3]. Соответственно, использование этого техногенного CO_2 в технологическом цикле в качестве сырьевого компонента без сокращения основного производства, является наиболее целесообразным и действенным путем сокращения эмиссии диоксида углерода в атмосферу. Точечные фундаментальные и прикладные научные исследования в этом направлении начались в начале XXI века [4-7] и сводились к поиску путей сокращения эмиссии CO_2 в производстве цемента или разработке альтернативных портландцементу вяжущих веществ. В основном изучалась кинетика реакции карбонизации клинкерообразующих минералов, MgO содержащих систем и изменение структуры и свойств полученного карбонизированного материала. Интенсификация исследований в этом направлении наблюдается после проведения конференции по климату в Париже и подписанию соответствующего соглашения большей частью стран Мира. Ратификацию итогового документа конференции в короткие сроки осуществили 186 стран, что свидетельствует о понимании мировым сообществом всей серьезности последствий в случае дальнейшего игнорирования обозначенных проблем. Активизация научных исследований показала, что индустрия производства строительных материалов является весьма перспективным сектором экономики в решении вопроса сокращения эмиссии диоксида углерода в атмосферу [8-22]. Проводимые исследования привели к формированию понятий «экологического строительства» и «безопасной и комфортной среды жизнедеятельности» как одних из самых актуальных мировых трендов в строительной отрасли, составляющие понятие «устойчивое развитие». Согласно этим научным тенденциям наиболее существенным отличительным признаком, повышающим экологические аспекты строительства, является применение строительных материалов и изделий с низкой эмиссией CO_2 , изготавливаемых по технологиям, принципиальной особенностью которых является поглощение и связывание в нерастворимые соединения (секвестрация) техногенного углекислого газа. В результате этих исследований выявлены виды сырья [9, 10, 15-21], в том числе вторичного [11-14, 22], обладающие существенным потенциалом к связыванию CO_2 , разработаны научно-технологические основы для внедрения полученных результатов в промышленность [13-15, 22], а также выпущены опытно-промышленные партии строительных изделий, твердевших в среде повышенной концентрации CO_2 [13, 15]. Резюмируя результаты проводимых исследований, можно отметить, что направления сокращения выбросов CO_2 в индустрии строительных материалов определены, обоснована их высокая эффективность, в части количественного связывания CO_2

и получения определенной номенклатуры качественной строительной продукции, твердеющей за счет принудительной карбонизации. Однако, для внедрения подобных технологий, например, на существующих предприятиях производящих основной продукт, необходимо проведение индивидуальных научных исследований, направленных на изучение возможности использования вторичного сырья для организации производства на его основе материалов и изделий методом принудительной карбонизации.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является изучение возможности использования техногенного вторичного сырья, в частности известковой пыли и мелкодисперсных известняков, для получения строительных материалов с высокими физико-механическими характеристиками методом принудительной карбонизации.

Модели и методы

В качестве материалов для научных исследований использовали известковую пыль, механически осаждаемую в циклонах и рукавных фильтрах шахтных печей, обжигающих известняк для получения негашеной извести. Также использовали мелкодисперсный мраморовидный известняк фракцией до 5 мм, образующийся в процессе дробления исходной горной породы на рабочую фракцию, направляемую в шахтную печь на обжиг. Данные материалы образуются на предприятиях, производящих негашеную известь и в основном направляются в отвалы, поскольку спрос на данное вторичное сырье практически отсутствует. Отсутствие спроса объясняется низким качеством данных продуктов, в частности известковая пыль содержит в своем составе пережженные частицы CaO , а количество активных оксидов кальция и магния, как правило, не превышает 25-35 %. Таким образом, наличие вредных пережженных частиц в комплексе с низким содержанием активных CaO и MgO обуславливает отсутствие спроса. Мелкодисперсный мраморовидный известняк также не находит широкого применения в строительной индустрии ввиду большого содержания в нем пылевидных и глинистых частиц. В настоящих исследованиях из данных материалов готовили различные сырьевые составы и методом полусухого прессования изготавливали образцы-цилиндры диаметром и высотой 30 мм, твердение которых осуществлялось в разработанной карбонизационной камере в условиях 35 % концентрации CO_2 в течение 3 часов.

