

ВЛИЯНИЕ ВИДА И РАСХОДА ХИМИЧЕСКИХ МОДИФИКАТОРОВ НА СВОЙСТВА ГАЗОБЕТОННОЙ СМЕСИ И ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ГАЗОБЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

Вита Борисовна Мартынова¹, Анастасия Анатольевна Яцюк²

^{1,2} Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия,

¹v.b.martynova@donnasa.ru, ²a.a.kutsenkova@donnasa.ru

Аннотация. В работе представлен анализ рационального использования карбонатного сырья в строительной отрасли народного хозяйства. Приведены результаты исследования влияния вида и расхода химического модификатора на свойства газобетонной смеси и физико-механические свойства образцов газобетона. В качестве кремнеземистого компонента газобетонной смеси использовался карбонатный отход промышленности Донбасса – известняк (отсев дробления). Установлено, положительное влияние химического модификатора BASF MasterCast 2454 на температуру газобетонной смеси на стадии интенсивного вспучивания $t_{\max} = 43,5–43,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в течение 17 минут с момента затворения водой) при расходе модификатора 0,7 % от массы цемента. При этом снижается водо-твердое отношение смеси на 43 %, что положительно сказывается на увеличении предела прочности при сжатии на 49 % ($R = 2,17\text{ МПа}$) после тепло-влажностной обработки газобетонных образцов по сравнению с контрольными образцами. Результаты исследований представлены в рамках выполнения государственного задания Рег. № НИОКТР 123121900004-9 «Разработка составов и технологии конструкционных и конструкционно-теплоизоляционных эффективных строительных материалов и изделий, в том числе с использованием техногенного сырья (в рамках реализации программы развития отрасли строительных материалов Донецкой Народной Республики)».

Ключевые слова: газобетон, карбонатный отход, физико-механические свойства, образец бетона, стройиндустрия

Для цитирования: Мартынова В. Б., Яцюк А. А. Влияние вида и расхода химических модификаторов на свойства газобетонной смеси и физико-механические свойства образцов газобетона неавтоклавного твердения // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2025. Выпуск 2025-1(171) Современные строительные материалы. С. 59–70. doi: 10.71536/vd.2025.1c171.8. edn: pdnbof.

Original article

INFLUENCE OF THE TYPE AND CONSUMPTION OF CHEMICAL MODIFIERS ON THE PROPERTIES OF AERATED CONCRETE MIXTURE AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE SAMPLES

Vita B. Martynova¹, Anastasia A. Yatsyuk²

^{1,2} Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,

¹v.b.martynova@donnasa.ru, ²a.a.kutsenkova@donnasa.ru

Abstract. The paper presents an analysis of the rational use of carbonate raw materials in the construction industry of the national economy. The results of a study of the influence of the type and consumption of a chemical modifier on the properties of aerated concrete mixture and the physical and mechanical properties of aerated concrete samples are presented. Carbonate waste of the Donbass industry – limestone (crushing



screenings) – was used as a siliceous component of the aerated concrete mixture. A positive effect of the chemical modifier BASF MasterCast 2454 on the temperature of the aerated concrete mixture at the stage of intensive swelling $t_{\max} = 43,5\text{--}43,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (within 17 minutes from the moment of mixing with water) was established at a modifier consumption of 0,7 % of the cement weight. At the same time, the water-solid ratio of the mixture decreases by 43 %, which has a positive effect on an increase in the compressive strength by 49 % ($R = 2,17\text{ MPa}$) after heat and moisture treatment of aerated concrete samples compared to the control samples. The research results are presented within the framework of the implementation of the state assignment Reg. № SREDTW 123121900004-9 «Development of compositions and technology of structural and structural-thermal-insulating efficient building materials and products, including those using man-made raw materials (within the framework of the implementation of the program for the development of the building materials industry of the Donetsk People's Republic)».

Keywords: aerated concrete, carbonate waste, physical and mechanical properties, concrete sample, construction industry

For citation: Martynova V. B., Yatsyuk A. A. Influence of the type and consumption of chemical modifiers on the properties of aerated concrete mixture and physical and mechanical properties of non-autoclaved aerated concrete samples. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Modern building materials*. 2025;1(171):59–70. (In Russ.). doi: 10.71536/vd.2025.1c171.8. edn: pdnbof.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

В целях модернизации и технологического развития российской экономики и повышения ее конкурентоспособности в январе 2014 г. Председателем Правительства Российской Федерации был утвержден долгосрочный Прогноз научно-технологического развития России на период до 2030 г. в котором представлены приоритетные направления развития науки, технологий и техники Российской Федерации. Одним из приоритетных направлений является «Рациональное природопользование» [1]. Добыча полезных ископаемых одна из динамичных отраслей экономики, которая влечет за собой рост объемов отходов производства и потребления, накопленного экологического ущерба [2]. Это приведет не только к снижению качества жизни населения, но и к потере инвестиционной привлекательности ряда регионов, что негативно скажется на динамике их экономического развития. Комплексное освоение минеральных ресурсов, а также техногенного сырья является одной из приоритетных задач для устойчивого развития региона.

Одним из основных видов добываемого минерального сырья, которое используется в народном хозяйстве – карбонатные породы. Добычу и разработку карбонатных пород в России можно осуществлять круглый год [3], Донбасс Донецкой Народной Республики (ДНР) не является исключением. По данным Росстата (открытого доступа) на январь 2024 года добыча полезных ископаемых, в том числе карбонатных пород, увеличивается по сравнению с предыдущим годом.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Рациональное массовое использование карбонатных пород в качестве сырья или в качестве сопутствующего материала при производстве продукции обусловлено особым химическим составом и физико-механическим свойствам. Чистые известняки содержат 56,03 % CaO и 43,97 % CO₂. Их плотность варьируется в пределах 1 590–2 750 кг/м³, твердость по шкале Мооса 3, водопоглощение по массе около 20,6 %, пористость составляет до 40 % [4; 5]. Доломитовые известняки по химическому составу приближаются к минералу доломиту с содержанием 30,40 % CaO, 20,6 % MgO, 47,90 % CO₂ [5; 6]. В зависимости от геологических особенностей определяется качественная характеристика карбонатных пород. В частности карбонатные породы Донбасса ДНР представлены Комсомольским рудоуправлением ЮГМК – это крупнейший производитель флюсового известняка и щебня в Донбассе. Характеризуется карбонатная порода следующими свойствами: средняя плотность 2 410–5 000 кг/м³, водопоглощение 0,15–2,09 %, пористость 0,04–3,3 %, марка по дробимости 200–1000, марка по морозостойкости F15–F150.

