

Научная статья

УДК 69.10.4.7

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-249-256>

CC BY 4.0

Исследование влияния CO₂ на формирование наноразмерной структуры и физико-механические свойства бетона

Альберт Айратович Зялятдинов , Ренат Уахитович Каменов* , Денис Сергеевич Реченко 

Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: renatkamenov@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях глобальной борьбы с изменением климата актуальным является снижение выбросов CO₂ и его утилизация. Одним из перспективных направлений является использование CO₂ в строительстве, в частности, в производстве бетона. Настоящая статья исследует влияние диоксида углерода на формирование наноразмерной структуры и физико-механические свойства бетонных смесей. **Методы и материалы.** Для исследований была разработана специальная установка для смешивания цемента, песка, воды и CO₂ под давлением. Полученные образцы бетона подвергались испытаниям на прочность при сжатии и изгибе с использованием автоматического двухдиапазонного испытательного пресса MATEST E161-03N. Также проведен анализ микроструктуры образцов с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). **Обсуждение.** Результаты экспериментов показали, что введение CO₂ в бетонную смесь способствует формированию наноразмерной структуры, что улучшает её прочностные характеристики до определенного давления. При дальнейшем увеличении давления наблюдается ухудшение этих характеристик. Дополнительное время перемешивания и увеличение объема воды также влияют на прочность бетона и его микроструктуру. **Заключение.** Использование CO₂ в производстве бетона может значительно снизить углеродный след строительных материалов и улучшить их физико-механические свойства за счет формирования наноразмерной структуры. Дальнейшие исследования и оптимизация параметров смешивания необходимы для создания более прочных и стабильных бетонных смесей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наноразмерная структура, утилизация диоксида углерода, прочность бетона, карбонизация, диоксид углерода, экология.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Зялятдинов А.А., Каменов Р.У., Реченко Д.С. Исследование влияния CO₂ на формирование наноразмерной структуры и физико-механические свойства бетона // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т.16, № 3. С. 249–256. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-249-256>. – EDN: DZJPZF.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня одним из мировых трендов, направленных на повышение уровня жизни и сохранение планеты, является борьба с изменением климата и его последствиями, что также обусловлено большим вызовом стратегии научно-технологического развития РФ (Указ Президента РФ от 01.12.2016 № 642), связанным с истощением природных ресурсов и ухудшением экологии [1]. Это напрямую связано с углеродной нейтральностью производственной деятельности и компенсацией выбросов

предприятий за счет углеродно-отрицательных проектов и технологий. Выбросы предприятия разделяют на три категории: прямые выбросы при производстве; выбросы, полученные из-за потребления энергии (угольная станция, АЭС, ГЭС и т.д.), и выбросы, полученные в течение жизненного цикла товаров (закупка сырья, доставка, хранение, использование, утилизация и т.д.). Две последних категории относятся к косвенным выбросам и требуют серьезной системной проработки учета углеродных единиц. Стоит отметить, что первая категория, к которой относят парниковые газы, самая весомая и компа-

© Зялятдинов А.А., Каменов Р.У., Реченко Д.С., 2024

нии-производители нацелены сегодня на уменьшение именно данной категории. При этом 77,9% в структуре выбросов составляет энергетика, 11,8% – промышленность (производство), 5,7% – сельское хозяйство и 4,6% – отходы, а в структуре выбрасываемых газов диоксид углерода (CO₂) составляет 79,2%, метан (CH₄) – 14,5%, оксид диазота (N₂O) – 4,2%, гидрофторуглероды (ГФУ) – 1,9%, перфторуглероды (ПФУ) и гексафторид серы (SF₆) – по 0,1% [2]. Как видно, диоксид углерода CO₂ или углекислота в общем объеме выбросов занимает большую часть и это без учета второстепенных категорий, то есть сбор, хранение и утилизация углекислоты является сегодня актуальной задачей.