Минералогический состав определяли с помощью высокотемпературного синхронного анализатора STA 8000 фирмы Perkin Elmer (США) в интервале температур 30-1000 °С при скорости нагрева 10 °С/мин, в среде азота. Размер частиц исследуемого сырья определяли на лазерном анализаторе HORIBA LA-960 (Япония). Качественное протекание реакции карбонизации определяли нанесением 1 %-го раствора фенолфталеина на скол образца. Оптимизацию составов сырьевой смеси для получения опытных образцов полусухого прессования на основе исследуемых материалов проводили с помощью статистических методов математического планирования эксперимента. Обработку полученных экспериментальных данных проводили с помощью программного комплекса StatSoft STATISTICA. В результате обработки опытных данных формируются ЭС модели каждого исследованного параметра, представляющие собой уравнения второго порядка следующего вида:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i z_i + \sum_{i;l=1}^n b_{il} z_i z_l + \sum b_{ii} z_i^2 \dots$$

где b_0 , b_i , b_{il} , b_{ii} – коэффициенты корреляции, определяемые в результате математически-статистической обработки экспериментальных данных; z_i , z_l – значение варьируемых рецептурно-технологических факторов. Определение механических характеристик опытных образцов осуществляли на автоматической системе испытаний, на базе консоли управления MCC8 (Controls). Перед испытанием опытные образцы высушивались до нулевой влажности в сушильном шкафу при температуре 80 °С.

Результаты и обсуждение

Известковая пыль, представляет собой мелкодисперсный порошок светло-серого цвета. Анализ размера частиц на лазерном анализаторе (рисунок 1) показал, что данное вторичное сырье состоит из частиц размером от 4 до 80 мкм. Большую часть гранулометрического состава составляют частицы размером от 15 до 30 мкм. Средний геометрический размер частиц составляет 15,5 мкм.

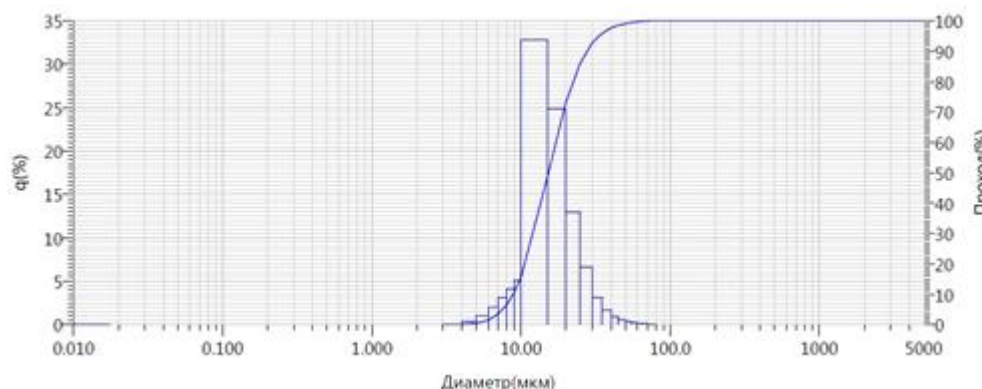


Рисунок 1 – Распределение размеров частиц и дифференциальная кривая гранулометрического состава известковой пыли

Анализ минералогического состава известковой пыли был проведен с помощью термического анализа (см. рисунок 2).