Так же в Российской Федерации крупные запасы карбонатных пород находятся на территории Республики Крым и широко распространены. Это связано с особенностями геологического строения полуострова, предопределяющими богатство и разнообразие запасов осадочных пород. Эта порода отличается высокой неоднородностью по плотности и минеральному составу и механическим свойствам. Например, плотность варьируется от 2 000–2 800 кг/м³ [7].

Карбонатные породы используются в следующих отраслях народного хозяйства:

1. Строительная.
2. Металлургическая.
3. Сельскохозяйственная.
4. Энергетическая.
5. Химическая.
6. Пищевая.
7. Медицинская (рис. 1).

В строительной отрасли карбонатные породы являются сырьем для производства, например, цемента, строительной извести, при производстве стекла, декоративных изделий. Кроме того используются в дизайне и ландшафтной архитектуре, в качестве отделочных материалов, например, фасадная и тротуарная плитка, лестницы, а также как облицовочный материал для внутренних работ [3; 4; 6]. Из общего числа добываемых карбонатных пород в строительной отрасли более 80 % ориентировано для производства крупного и мелкого заполнителя различных фракций, например, как заполнитель для сухих строительных смесей. Наполнитель используется при производстве мягкой кровли, асфальтобетона. В металлургической промышленности используется при выплавке олова, для производства никеля, литейного чугуна, а также при доменной выплавке руды, цветных металлов в качестве флюса.

Известняковая и доломитовая мука в качестве минеральной добавки используется в сельском хозяйстве и как минеральное удобрение. Карбонатные породы используются в топках тепловых электростанций при сжигании угля и в качестве промывочной извести для бурения нефтяных и газовых скважин.

В химической отрасли карбонатные породы используются при производстве пластика, резины, составов для обработки кожи, ткани и наполнителей для красок.

В меньшей мере карбонатные породы применяются в пищевой и медицинской отрасли.

На сегодняшний день основное место на рынке строительной индустрии занимает производство известнякового и доломитового щебня при дроблении карбонатной породы. Научными школами и исследователями разных стран доказано (рис. 2), что применение известняка в качестве крупного и мелкого заполнителя в бетоны повышает его физико-механические свойства. Улучшает эксплуатационные свойства и сейсмостойкость строительных конструкций. Кроме того, применение известняка в качестве наполнителя не снижает физико-механические свойства цементов при этом себестоимость значительно снижается, а для отдельных видов цементов качественные характеристики выше нормативных значений [8–20 и др.].

Карбонатные породы неоднородны и содержат включения прочностью менее 20 МПа, поэтому при переработке (отсева) сырья они являются отходами производства и складироваться огромными тоннажами в отвалах и составляют около 15 %. Отход дробления характеризуется по своим качественным характеристикам как мелкий заполнитель, который подвержен выветриванию. Такие дисперсные отходы негативно влияют на экологию региона, загрязняя почву, поверхностные и подземные воды.

Традиционное использование отхода дробления фракции 0–5 мм в сельском хозяйстве. Рассев на фракции используется для производства сухих смесей. При этом такой фракционный рассев отхода осуществляется в полной мере при 0,5 % влажности материала. Данная технология требует дополнительных финансовых затрат и энергетических ресурсов. Все это составляет низкую долю утилизации отходов. Поэтому необходим комплексный подход при добыче карбонатных пород от модернизации технологической линии с использованием оборудования, которое учитывает особенности карбонатных пород, до полной утилизации отсева дробления, что повысит эффективность работы добывающего предприятия.

Одним из перспективных направлений утилизации отходов дробления фракции 0–5 мм это производство эффективных строительных материалов, в частности изделий из неавтоклавного газобетона. Повышенный уровень энергоэффективности газобетонных изделий позволяет применять его в качестве конструкционно-теплоизоляционного и теплоизоляционного стенового материала в малоэтажном и высотном жилищном домостроении.

При производстве газобетонных изделий неавтоклавного твердения используются сырьевые компоненты: вяжущее, кремнеземистый компонент, химические и минеральные добавки (модификаторы), стабилизаторы и ускоритель твердения, порообразователи, активаторы порообразователя, вода затворения.

Дефицит или отсутствие в регионах качественных кремнеземистых компонентов, может быть, восполнен применением местных карбонатных пород, в частности отхода дробления известняка. При выборе отхода необходимо руководствоваться фракционным составом и физико-механические свойства, что позволит обеспечить производство газобетонных изделий более дешёвым сырьевым компонентом, снизить энергетические затраты и капитальные вложения.