Современные технологии позволяют эффективно улавливать выбросы и удерживать в любом состоянии, но главной задачей является их утилизация и применение в различных отраслях, например, в изготовлении средств тушения пожара, хладагента, кальцинированной соды, солей и т.д., однако это очень незначительный объем переработки углекислоты. Поэтому актуальной задачей является разработка технологии утилизации диоксида углерода.

Бетон как один из самых распространенных материалов в строительной индустрии обладает прочностью, долговечностью и адаптируемостью, что делает его неотъемлемой частью современного строительства [3–13]. В данном отчете учтены как традиционные методы изготовления бетона, так и современные технологии, включая добавки и примеси, способствующие улучшению его свойств и улучшению требований, которым бетон должен соответствовать.

Основные требования при изготовлении бетона:

1. Главной целью процесса изготовления бетона является создание материала с оптимальной прочностью и долговечностью, способного выдерживать нагрузки в условиях эксплуатации.

2. Процесс должен соответствовать строгим стандартам и нормативам, установленным в строительной индустрии, чтобы обеспечить безопасность, надежность и качество конструкций.

3. Дозирование каждого компонента должно быть точным и соответствовать установленным пропорциям, чтобы обеспечить оптимальные физические и химические свойства бетонной смеси.

4. Бетон должен находиться под определенными условиями температуры и влажности во время схватывания и затвердевания, чтобы обеспечить оптимальные свойства материала.

Соблюдение указанных целей и требований в процессе изготовления бетона является ключевым аспектом для создания качественного и надежного строительного материала, способного удовлетворить потребности разнообразных проектов и обеспечить их долговечность.

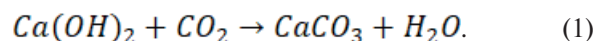
Для достижения вышеуказанных требований процесс изготовления бетона начинается с тщательно подобранного и дозированного сырья и материалов. Качество и характеристики каждого компонента сыграют решающую роль в формировании конечных свойств бетонной смеси.

По ГОСТ 27006-86 «Бетоны» подобран состав компонентов бетона, включающий цемент, песок, щебень и воду в соотношении 1:1,9:3,7:0,5 соответственно. Данный стандарт допускает на основе визуального контроля вносить изменения в количестве от дозированной воды, поэтому для дальнейшей работы экспериментальным методом было определено следующее соотношение компонентов бетонной смеси 1:1,9:3,7:1.

Производство цемента на основе применения CO₂ в качестве одного из компонентов рецептуры является новой и перспективной технологией, пока еще не внедренной в промышленном масштабе, но имеющей большой потенциал. Углекислый газ улавливается сразу после его выброса, сжимается в жидкость и затем транспортируется по трубопроводу в хранилище прямо на месте производства бетона [14, 15].

Упрочнение бетона при добавлении CO₂ связано с процессом, называемым карбонизацией. Этот процесс представляет собой химическую реакцию между диоксидом углерода (CO₂) и гидратами цемента, образующимися при затвердевании бетона. Карбонизация приводит к изменению наноразмерной структуры бетона, что в конечном итоге повышает его прочность и долговечность.

Когда CO₂ проникает в бетон, он реагирует с гидратом оксида кальция (Ca(OH)₂), который является побочным продуктом гидратации цемента. Результатом этой реакции является образование карбоната кальция (CaCO₃):



Карбонат кальция является более плотным и менее растворимым, чем гидрат оксида кальция, что способствует упрочнению структуры бетона.

На наноуровне карбонизация приводит к изменениям в пористой структуре бетона. Гидрат оксида кальция занимает больше объема и имеет более рыхлую структуру, в то время как карбонат кальция обладает более плотной и компактной кристаллической решеткой. При карбонизации происходит заполнение пор и микротрещин в бетоне, что уменьшает его пористость и повышает плотность.

Этот процесс также оказывает влияние на структуру цементного камня. Вследствие образования карбоната кальция на наноуровне уменьшается объем пор, что ограничивает доступ воды и других потенциально вредных агентов внутрь бетона. Это умень-

шает скорость деградации материала и повышает его долговечность.

Кроме того, образование карбоната кальция может способствовать созданию новых микроструктурных связей между частицами цемента. Эти связи улучшают общую механическую целостность бетона, делая его более устойчивым к механическим нагрузкам и износу.

