

УДК 691.3

Мурузина Е.В., кандидат технических наук, доцент, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, sds-m7lab@mail.ru

Мясникова А.А., студент, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,

Мифтахова Н.Ф., студент, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,

ВЛИЯНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НА ФОРМИРОВАНИЕ НОВЫХ СТРУКТУР НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В данной работе анализируются инновационные материалы, такие как углеродноотрицательный бетон и самовосстанавливающийся бетон, которые способны абсорбировать CO₂ и улучшать характеристики конструкций. Рассматриваются методы карбонизации с добавлением известковой пыли, повышающие физико-механические свойства бетона и эффективность использования вторичных материалов. Подчеркивается необходимость перехода строительной отрасли к более устойчивым технологиям, что поможет снизить негативное воздействие на климат и открывает новые горизонты для экологичного строительства.

Ключевые слова: бетон, цемент, самовосстанавливающийся бетон, углеродноотрицательный бетон, биоуголь, известковая пыль, углекислый газ, экологичное строительство.

Считается, что на этапах жизненного цикла здания, таких как добыча сырья для изготовления строительных материалов и веществ, производство материалов и изделий для его возведения, логистика, строительно-монтажные работы и последующая эксплуатация зданий, выделяется значительное количество парниковых газов (преимущественно CO₂). По данным ООН на строительный сектор приходится около 37% годовых выбросов парниковых газов в мире, что составляет практически 10 гигатонн диоксида углерода в год [1,2]. Что, по мнению некоторых ученых, может спровоцировать повышение углеродного следа и впоследствии, к негативным изменениям климата планеты (его

потеплению), более быстрому загрязнению воздуха вредными веществами [3-5].

Поэтому вопрос появления «зеленых», «organic» материалов с возможностью безущербного воздействия на окружающую среду является современным вызовом научного сообщества. Появление подобных материалов должно благоприятно влиять на здоровье и благополучие людей, делая строительство зданий и сооружений более экологически чистым, и возможно в дальнейшем, экономически эффективным.

Цель данной работы является анализ инновационных структур строительных материалов, способных абсорбировать углекислый газ из воздуха, и внедрение их в сферу строительства.

Бетон — один из наиболее часто используемых материалов в мире, и, к сожалению, его производство является одним из основных источников выделения двуокси углерода (CO_2) в атмосферу [6]. Инженеры из Университета Пердью (США) [7] разработали состав цемента, который может поглощать CO_2 в два раза быстрее при затворенной бетонной смеси, чем обычный.

С каждым годом спрос на изготовление бетона растет, считается, что на его долю приходится более 8% мировых выбросов углекислого газа [8], в связи, с чем исследователи стремятся создать «экологически чистый бетон». Долю вяжущего вещества в таких составах стараются уменьшить или заменить, ввиду снижения рисков выделения CO_2 или даже вызвать его улавливание.

Введение небольших доз (нано- TiO_2 0%, 0,5%, 1%, 2%) диоксида титана в цементное тесто, приводит к уменьшению размера молекул гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), обозначаемого сокращённо как СН). Составы введенной добавки в смесь цемента представлены в табл.1.

Таблица 1 - Составы смесей цементных растворов

Смесь	В/Ц	Цемент, г	нано-TiO ₂ , г	Вода, г
CP0	0.45	260.0	0.0	117.0
CP0.5		258.7	1.3	
CP1		257.4	2.6	
CP2		254.8	5.2	
CP 0	0.50	260.0	0.0	130.0
CP 0.5		258.7	1.3	
CP1		257.4	2.6	
CP2		254.8	5.2	
CP0	0.55	260.0	0.0	143.0
CP0.5		258.7	1.3	
CP1		257.4	2.6	
CP2		254.8	5.2	

Заформованные образцы помещали в камеру, с повышенной концентрацией CO₂ на 24 часа (рис.1), затем анализировалось изменения их массы во времени и структуры пор с помощью трехмерного рентгеновского сканирования.