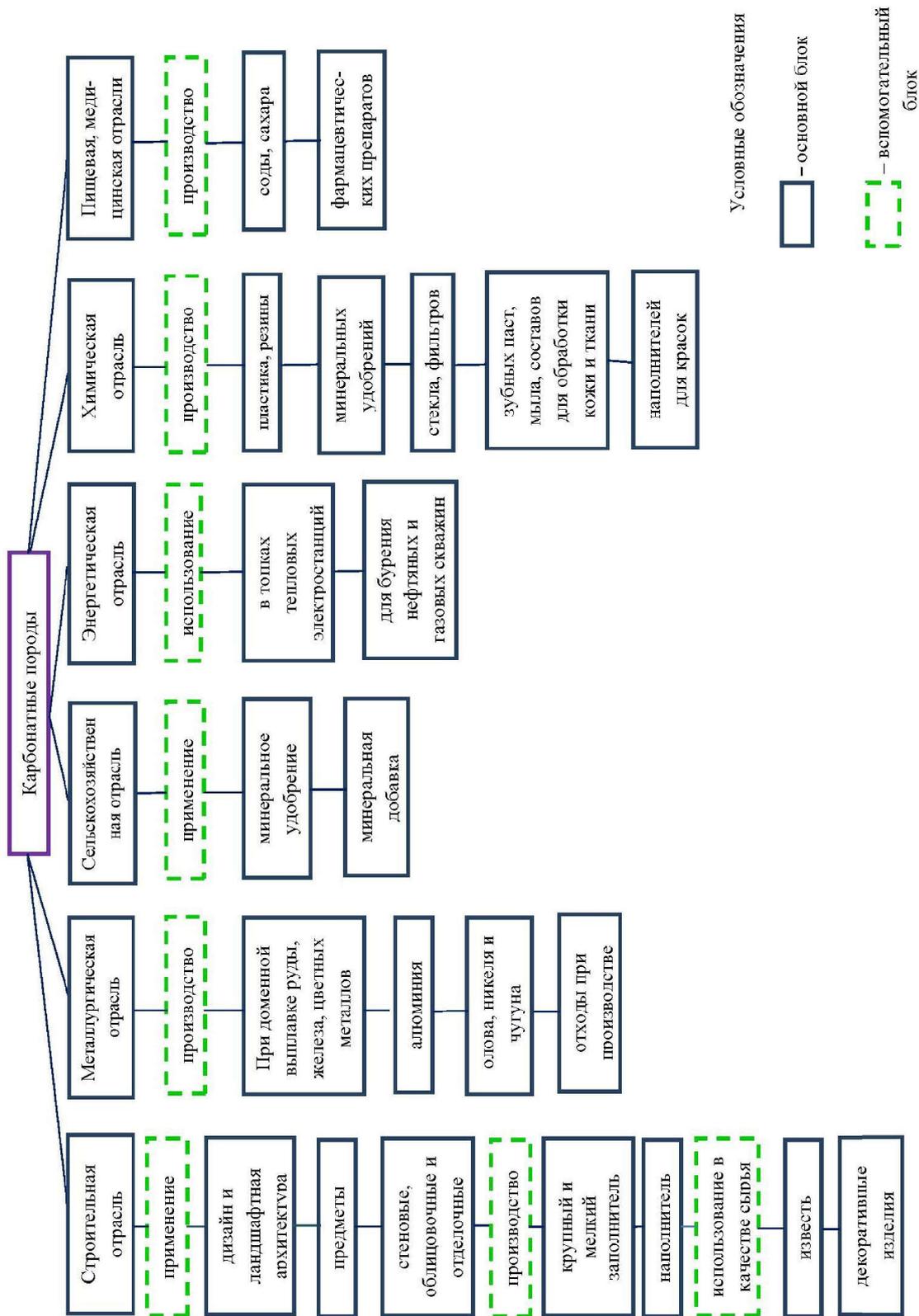


Рисунок 1 – Схема рационального использования карбонатного сырья в народном хозяйстве.

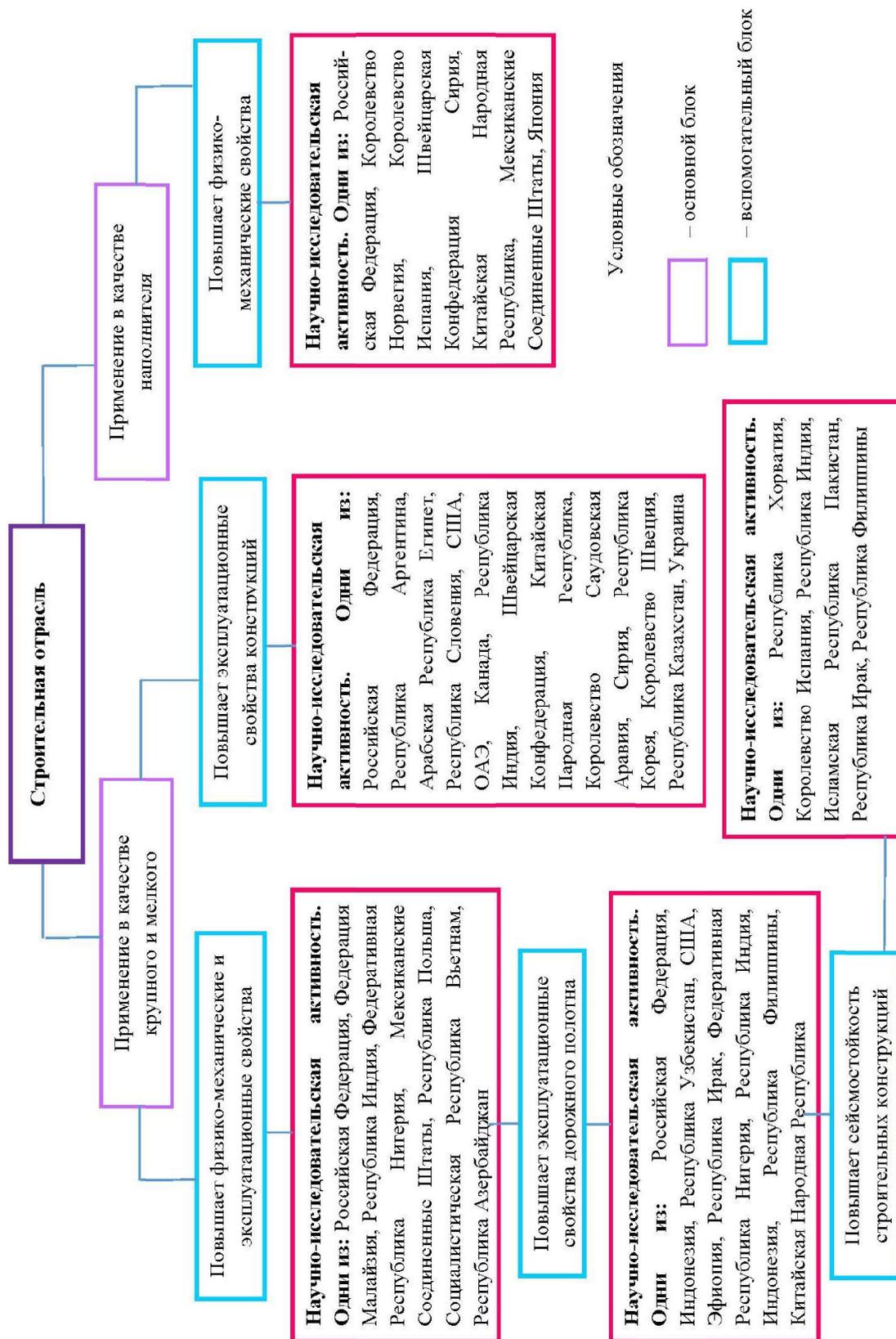


Рисунок 2 – Схема использования известняка в строительной отрасли.

Цель исследования: определит влияние вида и расхода химического модификатора на свойства газобетонной смеси и физико-механические свойства образцов газобетона неавтоклавного твердения в составе, которого в качестве кремнеземистого компонента используется карбонатный отход промышленности Донбасса – известняк (отсев дробления).

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

При проведении исследований в качестве вяжущего использовался портландцемент ПЦ 500 Д0 ОАО «Новоросцемент», г. Новороссийск. В качестве кремнеземистого компонента – отход дробления известняка Комсомольского рудуправления ЮГМК, г. Комсомольское. Химический состав и физико-механические свойства известняка представлены в табл. 1, 2 соответственно. Зерновой состав отхода дробления представлен в табл. 3.