На сегодняшний день несколько стран в мире активно развивают эту технологию. Так, например, канадская компания *CarbonCure Technologies* разработала технологию, позволяющую выпускать бетон с CO_2 , который вводится контролируемыми дозами в смеситель, снабжающий камнеформовочную машину. Когда CO_2 добавляется к бетону во время смешивания, он взаимодействует с водой, образуя ионы карбоната, который быстро взаимодействует с ионами кальция, высвобождаемыми из цемента, что приводит к образованию минералов карбоната кальция (известняка), формируя наноструктуру. Конверсия CO_2 в твердые минералы карбоната кальция позволяет ему связываться в бетоне и никогда не высвободиться обратно в атмосферу [16–21], при этом наноразмерная структура дает повышение прочности бетона. Подобную технологию предложили американские инженеры из *Solidia Technologies*, но для быстросхватывающихся бетонов [24].

Команда американских исследователей из Лос-Анджелеса работает над уникальным решением, заключающимся в создании замкнутого процесса, включающего захват углерода на трубах электростанций и его использование при создании нового строительного материала – углекислбетона для 3D-печати [22, 23]. Сотрудники американского *Purdue University* разработали технологию, позволяющую бетонной смеси значительно сильнее поглощать CO_2 за счет диоксида титана, который при смешивании с раствором бетона уменьшает размер молекул гидроксида кальция, что увеличивает объем поглощаемого углекислого газа.

При исследованиях ученых из японского университета разработан процесс получения бетона, который воздействует на окружающую среду сразу несколькими способами. Новый материал производится из старых бетонных обломков, которые часто выбрасываются, что продлевает срок службы старых материалов, а процесс протекает при более низких температурах, при этом CO_2 , с которым он смешивается, может быть получен как из промышленных выхлопов, так и прямо из воздуха [25–27].

По результатам исследований различных ученых можно сделать вывод о том, что улавливание и использование CO_2 в производстве бетона имеет большой потенциал для сокращения выбросов парниковых газов и создания экологически чистых строи-

тельных материалов. Новые технологии позволяют не только снизить негативное воздействие на окружающую среду, но и повысить качество и прочность бетона. По некоторым данным, подобные технологии позволяют уменьшить выбросы CO_2 до 30% и повысить прочность примерно на 10–19% по сравнению с классической технологией. Повышение прочности на сжатие также позволяет производителям оптимизировать их смеси уменьшением количества цемента при сохранении физико-механических свойств. В среднем, производители готового смешанного бетона могут уменьшить количество цемента на 5–8%, но главной проблемой сегодня является создание установки для подготовки смеси с CO_2 .

Влияние применения CO_2 в производстве бетона, в частности, на изменение свойств смеси, требует исследований, которые возможны только при создании специальной установки для смешивания цемента, песка, воды и углекислого газа в жидком состоянии. На сегодняшний день не существует подобных установок, поэтому задачами данной работы являются проектирование и изготовление установки для получения бетонноперемешивающей смеси, получение бетонной смеси различных рецептур и исследование их физико-механических свойств.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В сегменте бетоноперемешивающих устройств не существует оборудования, способного перемешивать бетонную смесь под давлением, поэтому на основе выбранного метода производства разработана конструкция бетономешалки по схеме (рис. 1).

Бетономешалка для получения смеси под давлением представляет собой емкость из стали в виде цилиндра объемом 25 л, которая рассчитана для работы под давлением до 70 атм. Внутри установлены двухуровневые лопасти для перемешивания бетонной смеси, которые соединены с валом двигателя. Емкость установлена на поворотном основании, что при эксплуатации позволит наклонять данную конструкцию вместе с двигателем для извлечения смеси. Снаружи емкости имеются отверстия с резьбой для датчиков, кранов и заглушки.

В результате проектирования и разработки изготовлено бетоноперемешивающее устройство, работающее под давлением (рис. 2). Установка способна проводить замесы бетона в необходимом объеме, который составляет 30 кг сухой смеси.