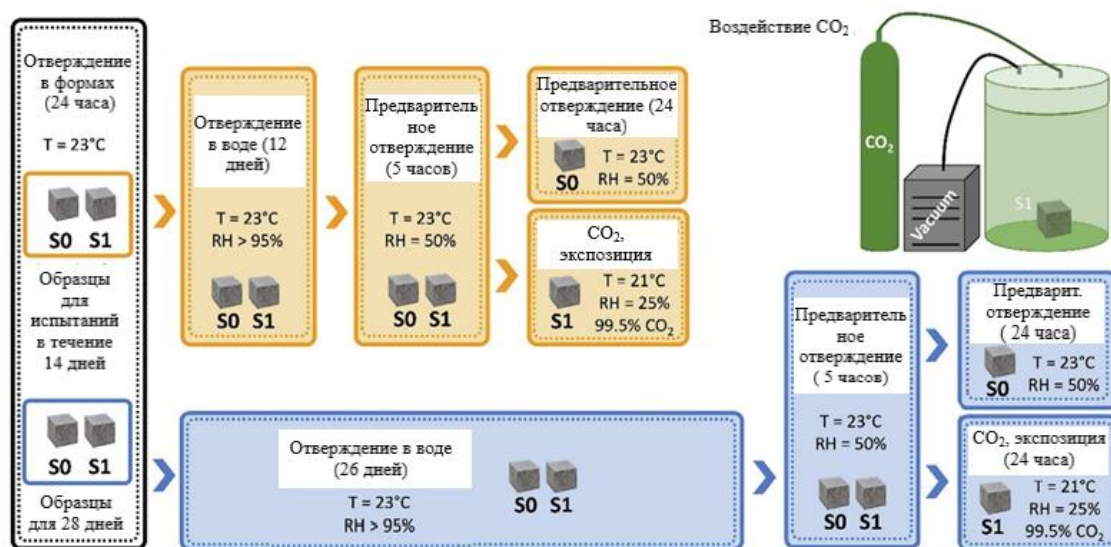


Рис. 1 Схема процесса отверждения и карбонизации бетонных образцов.

Как видно из графиков, диоксид титана в бетоне почти 2 раза повышает скорость поглощения CO₂ (рис.2).

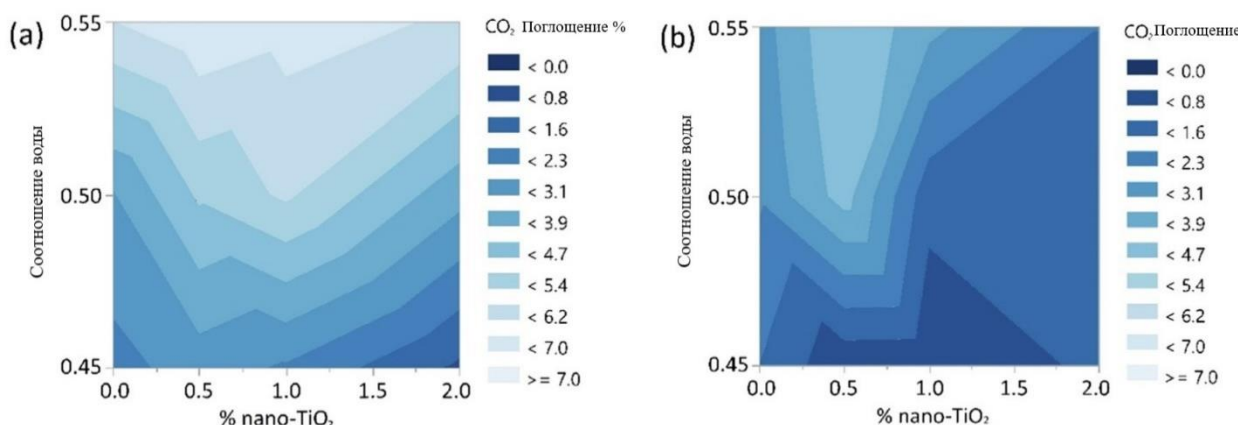


Рис. 2 Поглощение CO₂ (% от массы цемента) после 24-часовой выдержки. (a) - через 14 дней, (b) – через 28 дней.