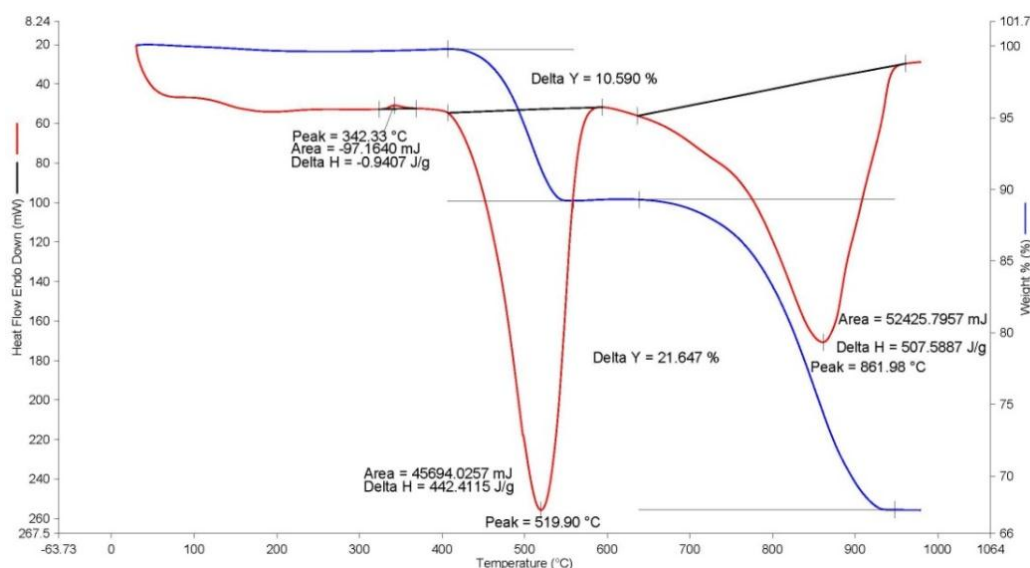


Рисунок 2 – Термограмма известковой пыли

Расчеты количественного содержания соответствующих минеральных фаз, проводили по стехиометрическим уравнениям. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Минералогический состав известковой пыли.

Потери в интервале температур 450-600 °C, %	Содержание Ca(OH) ₂ / CaO, %	Потери в интервале температур 600-1000 °C, %	Содержание CaCO ₃ / CaO, %	Примеси, %
10,59	43,5 / 32,9	21,65	49,2 / 27,6	до 7,0

Известковая пыль по своему минералогическому составу практически на 43-44 % мас. состоит из Ca(OH)₂. Количество частиц кальцита составляет порядка 49-50 % мас. Примеси не превышают 7 % мас. Также в данном сырье содержится 2-3 % мас. трудногасимых пережженных зерен CaO. Ввиду мелкодисперсности зерен известковой пыли деструктивное

действие пережжённых частиц на свойства изделий, изготавливаемых на ее основе, будет минимальным. Термограмма мелкодисперсного мраморовидного известняка фракцией до 5 мм имеет один эндотермический эффект в диапазоне температур 600-1000 °С, соответствующий разложению карбоната кальция. Суммарная потеря массы в этом диапазоне составила 41,9 % мас. Соответственно, содержание кальцита составляет 95,2 % мас.

Для определения оптимальных рецептурно-технологических факторов получения опытных образцов полусухого прессования на основе исследуемых материалов, и их последующей принудительной карбонизации был составлен рототабельный центральный композиционный план. В качестве варьируемых факторов были приняты: содержание известковой пыли (Z_1), водосодержание сырьевой смеси (Z_2), давление прессования опытных образцов-цилиндров (Z_3). Уровни варьирования исследуемых факторов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Минералогический состав известковой пыли.

Фактор	Единицы измерения	Уровни варьирования				
		-1,682	-1	0	+1	+1,682
Z_1	% мас.	13,18	20,0	30,0	40,0	46,82
Z_2	% мас.	4,64	6,0	8,0	10,0	11,36
Z_3	МПа	16,6	20,0	25,0	30,0	33,4