Для проведения исследований использовались две основные формы для изготовления контрольных образцов бетона:

1. Квадратные формы со сторонами 100×100×100 мм: Эти формы предназначены для определения прочности бетона при сжатии. Данный размер

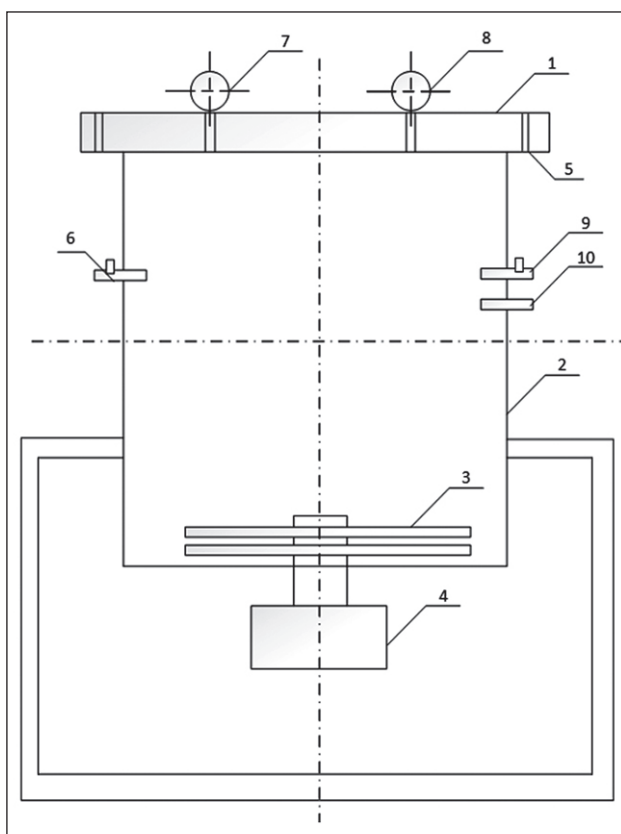


Рис. 1. Конструкция бетономешалки для получения смеси под давлением: 1 – крышка, прикрепляющаяся к емкости с помощью штифтов; 2 – емкость в форме цилиндра; 3 – лопасти (двухуровневые); 4 – двигатель; 5 – отверстия под штифты для соединения крышки и емкости через манжету; 6 – кран, соединяющий с вакуум-насосом; 7 – вакуум-насос; 8 – манометр; 9 – кран для подачи воды, насыщенной CO_2 ; 10 – заглушка

позволяет получать образцы, соответствующие стандартам испытаний и обеспечивающие однородность результатов.

2. Прямоугольные формы со сторонами $70 \times 70 \times 280$ мм. Эти формы используются для определения прочности бетона при изгибе. Их размер обеспечивает правильное распределение напряжений во время испытаний и позволяет точно определить прочностные характеристики материала.

Все формы для образцов были подобраны в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 [28], что гарантирует точность и сопоставимость полученных результатов.

Процесс изготовления образцов

Процесс изготовления контрольных образцов бетона включал несколько этапов, которые обеспечи-



Рис. 2. Бетономешалка для получения смеси под давлением

вали точность дозирования компонентов, качественное смешивание и правильное введение диоксида углерода. Эти этапы описаны ниже:

1. Подготовка и проверка оборудования

Перед началом работы все оборудование, включая бетономешалку, формы для образцов и инструменты для измерения компонентов, было тщательно проверено на предмет чистоты и работоспособности. Это позволяет избежать загрязнения смеси и обеспечивает точность измерений.

2. Расчет количества компонентов

Количество цемента, песка, воды и диоксида углерода рассчитывалось в соответствии с заранее установленными пропорциями. Это гарантирует, что все образцы будут изготовлены из одной и той же смеси, что важно для сопоставимости результатов испытаний.

3. Загрузка компонентов в бетономешалку

В бетономешалку загружались предварительно взвешенные порции цемента и песка. Эти компоненты перемешивались в течение определенного времени для достижения однородности сухой смеси.