Также обнаружено, что добавка диоксида титана работает до определенной концентрации (>1%) в цементном тесте, прежде чем эффективность начинала снижаться. Влияние добавки зависит также от соотношения воды и введенного порошка, а также возраста цементного теста. Исследования по подбору оптимальной концентрации добавки в цементное тесто для повышения устойчивости и долговечности продолжаются.

Интересным представляется, где авторы предлагают метод изготовления бетона с поглощением углерода [9].

Ученые предложили скорректировать формулу портландцемента, заменяя известняк вулканической породой или добавкой в виде диоксида титана, строительных отходов и пищевой соды [10,8,11,12]. Другие исследователи предлагают использовать микроводоросли для выращивания известняка (рис.3) [13,14].

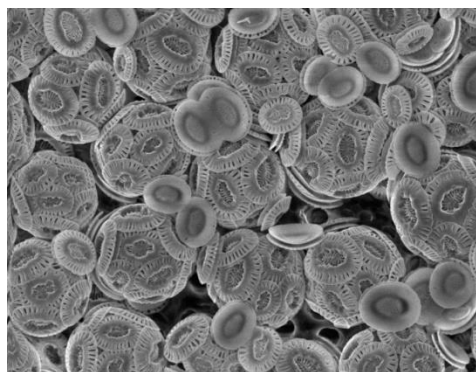


Рис. 3 Водоросли кокколитофоры, покрытые оболочкой из карбоната кальция.

Имеются исследования [9], где ученые предлагают применять древесный уголь (биоуголь), изготовленный из органических отходов. Хотя биоуголь и раньше добавляли в состав цемента, на этот раз команда ученых сначала обработала его в проточной воде, что привело к повышению его прочности. Помимо этого, биоуголь (рис.4) оказался способен поглощать до 23% собственного веса углекислого газа из окружающего воздуха.

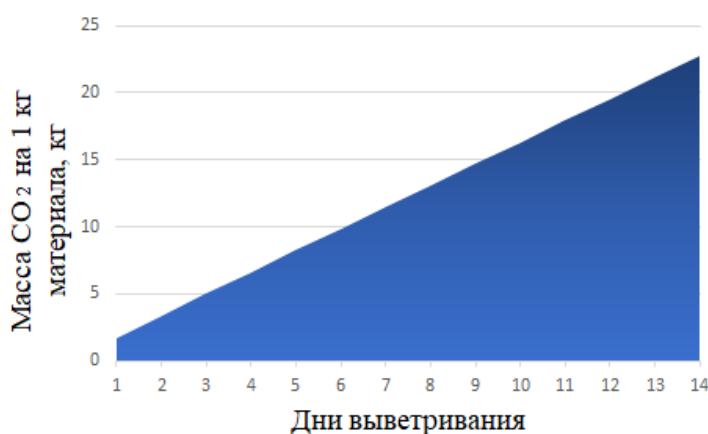


Рис. 4 Процесс поглощения CO₂ биоуглем после 14 дней выветривания.

Было обнаружено, что бетон, содержащий до 30% обработанного биоугля, оказался «углеродоотрицательным» — он поглощал больше углекислого газа, чем выделялось при производстве материала. По расчетам исследователей, 1 кг 30-процентного биоугля удаляет примерно на 13 г CO₂ больше, чем приходится на его производственные выбросы (рис.5).

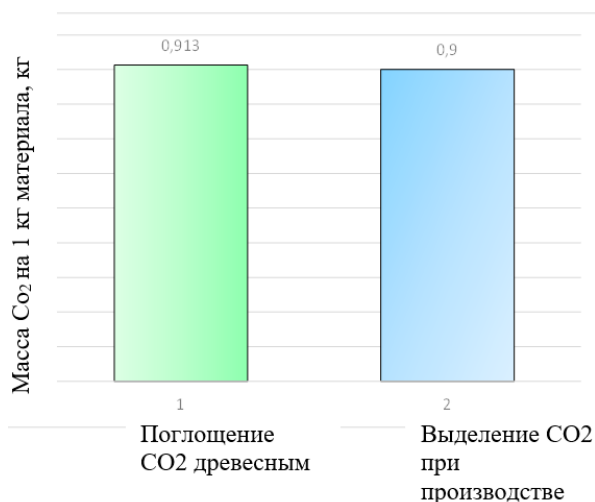


Рис. 5 Выделение CO₂ при производстве бетона и поглощение CO₂ биоуглем.