Таблица 1. Химический состав известняка

Наименование материала	п.п.п	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	MnO	P ₂ O ₅	ZnO
Известняк	43,42	1,16	0,43	0,27	53,76	0,62	0,21	0,05	0,010	0,014	0,005	0,044

Таблица 2. Физико-механические свойства известняка

Наименование материала	Истирание, С, %	Средняя плотность, ρ, кг/м ³	Водопоглощение, W, %	Пористость, П, %	Марка по дробности	Марка по морозостойкости
Известняк	2,4–5,0	2 410–5 000	0,15–2,09	0,037–3,28	200–1000	F15–F150

Таблица 3. Зерновой состав отхода дробления

№ п/п	Показатели	Диаметр отверстий сит, мм					
		0,63	0,16	0,071	0,063	0,056	< 0,56
1	Масса заполнителя на сите, m _p , кг	0	0,281	0,636	0,036	0,004	0,043
2	Частные остатки, a _p , %	–	28,1	63,6	3,6	0,4	4,3
3	Полные остатки, A _p , %	–	28,1	91,7	95,3	95,7	100

В качестве модификаторов газобетонной матрицы использовали суперпластификаторы: Basf MasterCast 2454 – инновационная добавка (на основе эфира поликарбоксилата), специально разработанная для использования в производстве газобетона; ALS 2471 – экспериментальный суперпластификатор; Homacryl, основой которого является водная дисперсия сополимера эфиров акриловых кислот. Расход модификаторов варьировался от 0,3 до 0,9 % с шагом 0,2 % от массы цемента. В качестве газообразователя использовали алюминиевую пудру ПАП-1, NaOH – активатор пудры. Расход исходных компонентов газобетонной смеси на 1 м³ с расчётной средней плотностью газобетона 600 кг/м³ представлен в табл. 4.

Таблица 4. Расход исходных компонентов газобетонной смеси на 1 м³

№ п/п	Исходные компоненты	Величина	Единицы измерения	Текущность смеси (диаметр расплыва по Суттарду), d _{сут} , см
1	Портландцемент М500 Д0	310	кг	34
2	Кремнеземистый компонент (отход промышленности)	234	кг	
3	Активатор алюминиевой пудры (NaOH)	0,466	кг	
5	Газообразователь (алюминиевая пудра ПАП-1)	0,686	кг	
6	Вода затворения	263	л	

Диаметр распыла по Суттарду, $d_{\text{сут}}$ составляет 34 см.

Современные технологии бетона основываются на создании высококачественного искусственного камня с высокой дисперсностью, низкой дефектностью и стабильной структурой [21; 22]. На этой основе можно создавать различные виды бетона для различных целей, добавляя в его структуру дополнительные компоненты, включая химические модификаторы. Изменение структуры газобетонной матрицы с помощью различных химических добавок позволит создать эффективные газобетоны с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Эффективность химического модификатора, как известно, зависит от его состава и правильной дозировки.

Ранее в работах [23–25] установлены оптимальные составы газобетонных смесей с использованием в качестве кремнеземистого компонента карбонатных пород – известняков добываемых в Республике Крым и Донбассе с расчетной средней плотностью бетона 500–700 кг/м³ по критерию пластической прочности газобетонной смеси.

Влияние вида и расхода модификатора на водо-твердое отношение газобетонной смеси при постоянном диаметре распыла и физико-механические свойства газобетонных образцов неавтоклавного твердения представлено в табл. 5 и рис. 3, 4.

Таблица 5. Влияние расхода модификатора на свойства газобетонной смеси и бетона

Свойства газобетонной смеси и бетона	К	Модификаторы									
		Номасурил		ALS 2471				BASF MasterCast 2454			
Расход модификатора, %	0	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,9
Водо-твердое отношение, В/Т	0,485	0,456	0,475	0,384	0,353	0,321	0,296	0,296	0,277	0,252	0,245
Предел прочности при сжатии, Рсж, МПа	1,16	1,17	1,3	1,59	1,87	2,41	2,37	1,13	2,17	2,04	2,24
Средняя плотность, ρ , кг/м ³	625	670	696	589	640	673	682	616	630	628	646

Примечание: К – контрольный состав газобетона

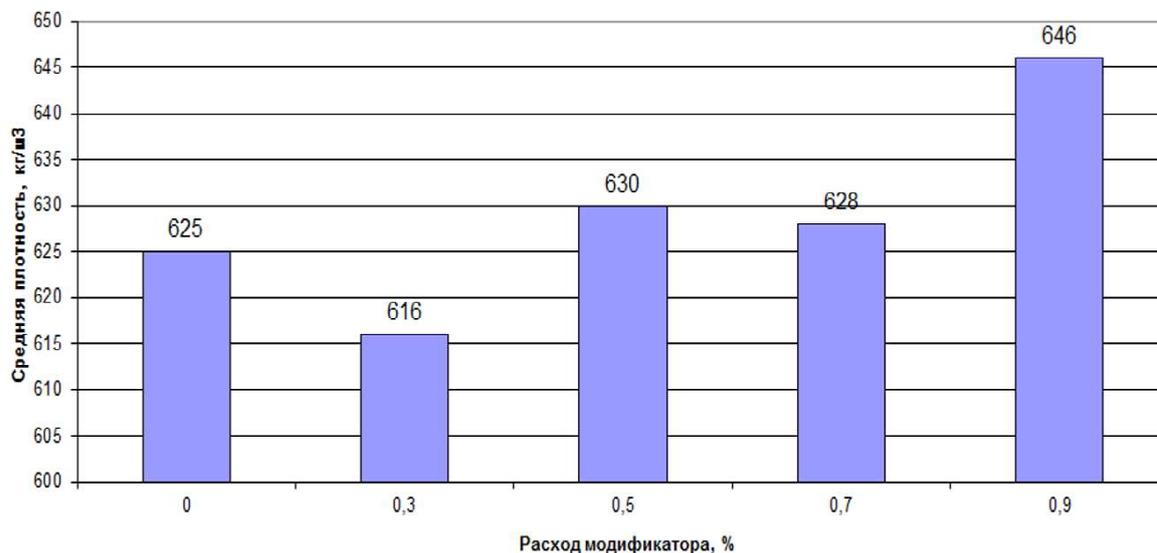


Рисунок 3 – График зависимости расхода модификатора BASF MasterCast 2454 на среднюю плотность образцов газобетона.

С увеличением модификатора Номасурил в газобетонных смесях более чем 0,5 % при исследовании наблюдается оседание газобетонного массива спустя 60 мин после заливки смеси в формы. При этом зафиксировано увеличение В/Т отношения смеси и увеличение средней плотности. Следовательно, зафиксировано отрицательное влияние экспериментального модификатора на газобетонную смесь с использованием известнякового отхода. При этом необходимо провести дополнительные исследования, для большего понимания причин такого влияния.