4. Добавление расчетного количества воды

После перемешивания сухих компонентов в бетономешалку добавлялось расчетное количество воды.

Вода добавлялась постепенно, чтобы избежать образования комков и обеспечить равномерное распределение жидкости по всей смеси.

5. Смешивание

Смесь цемента, песка и воды перемешивалась в бетономешалке до получения однородной массы. Время смешивания строго контролировалось, чтобы гарантировать равномерное распределение всех компонентов.

6. Закачка углекислого газа

После достижения однородности смеси в бетономешалку закачивалось расчетное количество диоксида углерода. Процесс закачки проводился под давлением, что позволяло CO_2 равномерно распределяться по всей массе бетона и взаимодействовать с компонентами смеси.

7. Окончательное смешивание

После закачки диоксида углерода смесь снова перемешивалась в течение определенного времени. Это обеспечивало полное взаимодействие CO_2 с компонентами бетона и способствовало формированию наноразмерной структуры.

8. Заливка готового бетона в формы

Готовая бетонная смесь заливалась в подготовленные формы. Для этого использовались специальные инструменты, обеспечивающие равномерное заполнение форм без образования пустот и воздушных карманов.

Испытание полученных образцов проводилось на установке *MATEST E161-03N* (автоматический двухдиапазонный испытательный пресс) для измерения прочности цементного камня на сжатие и изгиб. В табл. 1 приведены результаты испытаний бетонных образцов при сжатии и изгибе.

Следует отметить, что 6 замес является стандартным, т.е. перемешивание производилось в воздушной среде. Замесы 8, 9, 10 перемешивались при разных давлениях CO_2 , в данных замесах при увеличении давления закачки газа смесь на выходе получалась сухой и было принято решение в замесах 11, 12 и 13 увеличить объем добавляемой воды на 5%. В замесах 14, 15, 16 увеличили время перемешивания, чтобы узнать, повлияет ли время перемешивания на прочностные характеристики бетона, данные замесы также перемешивались при разных давлениях CO_2 .

Результаты эксперимента приведены на рис. 3 и 4.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента показали, что давление CO_2 влияет на прочностные характеристики бетонного раствора. Увеличение давления до 10 атмосфер приводит к наибольшему улучшению прочности. Однако при давлении 20 атмосфер и выше прочностные характеристики начинают ухудшаться. Дополнительно выявлено, что увеличение объема добавляемой воды на 5% в замесах 5, 6 и 7 приводит к ухудшению прочностных характеристик. Кроме того, увеличение времени перемешивания в замесах 8, 9 и 10 также демонстрирует некоторое уменьшение прочности бетона. Эти результаты позволяют сделать вывод, что контроль давления CO_2 , объема воды и времени перемешивания являются важными факторами, которые могут влиять на прочностные свойства бетонного раствора. Дальнейшее исследование и оптимизация этих параметров могут привести к созданию более прочного и стабильного бетона.

Таблица 1

Результаты испытания бетонных образцов при сжатии и изгибе

Замес	Объем воды, л	Время, мин	Давление CO_2 , атм	Средняя прочность, кН	
				на сжатие, $\sigma_{\text{сж}}$	на изгиб, $\sigma_{\text{изг}}$
1	3,9	5	0	52,40	1,65
2	3,9	5	10	58,43	1,74
3	3,9	5	20	35,65	1,03
4	3,9	5	30	51,25	1,18
5	4,1	5	10	47,66	1,52
6	4,1	5	20	27,56	1,00
7	4,1	5	30	34,16	1,03
8	4,1	10	10	25,36	0,86
9	4,1	10	20	6,95	0,16
10	4,1	10	30	14,35	0,45