Такой бетон к тому же оказался достаточно прочным. При измерении

через 28 суток прочность бетона на сжатие составила 27,6 МПа, что примерно соответствует прочности обычного тяжелого бетона (В25). По-видимому, добавка биоугля в бетонную смесь привела к созданию углеродно-отрицательного бетона, который не только обеспечил синергетическое улавливание углерода, но и улучшил механические свойства бетона.

Учёные Крымского федерального университета предлагают синтезировать новые строительные композиты на основе доломитового вяжущего карбонатного типа твердения, используя отходы содового производства – известковую пыль (рис.6). Её получают в виде отсеков мраморовидных известняков и осаждаемой пыли в циклонах и рукавных фильтрах шахтных известковых печей.



Рис.6 Механически осаждаемая известковая пыль.

Твердение бетона осуществляется за счет поглощения этой пылью углекислого газа и преобразования его в нерастворимые соединения (CaCO_3), что подтверждается методами фазового анализа и гранулометрии, а также методом многопараметрической оптимизации для изучения процессов карбонизации. В результате твердения бетона получается прочный каменный материал. Также в исходную сырьевую смесь вводились наночастицы оксидов титана и вольфрама, способные поглощать фотоны солнечного света [15].

Эффективность введения известковой пыли в бетонную смесь подтвердилась данными экспериментально-статистических (ЭС) моделей

(рис. 7) исследованных параметров.

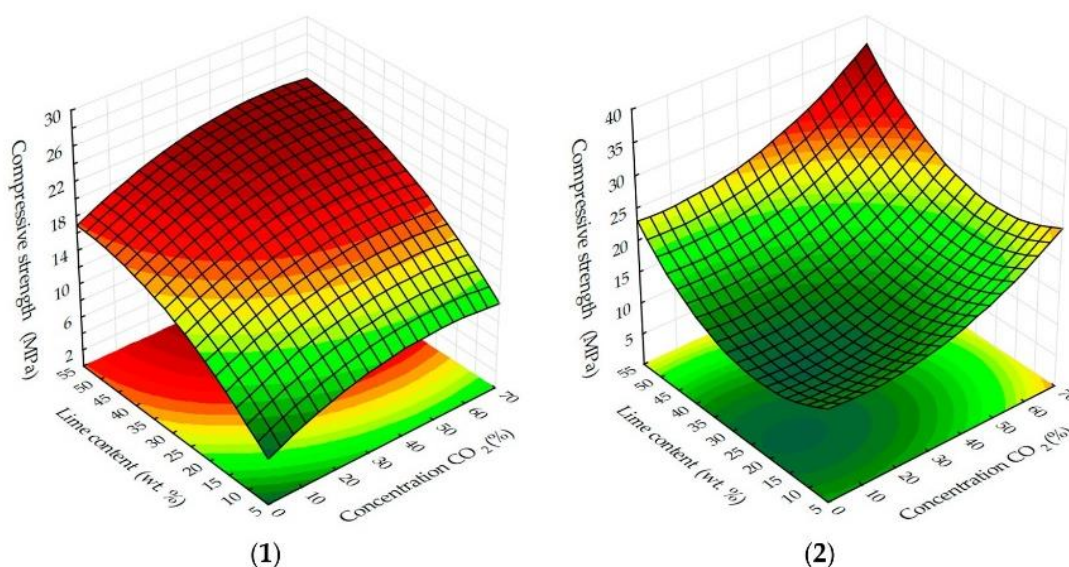


Рис. 7 Поверхности отклика изменения прочности на сжатие опытных образцов, карбонизированных динамичным (1) и статичным (2) способами в зависимости от содержания известковой пыли и концентрации CO₂

На основании исследования установлено, что способ карбонизации, который создаёт разрежение и поддерживает определенную концентрацию углекислого газа, является наиболее эффективным. Это делает процесс изготовления бетона более продуктивным и ресурсосберегающим.