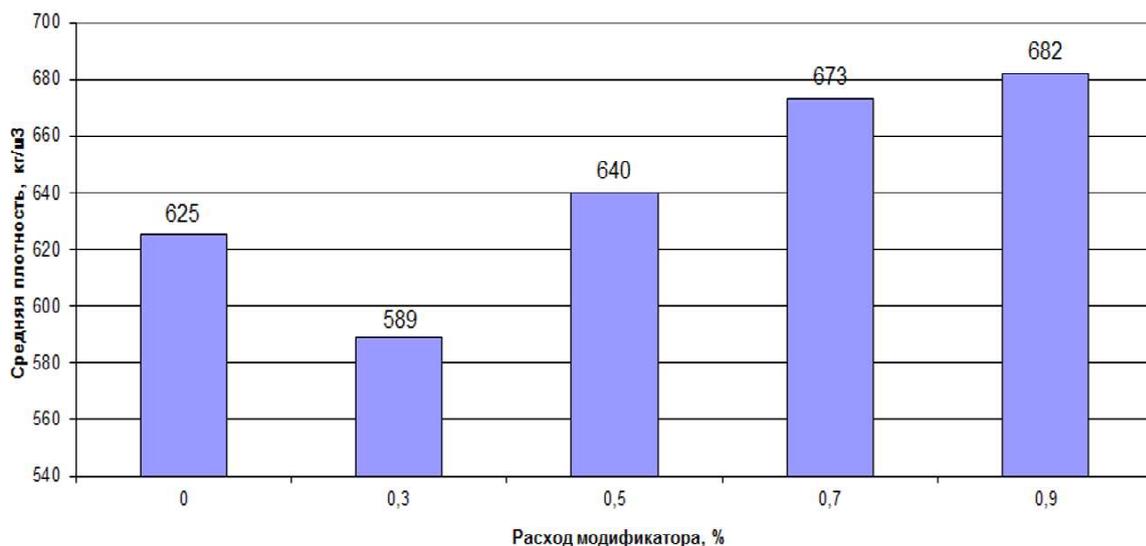


Рисунок 4 – График зависимости расхода модификатора ALS 2471 на среднюю плотность образцов газобетона.

С расходом модификатора BASF MasterCast 2454 в количестве 0,7 % наблюдается незначительное увеличение средней плотности образцов газобетона при этом снижается В/Т отношение смеси на 49 %, что положительно сказывается на прочностных показателях бетона и составляет $R_{сж} = 2,17$ МПа после тепло-влажностной обработки газобетонных образцов. При расходе модификатора в количестве 0,9 % также снижается В/Т отношение смеси и увеличивается предел прочности при сжатии, но при этом увеличивается средняя плотность на 21 кг/м³, что не соответствует расчетной средней плотности газобетона. При расходе модификатора в количестве менее 0,5 % не наблюдается прироста прочности газобетонных образцов по сравнению с контрольными газобетонными образцами, но при этом снижается В/Т отношение смеси.

Если рассматривать влияние расхода модификатора ALS 2471 на снижение В/Т отношения газобетонной смеси, то следует отметить положительное влияние расхода модификатора в количестве 0,7 % при этом снижается В/Т отношение смеси на 34 % по сравнению с контрольным составом газобетонной смеси, что приводит к значительному увеличению предела прочности при сжатии на 50 %, но и существенно увеличивает среднюю плотность на 48 кг/м³.

На рисунках 5, 6 представлены графические зависимости расхода модификатора BASF MasterCast 2454 и ALS 2471 на В/Т отношение смеси и предел прочности при сжатии образцов газобетона. С увеличением

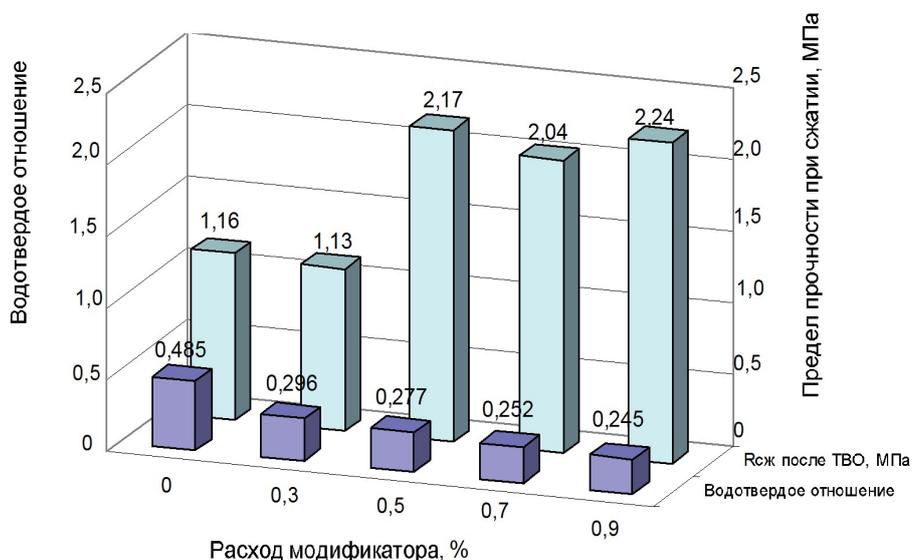


Рисунок 5 – График зависимости расхода модификатора BASF MasterCast 2454 на В/Т газобетонной смеси и предел прочности при сжатии образцов газобетона.

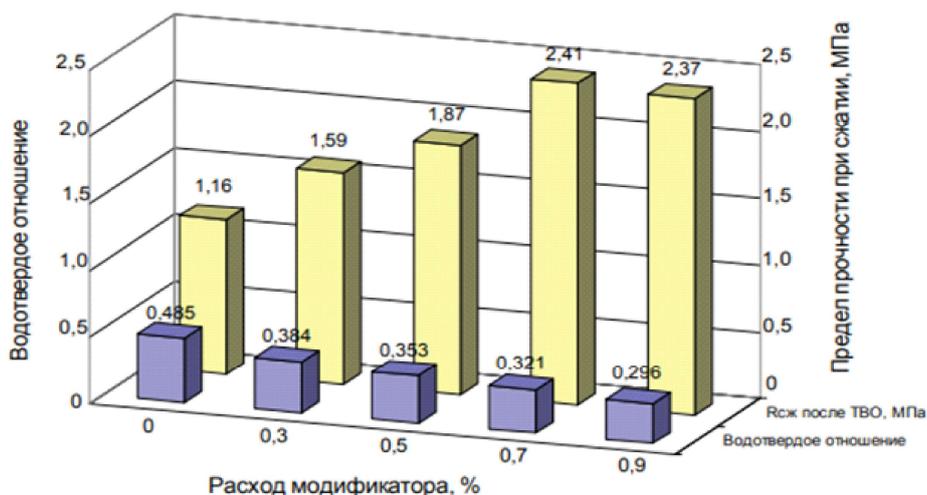


Рисунок 6 – График зависимости расхода модификатора ALS 2471 на В/Т газобетонной смеси и предел прочности при сжатии образцов газобетона.