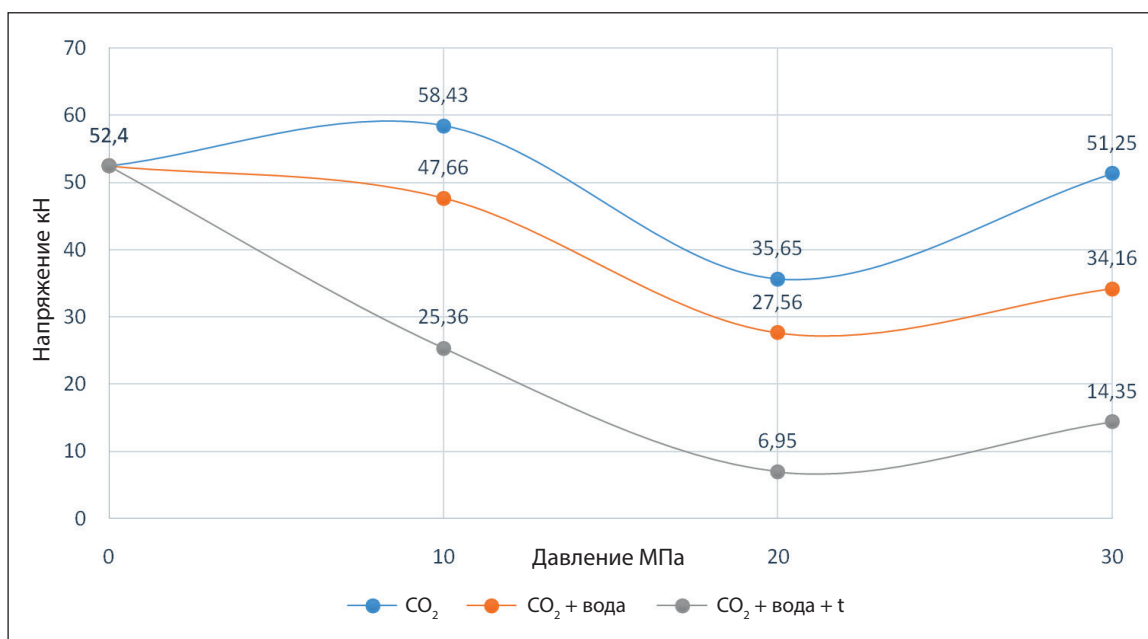


Рис. 3. Результаты испытаний образцов на сжатие

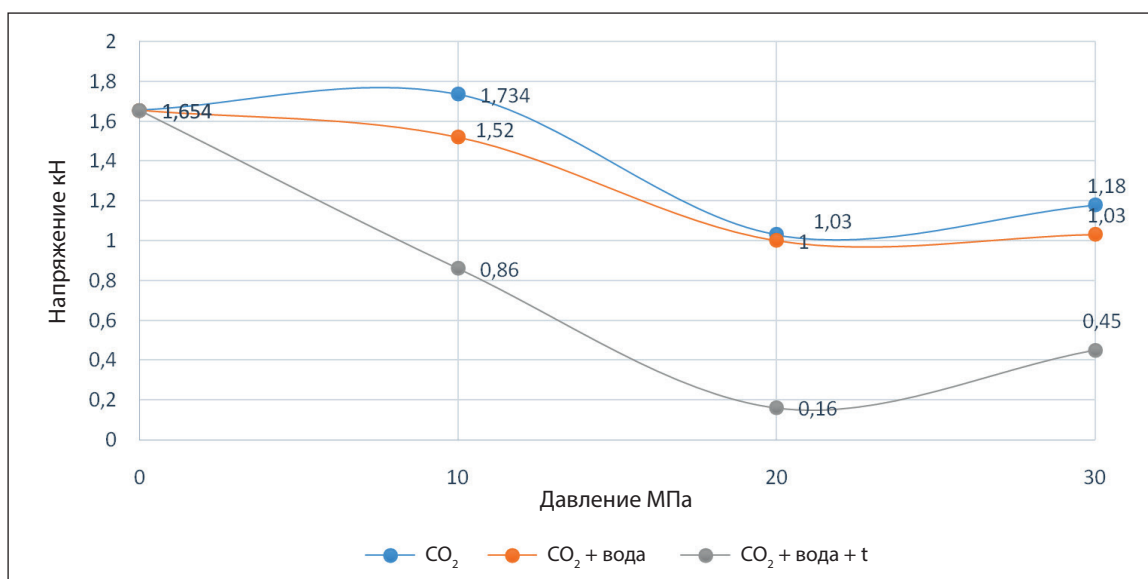


Рис. 4. Результаты испытаний образцов на изгиб

Важно отметить, что в данном исследовании прочностные характеристики оценивались только на основе результатов испытания на сжатие и изгиб. Для более полного и точного анализа следует дополнительно провести исследования на другие виды нагрузок, такие как растяжение и расслоение, а также увеличить давление, так как по рис. 3 и 4 виден рост прочностных характеристик.