Аналогичные исследования ведутся в Англии, США и Канаде [11,16-23]. Как видно, технологии, при которых углекислый газ поглощается, а не поступает в окружающую среду, сегодня являются актуальными. Считаю, что материалы, получаемые по предложенным технологиям, являются шагом к «зеленой» промышленности и экономике.

Интересной является разработка Самовосстанавливающегося бетона, поглощающего углекислый газ [24]. Суть идеи – самовосстанавливающийся бетон может «запечатывать» трещины в материале. Он способен заполнять трещины, при помощи раствора, содержащего фермент, аналогичного человеческой крови.

Этот фермент называется карбоангидраза (КА). Его отличительная

особенность – способность быстро переносить углекислый газ из клеток в систему кровотока. Ученые добавили его синтезированный аналог в цементный порошок перед смешиванием компонентов и заливкой строительного раствора.

При образовании в бетоне небольшой трещины (до 5 мм), фермент начинает взаимодействовать с CO₂, содержащимся в воздухе, и благодаря этому, начинают образовываться кристаллы карбоната кальция (CaCO₃), позволяющие заполнять образовавшуюся трещину (рис.8).

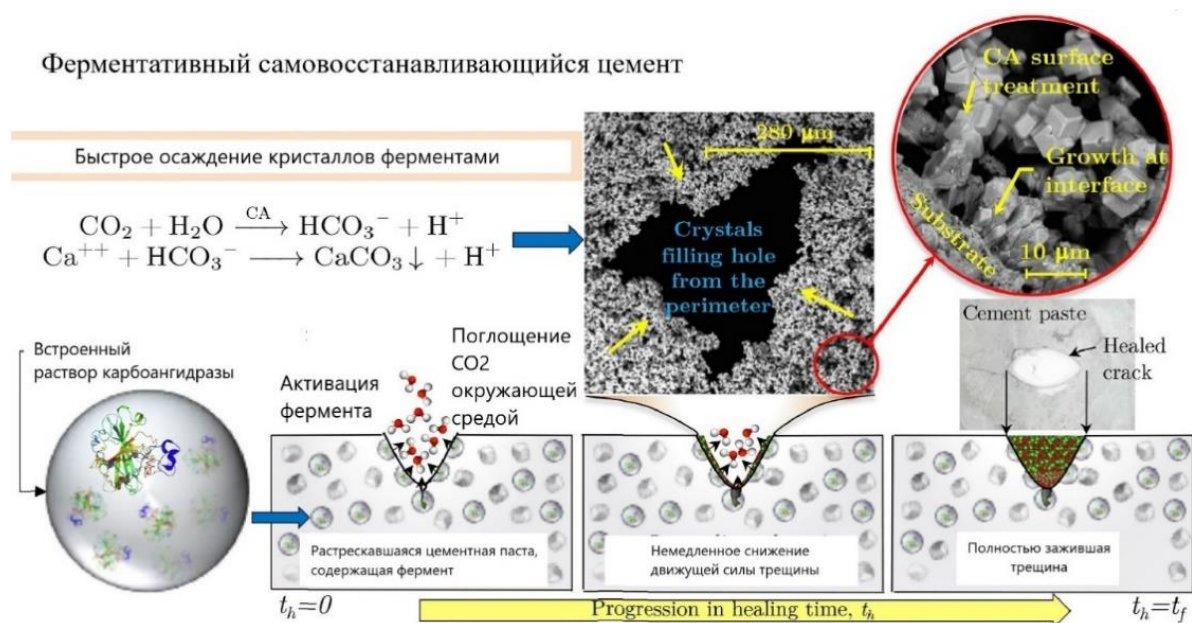


Рис. 8 Самовосстанавливающийся цементный раствор с использованием синтезированного фермента карбоангидраза

Укреплённый таким образом бетон может восстанавливать миллиметровые трещины в течение 24 часов. Такой состав нетоксичен и не имеет запаха; он позволяет быстро заполнять трещины и дефекты, что приводит к восстановлению прочности на сжатие до уровня неповрежденных образцов. В результате испытаний прочности на сжатие образцы СА-Mod-5x обеспечивает 97,5% прочности, в то время как прочность образцов с надрезом снижается до 75% от прочности неповреждённого образца (рис.9).