Принудительная карбонизация образцов проводилась в нормальных условиях (~ 20-30 °С, атмосферное давление). Концентрация CO_2 в камере карбонизации ~ 33-35 %. Время карбонизации являлось постоянным и составило 3 часа. Основными анализируемыми параметрами карбонизированных опытных образцов являлись: прочность при сжатии ($R_{сж}$), средняя плотность (ρ), водопоглощение по массе (W_m), водостойкость (K_p). Анализ экспериментальных данных (см. таблицу 3) показал, что свойства карбонизированных образцов-цилиндров изменяются в широком диапазоне в зависимости от варьируемых технологических факторов. Анализ влияния количества известковой пыли в составах сырьевых смесей (см. таблицу 3) показывает, что с увеличением содержания этого компонента с 20 до 40 % мас. повышаются прочностные показатели опытных образцов в среднем в 1,4-1,7 раза. При этом за счет увеличения в составе материала мелкодисперсных частиц снижается средняя плотность материала и, соответственно, увеличивается водопоглощение. Необходимо отметить, что увеличение содержания известковой пыли, несмотря на увеличение показателя водопоглощения, повышает водостойкость образцов.

Таблица 3 – Матрица планирования и экспериментальные данные карбонизированных опытных образцов-цилиндров.

№ п/п	Кодированные значения факторов			Натуральные величины факторов			Анализируемые параметры			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_1 , %	Z_2 , %	Z_3 , МПа	$R_{сж}$, МПа	ρ , г/см ³	K_p	W_m , %
1	-1	-1	-1	20,0	6,0	20,0	21,8	1,99	0,84	11,4
2	+1	-1	-1	40,0	6,0	20,0	30,9	1,82	0,74	15,5
3	-1	+1	-1	20,0	10,0	20,0	20,8	1,98	0,62	11,3
4	+1	+1	-1	40,0	10,0	20,0	32,9	1,98	0,77	13,9
5	-1	-1	+1	20,0	6,0	30,0	31,0	2,06	0,66	10,3
6	+1	-1	+1	40,0	6,0	30,0	43,8	1,90	0,69	13,3
7	-1	+1	+1	20,0	10,0	30,0	18,4	2,02	0,73	10,5
8	+1	+1	+1	40,0	10,0	30,0	28,5	1,91	0,73	13,1
9	-1,682	0	0	13,18	8,0	25,0	14,9	2,09	0,60	9,1

10	+1,682	0	0	46,82	8,0	25,0	41,0	1,80	0,68	15,6
11	0	-1,682	0	30,0	4,64	25,0	30,1	1,92	0,71	13,1
12	0	+1,682	0	30,0	11,36	25,0	12,9	1,92	0,71	12,8
13	0	0	-1,682	30,0	8,0	16,59	30,4	1,88	0,68	14,6
14	0	0	+1,682	30,0	8,0	33,41	39,6	1,98	0,69	11,7
15	0	0	0	30,0	8,0	25,0	36,2	1,94	0,58	12,8
16	0	0	0	30,0	8,0	25,0	36,0	1,94	0,60	12,9
17	0	0	0	30,0	8,0	25,0	36,3	1,95	0,59	12,8
18	0	0	0	30,0	8,0	25,0	35,8	1,93	0,60	12,7

Увеличение начального водосодержания сырьевых смесей с 6 до 10 % мас. при одинаковых прочих исследуемых факторов снижает прочность карбонизированных образцов. Поскольку известняк обладает более плотной структурой и соответственно меньшим водопоглощением в сравнении с известковой пылью, то большая часть воды остается в межзерновом пространстве, повышает водо-известковое отношение и, этим самым, замедляет процесс карбонизации известковой пыли. О степени карбонизации известковой составляющей в опытных образцах косвенно можно судить по изменению величины карбонизированного слоя (рисунок 3). Из представленных данных на рисунке 3 видно, что образование карбонатного камня при карбонатном твердении известкового вяжущего начинается с поверхности образцов, постепенно продвигаясь вглубь с диффузионным ограничением углекислого газа. Степень карбонизации известки зависит от всех исследуемых рецептурно-технологических факторов. С увеличением давления прессования и содержания известковой пыли толщина карбонизированного слоя в опытных образцах уменьшается. При повышении давления прессования уплотняется структура материала, что затрудняет движение газа по порам материала.