расхода модификаторов наблюдается снижение В/Т отношения смеси и увеличивается предел прочности при сжатии образцов газобетона.

Графики изменения температуры газобетонной смеси во времени от расхода модификаторов BASF MasterCast 245, ALS 2471, Номасгил представлены на рис. 7–9.

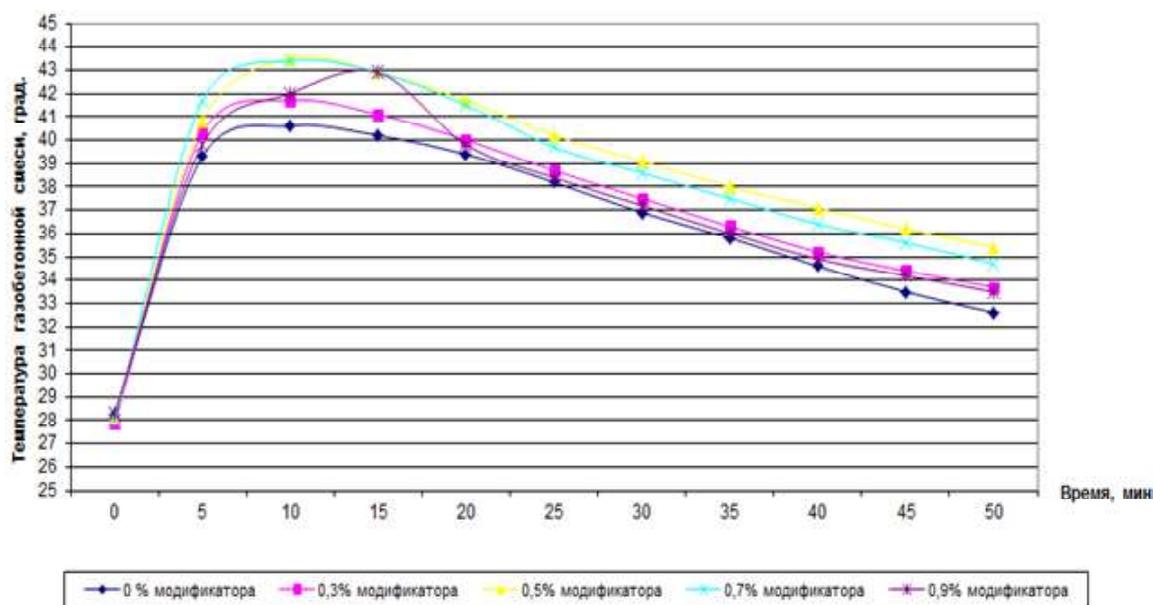


Рисунок 7 – График изменения температуры газобетонной смеси во времени от расхода модификатора BASF MasterCast 245.

Температура газобетонной смеси с момента затворения водой измерялась с помощью глубинного электронного термометра в течение 50 минут. Установлено, что максимальная температура газобетонной смеси на стадии интенсивного вспучивания зафиксирована $t_{\max} = 43,5\text{--}43,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в течение 17 минут) при расходе модификатора BASF MasterCast 245 в количестве 0,7 % от массы цемента (рис. 8), что интенсифицирует гидратацию цемента, следовательно положительно влияет на прочностные показатели образцов газобетона. Температура газобетонной смеси $43,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ с использованием модификатора ALS 2471 (рис. 9), достигается на 12 минуте 30 секундах с момента затворения водой смеси при расходе модификатора 0,9 %, при этом увеличивается прочность при сжатии образцов газобетона на 50 %, но и увеличивается средняя плотность на 57 кг/м^3 , что не допустимо.

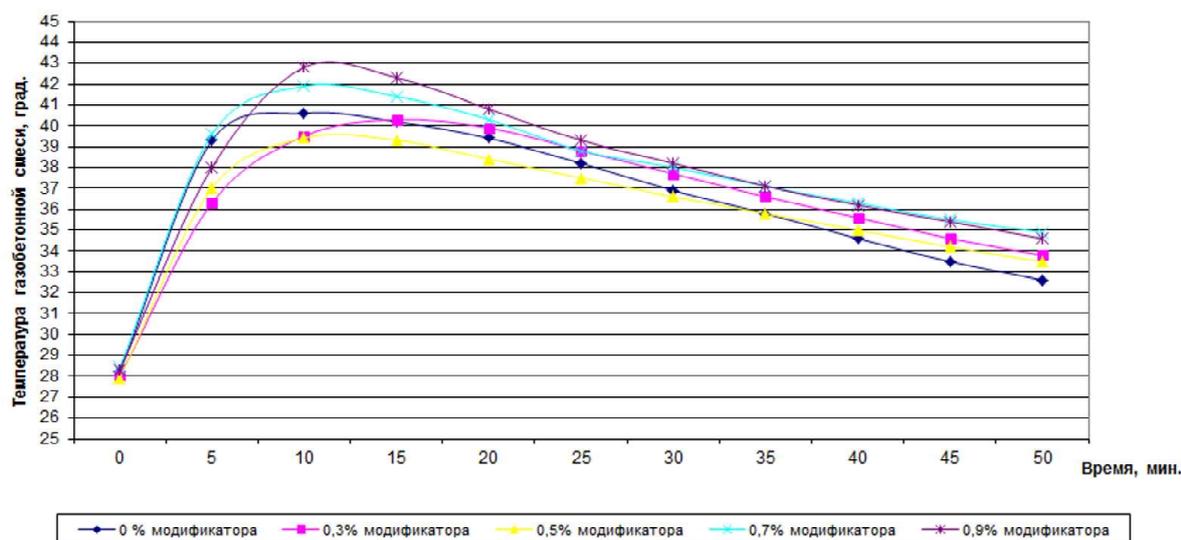


Рисунок 8 – График изменения температуры газобетонной смеси во времени от расхода модификатора ALS 2471.