В целом, результаты данного эксперимента позволяют сделать вывод о влиянии давления CO₂, объема воды и времени перемешивания на прочностные

характеристики бетонного раствора. Дальнейшие исследования и оптимизация этих факторов могут помочь разработать более эффективные и прочные композиции бетона, что позволит снизить расходы цемента на производство изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общая цель международного сообщества по сокращению выбросов парниковых газов также способствует развитию технологий улавливания и хране-

ния CO₂. Совместные действия множества стран направлены на сокращение выбросов CO₂ к 2050 году, что делает такие инновационные подходы в производстве бетона еще более актуальными. Улавливание и хранение CO₂ в процессе производства бетона представляют собой перспективную и важную технологию, способную снизить негативное воздействие этого парникового газа на окружающую среду и достичь более устойчивого и экобезопасного строительства.

В рамках разработки и изготовления бетоноемшалки была разработана конструкция, состоящая из емкости в форме цилиндра, лопастей для перемешивания бетонной смеси, двигателя и дополнительных деталей. Все компоненты были включены в чертежи, которые служили основой для изготовления оборудования.

Разработка и изготовление бетона является сложным и ответственным процессом, который требует соблюдения строгих требований, тщательного контроля и использования правильного оборудования. Оптимизация процесса изготовления бетона в соответствии с заданными требованиями и расчетами компонентов позволяет получить качественный и надежный продукт.

В ходе испытаний бетонных образцов проведено измерение и оценка прочности 110 образцов при сжатии и изгибе. Результаты показали, что давление CO₂ и объем воды имеют влияние на формирование

наноразмерной структуры и прочностные характеристики бетонного раствора. Увеличение давления CO₂ до 10 атмосфер приводит к улучшению прочности, но при давлении 20 атмосфер прочность начинает ухудшаться. При давлении 30 атмосфер прочность заметно увеличивается относительно замеса, проводимого при давлении 20 атмосфер. Увеличение объема добавляемой воды на 5% не показали заметного роста прочности. Увеличение времени перемешивания также не показало существенного улучшения прочности.

Карбонизация бетона – эффективная и современная технология, сочетающая в себе текущие нужды и требования бетонной промышленности, позволяющая получать более качественные изделия, экономить цемент и энергетических ресурсов и в то же время совмещающая в себе утилизацию отходов от сжигания твердого топлива, принимающая прямое участие в решении экологических проблем планеты.

Использование CO₂ в производстве бетона представляет собой перспективную технологию, способную не только снизить углеродный след строительных материалов, но и улучшить их физико-механические свойства за счет формирования наноразмерной структуры. Дальнейшие исследования и оптимизация параметров смешивания позволят создать более прочные и стабильные бетонные смеси, что важно для устойчивого развития строительной индустрии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кондратьев В.Б. Мировая цементная промышленность / В.Б. Кондратьев // Отрасли и сектора глобальной экономики: особенности и тенденции развития / Фонд исторической перспективы Центр исследований и аналитики. Москва : Издательство «Международные отношения», 2015. С. 185–202.
2. Клайн Д. Проектирование цементного завода будущего. Часть II / Д. Клайн // Цемент и его применение. 2019. № 1. С. 48–53.
3. Monteiro, P.J.M. Towards sustainable concrete. P.J.M. Monteiro, S.A. Miller, A. Horvath. Nature Mater. 2017;16 (7):698-699.
4. Gartner E.M. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. E.M. Gartner, D.E. Macphee. Cement and Concrete Research. 2011; 41(7): 736-749.
5. Cement technology roadmap [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>. Date of access: 21.01.2024.
6. Эванс Л. Экологический рейтинг цемента / Л. Эванс, М. Муттер // Цемент и его применение. 2019. № 4. С. 24–27.
7. Meyer V. Properties of Solidia Cement and Concrete. V. Meyer, S. Sahu, A. Dunster. Proceedings of the 1st International Conference on Innovation in Lowcarbon Cement & Concrete Technology London, UK; 2019. 24-26.
8. 1st International Conference on Innovation in Low Carbon Cement and Concrete Technology. R. Mangabhai [et al]; 2019. 103
9. Boden T. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions (1751 - 2014) (V. 2017). T. Boden, R. Andres, G. Marland. 2017.