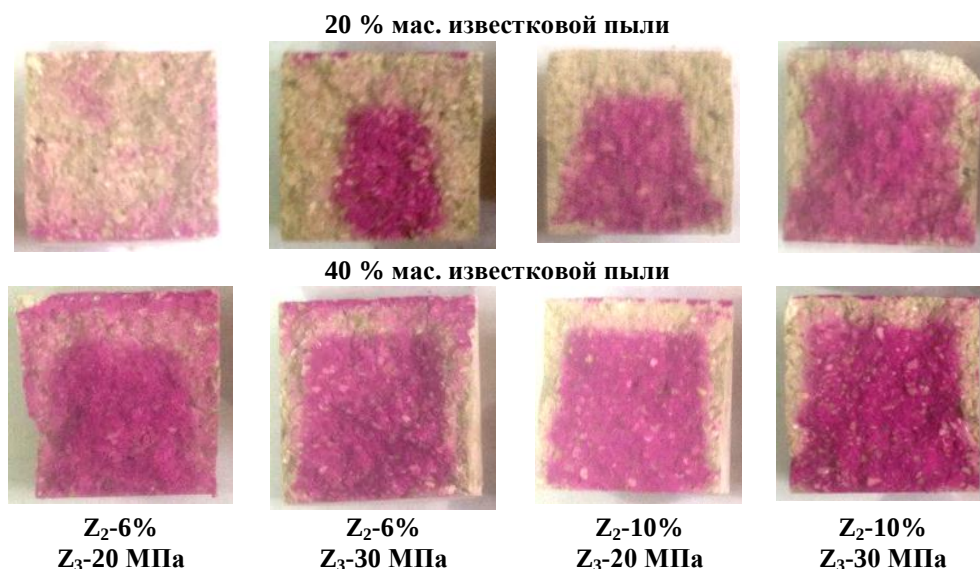


Рисунок 3 – Изменение толщины карбонизированного слоя опытных образцов полученных при водосодержании формовочной смеси (Z₂) 6 и 10 % мас. и давления прессования (Z₃) 20 и 30 МПа.

Введение большего количества известковой пыли – мелкодисперсного компонента приводит к образованию более мелких пор и также затрудняет диффундирование газовой среды по порам в объеме материала. Возможно, для полной карбонизации известковой составляющей в опытных образцах с содержанием ее 40 % мас. недостаточно принятых в

опыте 3 часа принудительной карбонизации. Анализ ЭС модели основных свойств опытных образцов показал, что наиболее влиятельными факторами на формирование свойств карбонизированных образцов в порядке убывания их значимости являются: содержание известковой пыли (Z_1), начальное водосодержание смеси (Z_2) и давление прессования (Z_3).

Уравнения, полученные путем статистической обработки данных (таблица 3) имеют вид:

$$R_{сж} = 36,52 + 15,8 \cdot Z_1 - 11,08 \cdot Z_2 + 4,51 \cdot Z_3 - 6,74 \cdot Z_1^2 - \\ - 11,27 \cdot Z_2^2 - 1,73 \cdot Z_3^2 + 5,1 \cdot Z_1 \cdot Z_2 + 0,42 \cdot Z_1 \cdot Z_3 - 7,21 \cdot Z_2 \cdot Z_3$$

$$\rho = 1,94 - 0,14 \cdot Z_1 + 0,02 \cdot Z_2 + 0,04 \cdot Z_3 + 0,01 \cdot Z_1^2 + 0,01 \cdot Z_2^2 + \\ + 0,002 \cdot Z_3^2 + 0,05 \cdot Z_1 \cdot Z_2 - 0,02 \cdot Z_1 \cdot Z_3 - 0,05 \cdot Z_2 \cdot Z_3$$

$$K_p = 0,58 + 0,02 \cdot Z_1 + 0,05 \cdot Z_1^2 + 0,13 \cdot Z_2^2 + 0,08 \cdot Z_3^2 + \\ + 0,04 \cdot Z_1 \cdot Z_2 + 0,01 \cdot Z_1 \cdot Z_3 + 0,09 \cdot Z_2 \cdot Z_3$$

$$W_m = 12,94 + 3,39 \cdot Z_1 - 0,34 \cdot Z_2 - 1,45 \cdot Z_3 - 0,57 \cdot Z_1^2 - \\ - 0,14 \cdot Z_2^2 + 0,01 \cdot Z_3^2 - 0,46 \cdot Z_1 \cdot Z_2 - 0,26 \cdot Z_1 \cdot Z_3 + 0,39 \cdot Z_2 \cdot Z_3$$