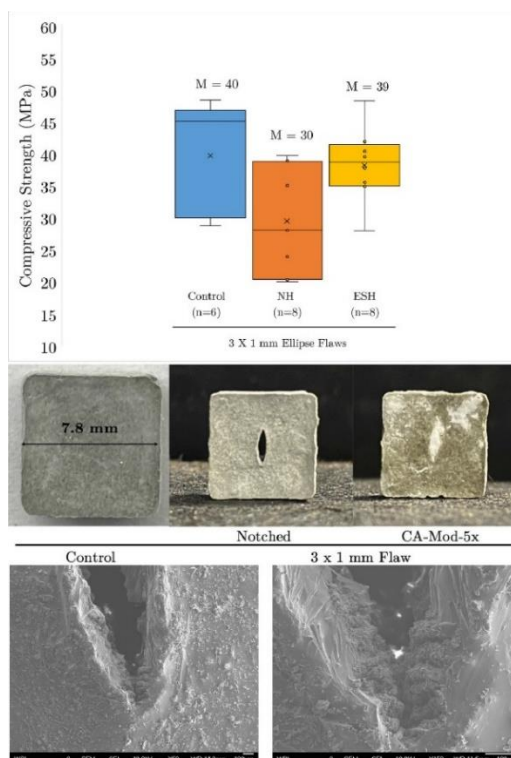


Рис. 9 Результаты испытаний на прочность при сжатии бетонных образцов, пропитанных СА-Mod-5х

Думаю, это интересное решение эффективно при ремонте и реконструкции бетонных и ж/б конструкций. Результаты физического анализа с использованием метода МІСР (микробиологически индуцированное осаждение кальцита) подтверждают эффективное скрепление ремонтного материала с цементной матрицей, а также повышение водонепроницаемости восстановленных образцов.

Таблица 2 - Сравнение характеристик обычного и самовосстанавливающегося бетона

Характеристика	Обычный бетон	Самовосстанавливающийся бетон
Образование трещин	+	временно
Прочность при сжатии	B15	B30
Срок службы	До 100 лет	>200 лет
Стоимость	3,800 руб	8,330 руб
Поглощение CO ₂	5-10% собственного веса в течение срока службы	20-30% собственного веса в течение срока службы
Регенерация трещин	-	+

По утверждению ученых, новая технология самовосстановления бетона позволяет увеличить срок службы конструкции с текущих 20 лет до 80 (табл.2).

Таким образом, из приведенного обзора можно заключить следующее:

1. Строительная отрасль является одним из источников выбросов парниковых газов, с 37% глобальных выбросов, что эквивалентно примерно 10 гигатоннам CO₂ в год. Производство бетона, в частности, составляет более 8% этих выбросов. Учитывая растущий спрос на изготовление бетона, целесообразно разрабатывать более экологически чистые технологии его производства.

2. Разработаны рецепты неорганического вяжущего, которые поглощают CO₂ в два раза быстрее, с добавками диоксида титана, для повышения эффективности поглощения углекислого газа.

3. Внедрение известковой пыли в состав бетона позволяет значительно улучшить его физико-механические свойства за счет процесса карбонизации. Это решение не только повышает экологичность технологии производства бетона, но и способствует более эффективному использованию вторичных материалов, что имеет важное значение для устойчивого развития строительной отрасли.