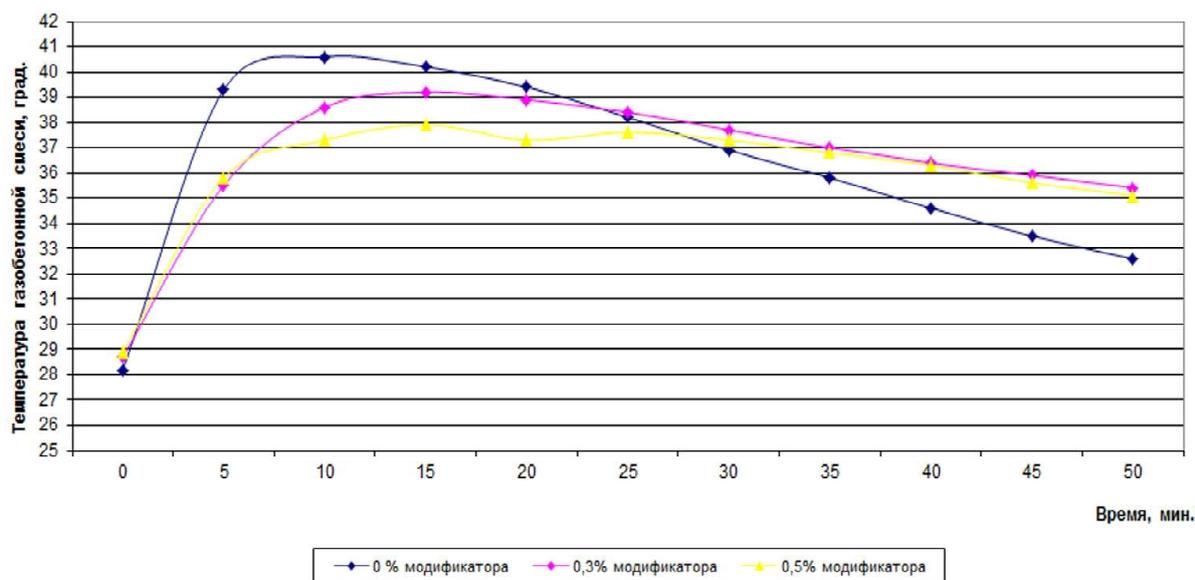


Рисунок 9 – График изменения температуры газобетонной смеси во времени от расхода модификатора Нотасгул.

ВЫВОДЫ

Установлено положительное влияние химического модификатора BASF MasterCast 2454 на свойства газобетонной смеси, в частности температуру смеси на стадии интенсивного вспучивания $t_{\max} = 43,5-43,0$ °С (в течение 17 минут с момента затворения водой) при расходе модификатора 0,7 % от массы цемента. При этом снижается водо-твердое отношение смеси на 43 % ($B/T = 0,252$), что положительно сказывается на увеличении прочностных показателей газобетона на 49 % ($R_{сж} = 2,17$ МПа) после тепло-влажностной обработки газобетонных образцов по сравнению с контрольным составом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Прогноз научно-технологического развития России: 2030. Рациональное природопользование / под редакцией Л. М. Гохберга, Н. С. Касимова. – Москва : Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2014. – 48 с. – ISBN 978-5-906737-09-0. – Текст : непосредственный.

2. Президент РФ утвердил Стратегию научно-технологического развития России до 2035 года. – Текст : электронный // НИУ ВШЭ : [сайт]. – 2016. – 5 декабря. – URL: <https://prognoz2030.hse.ru/news/202357104.html> (дата обращения: 24.11.2024).
3. Природосберегающие технологии производства строительных материалов / В. А. Дубов, А. А. Журавлев, А. С. Князев, Д. Ю. Копылов. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2013. – № 2. – С. 81–83.
4. Селективная система разработки известняков – перспективы расширения ассортимента продукции горного предприятия / В. П. Сафронов, Ю. В. Зайцев, В. В. Сафронов, А. В. Панкратов. – Текст : непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Выпуск 7, часть 2. – С. 160–168.
5. Справочник по литологии / [Н. В. Логвиненко, В. Т. Фролов, Н. Б. Вассоевич и др.]; под редакцией Н. Б. Вассоевича [и др.]. – Москва : Недра, 1983. – 509 с. – Текст : непосредственный.
6. Журавлев, А. А. Рациональное использование сырья карбонатных месторождений / А. А. Журавлев. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2010. – № 6. – С. 17–19.
7. Любомирский, Н. В. Научные основы получения прессованных известково-известняковых материалов карбонизационного твердения : специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Любомирский Николай Владимирович ; Национальная академия природоохранного и курортного строительства. – Симферополь, 2013. – 501 с. – Текст : непосредственный.
8. The Use of Limestone Sand for the Seismic Base Isolation of Structures / I. Banović, J. Radnić, N. Grgić, D. Matešan. – Текст : электронный // Advances in Civil Engineering. – 2018. – № 6. – P. 1–12. – URL: https://www.researchgate.net/publication/326761262_The_Use_of_Limestone_Sand_for_the_Seismic_Base_Isolation_of_Structures (дата обращения: 24.11.2024). – DOI: 10.1155/2018/9734283.
9. Construction Techniques and Quality Test and Evaluation of Lightweight Cellular Concrete Mixed with Fly Ash as Subgrade Material / Xin Liu, Cw Ni, Hong Ji, Shuyan Tan. – Текст : электронный // Advances in Materials Science and Engineering. – 2019. – № 4. – P. 1–12. – URL: https://www.researchgate.net/publication/334025144_Construction_Techniques_and_Quality_Test_and_Evaluation_of_Lightweight_Cellular_Concrete_Mixed_with_Fly_Ash_as_Subgrade_Material (дата обращения: 24.11.2024). – DOI: 10.1155/2019/5402679.
10. Салихов, М. Г. Щебеночно-мастичные асфальтобетоны пониженной стоимости для покрытий лесовозных дорог / М. Г. Салихов, В. М. Вайнштейн, Е. В. Вайнштейн. – Текст : непосредственный // Вестник МарГТУ. – 2009. – № 3. – С. 64–67.
11. Фомин, А. Ю. Высокопрочный серощебень из карбонатных пород для устройства оснований в конструкциях дорожных одежд / А. Ю. Фомин, Р. Н. Аскарора, В. Г. Хозин. – Текст : электронный // Известия КГАСУ. – 2022. – № 1(59). – С. 54–63. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48233309> (дата обращения: 24.11.2024). – DOI: 10.52409/20731523_2022_1_54. – EDN: VBHJTW.
12. Фомин, А. Ю. Новые серосодержащие материалы для дорожного строительства / А. Ю. Фомин. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2016. – № 12. – С. 80–82.
13. Mehdipour, I. Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review / I. Mehdipour, K. H. Khayat. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2018. – Volume 161. – P. 340–353. – URL: https://www.researchgate.net/publication/321461521_Understanding_the_role_of_particle_packing_characteristics_in_rheo-physical_properties_of_cementitious_suspensions_A_literature_review (дата обращения: 24.11.2024). – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.147.
14. Effect of particle size distribution on flocculation and its growth in cement-ground limestone suspensions / Kaidong Han, Jia Xiao, Zedi Zhang, Jialei Wang. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2020. – Volume 262(1). – P. 120047. – URL: https://www.researchgate.net/publication/342881977_Effect_of_particle_size_distribution_on_flocculation_and_its_growth_in_cement-ground_limestone_suspensions (дата обращения: 24.11.2024). – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120047.
15. Huai-liang Wang. Strength and deformation properties of structural lightweight concrete under true tri-axial compression / Huai-liang Wang, Xiao-hua Huang, Bao Xie. – Текст : электронный // Case Studies in Construction Materials. – 2019. – Volume 11. – P. 1–13. – URL: https://www.researchgate.net/publication/334588938_Strength_and_deformation_properties_of_structural_lightweight_concrete_under_true_tri-axial_compression (дата обращения: 24.11.2024). – DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00269
16. Hafiz, Mohamed Abdul. Tensile response of low clinker UHPFRC subjected to fully restrained shrinkage / Mohamed Abdul Hafiz, Amir Hajiesmaeili, Emmanuel Denarié. – Текст : электронный // Cement and Concrete Research. – 2019. – Volume 124. – P. 1–12. – URL: https://www.researchgate.net/publication/336184240_Tensile_response_of_low_clinker_UHPFRC_subjected_to_fully_restrained_shrinkage (дата обращения: 24.11.2024). – DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105804.
17. Ellis, M. Gartner. Industrially Interesting Approaches to «Low-CO₂» Cements / Ellis M. Gartner. – Текст : электронный // Cement and Concrete Research. – 2004. – Volume 34, issue 9. – P. 1489–1498. – URL: https://www.researchgate.net/publication/222529966_Industrially_Interesting_Approaches_to_Low-CO2_Cements (дата обращения: 24.11.2024). – DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.021.
18. Early hydration of cementitious systems accelerated by aluminium sulphate: Effect of fine limestone / Lukas G. Briendl, Florian Mittermayr, Andre Baldermann, Florian Roman Steindl. – Текст : электронный // Cement and Concrete Research. – 2020. – Volume 134. – P. 106069. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/34131->