Величина коэффициента b_0 подтверждает проведенный анализ экспериментальных данных. Увеличение содержания известковой пыли в составах формовочных смесей (коэффициент b_1) способствует повышению прочностных показателей и уменьшению средней плотности материала, однако значительно повышает водопоглощение по массе и уменьшает толщину карбонизированного слоя образцов, снижая их водостойкость. В значительной степени формирование карбонатной структуры материала опытных образцов, о которой косвенно можно судить по показателю толщины карбонизированного слоя, зависит от фактора начального водосодержания формовочных смесей, Z_2 (коэффициент b_2). С увеличением водосодержания в системе у образцов уменьшается карбонизированный слой и снижается прочность на сжатие, причем снижение прочности значительно ($b_2 = -11,08$). Увеличение давления прессования, фактор Z_3 (коэффициент b_3), увеличивает среднюю плотность образцов, повышает их $R_{сж}$ и снижает W_m . При этом с увеличением плотности структуры снижается толщина карбонизированного слоя и водостойкость опытных образцов.

Выводы

Анализ уравнений 2-5 позволил установить, что оптимальная область формовочного давления прессования, позволяющая получить максимальные показатели прочности при сжатии (более 40 МПа), находится в пределах от 25 до 30 МПа. При этом для получения таких прочностных показателей оптимальное содержание известковой пыли в сырьевых составах находится в пределах 35-40 % мас. при водосодержании смеси 6-7 % мас. Карбонизированный материал, полученный при указанных технологических параметрах будет обладать средней плотностью 1,95-2,0 г/см³ и водопоглощением по массе не более 12 %. Водостойкость материала по коэффициенту размягчения составит 0,65-0,75. При этом установлено, что K_p зависит от толщины карбонизированного слоя, значение которого с увеличением толщины слоя возрастает. Поскольку, толщина карбонизированного слоя, главным образом, зависит от времени принудительной карбонизации опытных образцов, то, соответственно, увеличение времени выдерживания образцов в среде с повышенной концентрацией CO_2 (в исследовании принято 3 часа) или повышения концентрации CO_2 , будет способствовать повышению водостойкости карбонизированного материала на основе исследуемого вторичного сырья.