10. Cement and carbon emissions. L. Barcelo [et al.]. Mater Struct. 2014; 47(6); 1055-1065.
11. Andrew R.M. Global CO₂ emissions from cement production. R.M. Andrew. Earth Syst. Sci. Data. 2018;10(1):195-217.
12. Leber I. Some effects of carbon dioxide on mortars and concrete. I. Leber, F.A. Blakey. Mater. construcc. 2017;7 (079): 39.
13. Шмитько Е.И. Химия цемента и вяжущих веществ / Е.И. Шмитько, А.В. Крылов, В.В. Шаталов. Воронеж: Воронеж.гос.арх.-строит.ун-т, 2005. 164 с.
14. Scrivener K.L. Options for the future of cement. K.L. Scrivener. 2014; (88)7:11-21.
15. Невилль А.М. Свойства бетона / А.М. Невилль // М.: Стройиздат, 1972. С. 269-271.
16. Katz A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. A. Katz. Cement and Concrete Research. 2003;33(5):703-711.
17. Kosmatka S.H. Design and control of concrete mixtures. S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese. – Skokie, Ill: Portland Cement Association 2002. 358.
18. Neville A.M. Concrete technology. A.M. Neville, J.J. Brooks. Harlow: Prentice Hall 2010; 442.
19. Day K.W. Concrete mix design, quality control and specification. K.W. Day. London: E & FN Spon; 1999. 391.
20. Woodson R.D. Concrete structures: protection, repair and rehabilitation. Concrete structures. R.D. Woodson. Amsterdam; Boston: Butterworth-Heinemann; 2009. 255
21. Handbook of concrete engineering. ред. М. Fintel. New York: Van Nostrand Reinhold; 1985. 892
22. Mehta P.K. Concrete: microstructure, properties, and materials. Concrete. P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro. – New York: McGraw-Hill Education; 2014. 675.
23. Palley R. Concrete: a seven-thousand-year history. Concrete. R. Palley. New York: The Quantuck Lane Press; 2010. 232.
24. Courland R. Concrete planet: the strange and fascinating story of the world's most common man-made material. Concrete planet. R. Courland. Amherst NY: Prometheus Books; 2011. 396.
25. The new concrete: visual poetry in the 21st century. The new concrete. ред. V. Bean C. McCabe, K. Goldsmith. London: Hayward Publ; 2015. 240.
26. Forty A. Concrete and culture: a material history. Concrete and culture. A. Forty. – London: Reaktion 2012.
27. Collins P. Concrete: the vision of a new architecture. Concrete. P. Collins. – Montréal: McGill-Queen's University Press; 2004. 64.
28. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зялятдинов Альберт Айратович – кандидат технических наук, начальник центра научно-технических исследований, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия, zalyatdinovaa@agni-rt.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8466-9013>

Каменов Ренат Уахитович – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия, renatkamenov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9181-5704>

Реченко Денис Сергеевич – доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия, dsrechenko@agni-rt.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6776-6452>

ВКЛАД АВТОРОВ

Зялятдинов А.А. – научное руководство; итоговые выводы.

Каменов Р.У. – проведение экспериментальной части.

Реченко Д.С. – концепция исследования; написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.05.2024; одобрена после рецензирования 03.06.2024; принята к публикации 07.06.2024.