4. Использование синтезированных ферментов аналогичных человеческой крови обеспечило восстановление прочности бетонных образцов до 97,5% всего за 24 часа, в то время как традиционные методы требуют до 28 дней для достижения аналогичных показателей. Кроме того, процесс оказался безопасным и без запаха, что делает его оптимальным для применения в гражданской инфраструктуре.

Исследование подчеркивает актуальность и необходимость разработки устойчивых и экологически чистых строительных материалов для снижения негативного воздействия строительной отрасли на климат.

Инновационные подходы, такие как использование углеродоотрицательных бетонов, самовосстанавливающихся систем и переработка техногенных отходов, открывают новые горизонты для создания более устойчивого и эффективного строительства. Эти технологии не только снижают углеродный след, но и могут улучшить эксплуатационные характеристики строительных материалов, способствуя переходу к более "зеленой" экономике.

Список использованных источников

1. Организация Объединенных Наций. ООН: уровень выбросов в строительном секторе продолжает расти // Организация Объединенных Наций: сайт [Электронный ресурс] – URL: <https://news.un.org/ru/story/2024/03/1450167> (дата обращения: 02.02.2025).
2. Крутилова М.О. Направления совершенствования экономических механизмов минимизации выбросов парниковых газов в течение жизненного цикла здания// Экономика строительства и природопользования – 2018 – №1(66) – С. 63-71.
3. Марьина Т. Парниковый эффект// Агроснабфорум – 2017 – №2(150) – С.42-44.
4. Хасанова Э.Р., Мухина А.В., Стрелец К.И. Количественная оценка выбросов парниковых газов при применении сборных элементов в строительстве// Неделя науки ИСИ Сборник материалов Всероссийской конференции. Том Часть 2. 2022 С. 252-254.
5. Щербань, А. В. Парниковый эффект и его воздействие на окружающую среду// Экономика и экология территориальных образований. — 2021. — Т. 5, № 2. — С. 59-65.
6. Chatham House. Внесение конкретных изменений: инновации в низкоуглеродистом цементе и бетоне// Chatham House: сайт [Электронный ресурс] – URL: <https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete> (дата обращения: 02.02.2025).

7. К. Моро, В. Франсиосо, М. Велай-Лизанкос. Изменение улавливания CO₂ и структуры пор затвердевшего цементного раствора с добавлением нано-TiO₂: влияние соотношения воды и цемента и возраста воздействия CO₂//Строительство и строительные материалы – 2021 – Т.275 – Ст.122131.
8. Р.М. Эндрю. Глобальные выбросы CO₂ при производстве цемента, 1928-2017// Научные данные о системе Земли – 2018 – Т.10 – С.2213-2239.
9. Чж. Ли, С. Ши. На пути к устойчивому промышленному применению углеродно-отрицательного бетона: синергетический улавливание углерода с помощью промывочной воды из-под бетона и биоугля // Материалы Письма – 2023 – Т.342 – Ст.134368.
10. Дж. Макфарлейн, Т. Ванорио, П. Дж. Монтейро. Многомасштабное изображение, измерения прочности и проницаемости: понимание долговечности римского морского бетона // Строительство и строительные материалы – 2021 – Т.272 – Ст.121812.
11. У. Мартинес-Молина, У. Л. Чавес-Гарсия, Т. Перес-Лопес, Э. М. Алонсо-Гусман, М. Ареола-Санчез, М. А Наваррете-Серас, Х. А Боррего-Перес, А. Санчес-Кальвильо, Х. А. Гусман-Торрес, Х. Т. Перес-Кирос. Влияние добавления отходов сельского хозяйства и промышленности в качестве частичной замены портландцемента на карбонизацию растворов// Материалы – 2021 – Т.14 – №23 – Ст.7276.
12. Куляев П.В., Бровкин А.В., Цыбина Р.З., Гавриленко А.В. Влияние карбоната натрия на процесс твердения портландцементного композита// Вестник Тверского государственного технического университета Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии» – 2020 – №4(8) – С.98-103.
13. Ман-Ши Лоу. Анализ материальных потоков бетона в Соединенных Штатах// DSpace@MIT – 2005.
14. К. Симпкинс. Города будущего могут быть построены из известняка, выращенного из водорослей [Электронный ресурс] // Колорадский университет в Боулдере: сайт. –