Таким образом, полученные данные позволяют судить о возможности получения качественной строительной продукции с достаточными для строительных материалов физико-механическими, физико-химическими, гидрофизическими и др. свойствами способом полусухого прессования в короткие временные сроки на основе известковой пыли и мелкодисперсных отходов добычи и переработки известняков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Information on https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en.
2. Scrivener K., John V., Gartner E. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. Pp. 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
3. Humbert P., Castro-Gomes J. CO₂ activated steel slag-based materials: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 208. Pp. 448-457. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.058>
4. Gartner, E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*. 2004. Vol. 34. No 9. Pp. 1489-1498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>
5. De Silva P., Bucea L., Moorehead D., Sirivivatnanon V. Carbonate binders: Reaction kinetics, strength and microstructure. *Cement & Concrete Composites*. 2006. Vol. 28. No 7. Pp. 613-620. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.03.004>
6. Plekhanova T., Kerieneb J., Gailiusb A., Yakovlev G. Structural, physical and mechanical properties of modified wood–magnesia composite. *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21. No 7. Pp. 1833-1838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.029>
7. Liska M., Al-Tabbaa A. Performance of magnesia cement in pressed masonry units with natural aggregates: production parameters optimization. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. No 8. Pp. 1789-1797. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.007>
8. Kannan D. Role of multiple stakeholders and the critical success factor theory for the sustainable supplier selection process. *International Journal of Production Economics*. 2018. Vol. 195. Pp. 391–418. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.02.020>
9. Maddalena R., Roberts J. J., Hamilton A. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 186. Pp. 933-942. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>
10. Kajaste R., Hurme M. Cement industry greenhouse gas emissions - management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112. No 5. Pp. 4041-4052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
11. Humbert P. S., Castro-Gomes J. P., Savastano H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 210. Pp. 413-421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>
12. Ghoulh Z., Guthrie R., Shao Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 99. Pp. 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>
13. Huang H., Wang T., Kolosz B., Andresen J. and etc. Life-cycle assessment of emerging CO₂ mineral carbonation-cured concrete blocks: Comparative analysis of CO₂ reduction potential and optimization of environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 241. Article 118359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118359>
14. Ghoulh Z., Guthrie R., Shao Y. Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete. *Journal of CO₂ Utilization*. 2017. Vol. 18. Pp. 125-138.
15. Bakhtina T., Lyubomirskiy N., Bakhtin A. Dolomite binding materials with low CO₂ emission. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 19. No 5. Pp. 1998-2004. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.060>
16. Bakhtina T., Lyubomirskiy N., Bakhtin A. Sequestration of carbon dioxide into building products based on the dolomite binder of carbonate hardening. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. Article 02024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702024>
17. Lyubomirskiy N., Bakhtina T., Bakhtin A., Fedorkin S. The carbonate hardening lime construction material properties formation during their long-term storage and use under normal conditions. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 974. Pp. 187-194. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.187>
18. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Bakhtina T. Alternative approach to the organization of hardening of dolomite binding materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (MSE)*. 2018. Vol. 365. Article 032032. [doi: 10.1088/1757-899x/365/3/032032](https://doi.org/10.1088/1757-899x/365/3/032032)
19. Unluer C., Al-Tabbaa A. Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements. *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 54. Pp. 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.009>
20. Yi Y., Liska M., Al-Tabbaa A. Properties and microstructure of GGBSe magnesia pastes. *Advances in Cement Research*. 2014. Vol. 26. No 2. Pp. 114-122. <https://doi.org/10.1680/adcr.13.00005>

21. UnluerC., Al-Tabbaa A. The role of brucite, ground granulated blastfurnace slag, and magnesium silicates in the carbonation and performance of MgO cements. *Construction and Building Materials*.2015. Vol. 94. Pp. 629-643.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.105>
22. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Bakhtina T. Physicochemical principles of CO₂sequestration in building materials based on nepheline slime // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (MSE)*. 2018. Vol. 463.Article 032065.[doi: 10.1088/1757-899X/463/3/032065](https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032065)