- 2169_Early_hydration_of_cementitious_systems_accelerated_by_aluminium_sulphate_Effect_of_fine_limestone (дата обращения: 24.11.2024). – DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106069.
19. Wang, Xiao-Yong. Kinetic Hydration Heat Modeling for High-Performance Concrete Containing Limestone Powder / Xiao-Yong Wang. – Текст : электронный // Advances in Materials Science and Engineering. – 2017. – Volume 2017. – P. 1–11. – URL: https://www.researchgate.net/publication/319494703_Kinetic_Hydration_Heat_Modeling_for_High-Performance_Concrete_Containing_Limestone_Powder (дата обращения: 24.11.2024). – DOI: 10.1155/2017/4090265.
 20. Study on Strength and Microstructure of Cement Pastes Containing Limestone Powder under Flowing Acid Solution Condition / Shuhua Liu, Lihua Li, Zhigang Wang, Jiafeng Wang. – Текст : электронный // International Scholarly Research Notices. – 2012. – Volume 2012. – P. 1–6. – URL: https://www.researchgate.net/publication/258404459_Study_on_Strength_and_Microstructure_of_Cement_Pastes_Containing_Limestone_Powder_under_Flowing_Acid_Solution_Condition (дата обращения: 24.11.2024). – DOI: 10.5402/2012/719636.
 21. Долгоров, А. В. Вторичные сырьевые ресурсы в производстве строительных материалов: физико-химический анализ : справочное пособие / А. В. Долгоров. – Москва : Стройиздат, 1990. – 456 с. – Текст : непосредственный.
 22. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности / Л. И. Дворкин, И. А. Пашков. – Киев : Вища школа, 1989. – Текст : непосредственный.
 23. Оптимизация состава неавтоклавного газобетона на карбонатном заполнителе / В. Б. Мартынова, С. В. Лахтарина, А. А. Куценкова [и др.]. – Текст : непосредственный // Технологии бетонов. – 2018. – № 3/4. – С. 14–17. – ISSN 1813-9787.
 24. Мартынова, В. Б. Оптимизация состава газобетонной смеси неавтоклавного твердения Д 500 по критерию пластической прочности / В. Б. Мартынова, С. В. Лахтарина, Ю. Ю. Дядюн. – Текст : электронный // 62 Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета : материалы конференции, Астрахань, 23–27 апреля 2018 года. – 2018. – С. 6. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35597466> (дата обращения: 24.11.2024). – EDN: UZHКVD.
 25. Дядюн, Ю. Ю. Модифицированный бетон неавтоклавного твердения на основе карбонатного сырья с повышенными физико-механическими свойствами / Ю. Ю. Дядюн, Д. М. Сокол. – Текст : электронный // Строительство – формирование среды жизнедеятельности : XXI Международная научная конференция : сборник материалов семинара «Молодежные инновации», Москва, 25–27 апреля 2018 года. – 2018. – С. 128–135. – URL: <https://www.elibrary.ru/xrjtqt> (дата обращения: 24.11.2024). – EDN: XRJTQT.

Информация об авторах

Мартынова Вита Борисовна – кандидат технических наук, доцент; начальник научно-исследовательской части Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: модифицированный неавтоклавный газобетон с повышенными физико-механическими свойствами.

Яцок Анастасия Анатольевна – младший научный сотрудник отдела сопровождения и мониторинга научной деятельности научно-исследовательской части Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: ячеистые бетоны неавтоклавного твердения.

Information about the authors

Martynova Vita B. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Head of Scientific Research Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: modified non-autoclaved aerated concrete with improved physical and mechanical properties.

Yatsyuk Anastasia A. – Junior Researcher, Department of Support and Monitoring of Scientific Activities of Scientific Research Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: cellular concrete of non-autoclave hardening.

Статья поступила в редакцию 26.12.2024; одобрена после рецензирования 17.01.2025; принята к публикации 24.01.2025.

The article was submitted 26.12.2024; approved after reviewing 17.01.2025; accepted for publication 24.01.2025.