URL: <https://www.colorado.edu/today/2022/06/23/cities-future-may-be-built-algae-grown-limestone> (дата обращения 13.02.2025)

15. Любомирский Н.В., Федоркин С.И., Бахтин А.С., Бахтина Т.А. Интенсивные способы производства карбонатных строительных материалов на основе вторичного сырья из извести // Материалы – 2020 – Т.13 – №10 – Ст.3477.
16. Ким Ю.; Ли К. Механические свойства нецементных растворов, изготовленных в условиях сверхкритической карбонизации без щелочных активаторов и состоящих из летучей золы и плавленного шлака// Материалы сегодня: производство – 2016 – Т.3 – №2 – С. 381–390.
17. Любомирский Н.В., Федоркин С.И., Бахтин А.С., Бахтина Т.А. Структурирование композитных систем на основе затвердевания извести путем карбонизации и вторичного известнякового сырья // Малайзийский журнал строительных исследований – 2017 – Т.23 – №3 – С.15–26.
18. Т.П. Хиллс, Ф. Гордон, Н.Х. Флорин, П.С. Феннелл. Статистический анализ скорости карбонизации бетона // Исследование цемента и бетонных конструкций – 2015 – Т.72 – С.98–107.
19. Л. Пу, К. Унлуэр. Исследование глубины карбонизации и ее влияния на характеристики и микроструктуру цемента MgO и смесей на его основе// Строительство и строительные материалы– 2016 – Т.120 – С. 349–363.
20. З. Гуле, Р.И.Л. Гатри, Ю. Шао. Высокопрочное связующее из стального шлака КОВМ, активированное карбонизацией// Строительство и строительные материалы – 2015 – Т.99 – С.175–183.
21. Х. Хуан, Т. Ван, Б. Колош, Дж. Андресен, С. Гарсия, М. Фанг, М.М. Марото-Вале. Оценка жизненного цикла новых бетонных блоков, отвержденных карбонизацией CO₂: сравнительный анализ потенциала сокращения выбросов CO₂ и оптимизация воздействия на окружающую среду// Журнал о более чистом производстве – 2019 – Т.241 – Ст.118359.
22. З. Гуле, Р.И.Л. Гатри, Ю. Шао. Производство карбонатных заполнителей с использованием стального шлака и углекислого газа для

углеродно-отрицательного бетона// Журнал утилизации CO₂ – 2017 – Т.18, – С.125–138.

23. П.С. Умбер, Дж.П. Кастро-Гомеш, Х. Савастано. Связующее на основе стального шлака, отверждённого CO₂, без клинкера: оптимальные условия и потенциальное применение// Строительство и строительные материалы – 2019 – Т.210 – С. 413–421.

24. Дж. А. Розевиц, Шуай Ван, С. Ф. Скарлата, Н. Рахбар. Ферментативный самовосстанавливающийся цементирующий материал// Применяемые материалы Сегодня – 2021 – Т.23 – Ст.101035.

Muruzina E.V., PhD (technical sciences), associate professor, Naberezhnochelninsky institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, sds-m7lab@mail.ru

Myasnikova A.A., student, Naberezhnochelninsky institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University,

Miftakhova N.F., student, Naberezhnochelninsky Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University,

THE INFLUENCE OF CARBON DIOXIDE ON THE FORMATION OF NEW STRUCTURES OF INORGANIC BINDING BUILDING MATERIALS

Annotation. This article analyses innovative materials, such as carbon-negative concrete and self-healing concrete, which are able to absorb CO₂ and improve the performance of structures. Carbonisation methods with the addition of lime dust are discussed, which improve the physical and mechanical properties of concrete and the efficiency of recycled materials. The necessity of transition of the construction industry to more sustainable technologies is emphasised, which will help to reduce the negative impact on the climate and open new horizons for green construction.

Keywords: concrete, cement, self-healing concrete, carbon-negative concrete, biochar, lime dust, carbon dioxide, green construction.