REFERENCES

1. Information on https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en.
2. ScrivenerK., JohnV., GartnerE. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. Pp. 2-26.<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
3. HumbertP., Castro-GomesJ. CO₂ activated steel slag-based materials: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 208. Pp 448-457.<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.058>
4. Gartner, E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*. 2004. Vol. 34.No 9. Pp. 1489-1498.<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>
5. De Silva P., Bucea L., Moorehead D., Sirivivatnanon V. Carbonate binders: Reaction kinetics, strength and microstructure. *Cement & Concrete Composites*. 2006. Vol. 28.No7. Pp. 613-620.<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.03.004>
6. PlekhanovaT., KerienebJ., GailiusbA., YakovlevG. Structural, physical and mechanical properties of modified wood–magnesia composite.*Construction and Building Materials*.2007. Vol. 21.No7. Pp. 1833-1838.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.029>
7. Liska M., Al-Tabbaa A. Performance of magnesia cement in pressed masonry units with natural aggregates: production parameters optimization. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22.No8. Pp. 1789-1797.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.007>
8. KannanD. Role of multiple stakeholders and the critical success factor theory for the sustainable supplier selection process.*International Journal of Production Economics*.2018. Vol. 195. Pp. 391–418.<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.02.020>
9. MaddalenaR., RobertsJ.J., HamiltonA. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements.*Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 186. Pp 933-942.<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>
10. KajasteR., HurmeM. Cement industry greenhouse gas emissions - management options and abatement cost.*Journal of Cleaner Production*.2016. Vol. 112. No 5. Pp. 4041-4052.<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
11. HumbertP. S., Castro-GomesJ. P., SavastanoH. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 210, Pp. 413-421.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>
12. Ghouleh Z., GuthrieR.,Shao Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 99. Pp. 175-183.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>
13. HuangH., WangT., KoloszB., AndresenJ. and etc. Life-cycle assessment of emerging CO₂ mineral carbonation-cured concrete blocks: Comparative analysis of CO₂ reduction potential and optimization of environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 241. Article 118359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118359>
14. Ghouleh Z., Guthrie R., Shao Y. Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete. *Journal of CO₂ Utilization*.2017. Vol. 18. Pp. 125-138.
15. Bakhtina T., Lyubomirskiy N., Bakhtin A. Dolomite binding materials with low CO₂ emission.*Materials Today: Proceedings*.2019. Vol. 19.No 5. Pp. 1998-2004.<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.060>
16. Bakhtina T., Lyubomirskiy N., Bakhtin A. Sequestration of carbon dioxide into building products based on the dolomite binder of carbonate hardening. *E3S Web of Conferences*.2019. Vol. 97. Article 02024.<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702024>
17. Lyubomirskiy N., Bakhtina T., Bakhtin A., Fedorkin S. The carbonate hardening lime construction material properties formation during their long-term storage and use under normal conditions. *Materials Science Forum*.2019. Vol. 974.Pp. 187-194.<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.187>
18. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Bakhtina T. Alternative approach to the organization of hardening of dolomite binding materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (MSE)*. 2018.Vol. 365. Article 032032.[doi: 10.1088/1757-899x/365/3/032032](https://doi.org/10.1088/1757-899x/365/3/032032)
19. UnluerC., Al-TabbaaA. Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements.*Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 54. Pp. 87-97.<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.009>
20. Yi Y., Liska M., Al-Tabbaa A.Properties and microstructure of GGBSe magnesia pastes. *Advances in Cement Research*. 2014. Vol. 26. No 2. Pp. 114-122.<https://doi.org/10.1680/adcr.13.00005>

21. Unluer C., Al-Tabbaa A. The role of brucite, ground granulated blastfurnace slag, and magnesium silicates in the carbonation and performance of MgO cements. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 94. Pp. 629-643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.105>

22. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Bakhtina T. Physicochemical principles of CO₂ sequestration in building materials based on nepheline slime // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (MSE)*. 2018. Vol. 463. Article 032065. doi: 10.1088/1757-899X/463/3/032065

Информация об авторах:

Любомирский Николай Владимирович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», г. Симферополь, Россия, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе.
E-mail: niklub.ua@gmail.com

Бахтин Александр Сергеевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Россия, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения.
E-mail: aleserba@mail.ru

Бахтина Тамара Алексеевна

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», г. Симферополь, Россия, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения.
E-mail: t.bakhtina83@gmail.com

Николаенко Виталий Витальевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», г. Симферополь, Россия, старший преподаватель кафедры строительного инжиниринга и материаловедения.
E-mail: y1told@mail.ru

Information about authors:

Lyubomirskiy Nikolai V.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia, doctor of Technical Sciences, Professor, deputy director for research.
E-mail: niklub.ua@gmail.com

Bakhtin Aleksandr S.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia, candidate of technical sciences, docent, associate professor, of the dep. of construction engineering and materials science.
E-mail: aleserba@mail.ru

Bakhtina Tamara A.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia, candidate of technical sciences, docent, associate professor, of the dep. of construction engineering and materials science.
E-mail: t.bakhtina83@gmail.com

Nikolaenko Vitaliy V.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia, senior lecturer of the dep. of construction engineering and materials science.
E-mail: y1told@mail.ru