

На правах рукописи



СУЛЕЙМАНОВ КАРИМ АБДУЛЛАЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОБЕТОНА
В ДОАВТОКЛАВНЫЙ ПЕРИОД**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Лесовик Валерий Станиславович
Официальные оппоненты	Кудяков Александр Иванович , доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры «Строительные материалы и технологии» Павленко Наталья Викторовна кандидат технических наук, доцент ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», старший научный сотрудник
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Защита состоится «20» декабря 2024 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214 ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/Suleymanov

Автореферат разослан «24» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В рамках реализуемого государством курса на всестороннее ресурсосбережение, стеновые материалы на основе автоклавного ячеистого бетона обретают особое значение. Актуальным является вопрос повышения прочности конструкционно-теплоизоляционного ячеистого бетона при сохранении его плотности. Это возможно путем создания высокопористых структур, что является эффективным инструментом снижения энерго- и материалоемкости получения ячеистых бетонов. Помимо этого, высокие экологические и теплофизические свойства данного вида изделий обеспечивают благоприятный микроклимат помещений и снижение теплопотерь на всем жизненном цикле эксплуатации здания.

В этой связи повышение качества ячеистых бетонов за счет технологических приемов, нацеленных на создание высокоорганизованной структуры, характеризующейся отсутствием пор воздухововлечения и сегментных пузырей, как дефектов структуры, является весьма актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнена в рамках Программы «Приоритет-2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова Пр-10/22 с использованием оборудования центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время в области строительного материаловедения в Российской Федерации деятельность ряда научных школ связана с разработкой ячеистых бетонов, изучением теоретических представлений о процессах структурообразования пористых композитов с требуемыми физико-механическими характеристиками и показателями долговечности. Исследователями определено, что оптимальная макроструктура характеризуется высокой степенью поризации материала, равномерным распределением пор в бетоне, рациональным распределением ячеек по размерам и малой дефектностью межпоровых перегородок. При этом остаются открытыми вопросы создания ячеистых бетонов бездефектной высокоорганизованной структуры с учетом термических процессов ее формирования при отсутствии пор воздухововлечения и сегментных пузырей в газобетонной смеси.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение газобетона высокоорганизованной структуры с повышенными физико-механическими характеристиками за счет оптимизации порообразования и термических процессов в газобетонной смеси в доавтоклавный период.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучение механизма формирования пор воздухововлечения и сегментных пузырей в ячеистобетонной смеси и оценка их влияния на формирование структуры газобетона в доавтоклавный период;
- выявление вклада экзотермических процессов в формировании пористой структуры при твердении в доавтоклавный период;
- разработка технологических приемов получения газобетонного массива высокоорганизованной структуры при формировании пористости и интенсивном тепловыделении;
- оценка влияния технологического решения на свойства газобетона;
- подготовка нормативной документации для реализации теоретических и

экспериментальных исследований; апробация результатов исследований в производственных условиях и оценка их технико-экономической эффективности.

Научная новизна работы. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение газобетона высокоорганизованной структуры за счет: регулирования расхода извести, физико-механической обработки смеси виброгребнем после ее заливки, создания термосных условий в камере предварительного твердения. Изменение расхода извести позволяет регулировать термический потенциал газобетонной смеси из условия $1 \text{ кг/м}^3 \text{ CaO}$ на 1°C . Воздействие на газобетонную смесь виброгребня путем перемещения формы под ним со скоростью 12 м/мин обеспечивает дробление пор воздухововлечения до размера менее 2 мм , сопоставимого с порами газовыделения. Снижение градиента температур при создании термосных условий твердения до $12\text{--}15^\circ\text{C}$ приводит к достижению температуры поверхности массива порядка 54°C , соответствующей значению на дне формы, что предотвращает образование сегментных пузырей. Совершенствование технологии газобетона обеспечивает повышение прочности на $50\text{--}60\%$ и снижение теплопроводности на $10\text{--}15\%$.

Установлены условия формирования дефектов структуры – пор воздухововлечения и сегментных пузырей. Показано, что поры воздухововлечения, образовавшиеся во время заливки ячеистобетонной смеси, имеют форму перевернутой капли, характеризуемой тремя радиусами кривизны и высотой. Образование сегментных пузырей происходит в области максимума скорости гидратации извести, а условием их горизонтального перемещения является градиент тангенциальных сил в направлении повышенной асимметрии данного вида дефекта структуры, что приводит к выходу газа и оседанию смеси в форме или к нарушению структуры массива из-за разрывов сплошности.

Сформулированы теоретические основы получения газобетона высокоорганизованной структуры, раскрывающие влияние термических процессов (как интегрального тепловыделения, так и градиента температур) на снижение доли сегментных пузырей как дефектов структуры, формируемых в доавтоклавный период. Процессы, протекающие в твердеющей газобетонной смеси, ранжированы по значимости вклада в создание температурного уровня: гидратация цемента → газовыделение за счет дисперсного алюминия → гидратация оксида кальция.

Теоретическая и практическая значимость работы. Развита теоретическая представления о природе и видах дефектов газобетона, а также о формировании высокоорганизованной структуры газобетона, что позволило разработать научно обоснованное технологическое решение совершенствования процесса производства газобетона в доавтоклавный период – от стадии заливки смеси в формы до резки массива.

Предложено совершенствование технологической линии по производству автоклавного газобетона, заключающееся в регулировании содержания извести, введении физико-механической обработки смеси виброгребнем на стадии после ее заливки и применении термосного метода в камере предварительного твердения.

Обоснованное технологическое решение обеспечивает получение газобетона с высокоорганизованной макроструктурой по эксплуатационным свойствам превосходящего характеристики автоклавных газобетонов, произведенных по традиционной технологии, с обеспечением класса прочности *B5* при марке по плотности *D500*.

Разработаны мероприятия по повышению теплотехнической однородности стен из ячеистобетонных блоков.

Методология и методы исследования. Методологической основой работы являлись результаты фундаментальных и прикладных исследований, проведенных отечественными и зарубежными учеными в области получения автоклавного газобетона. Для изучения вяжущих и смесей на их основе применен комплекс методов исследования с использованием современного высокотехнологичного оборудования, получены обоснованные и достоверные результаты. Исследования основаны на методах, включающих рентгеновскую дифрактометрию и растрово-электронную микроскопию. Стандартизированные характеристики готовых образцов ячеистых бетонов определялись согласно нормативным документам.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение газобетона с высокоорганизованной структурой за счет регулирования содержания извести, физико-механической обработки смеси и создания термосных условий;

- условия формирования дефектов структуры – пор воздухововлечения и сегментных пузырей;

- теоретические основы получения газобетона высокоорганизованной структуры, раскрывающие влияние термических процессов на снижение доли сегментных пузырей и пор воздухововлечения, как дефектов структуры, формируемых в доавтоклавный период;

- свойства автоклавного газобетона с высокоорганизованной структурой;

- принципы совершенствования технологии по производству газобетона в доавтоклавный период. Результаты апробации.

Степень достоверности результатов обеспечена: выполнением широкого комплекса экспериментальных исследований с применением различных методов и современного высокотехнологичного сертифицированного оборудования с учетом требований нормативной документации российских стандартов; производственными испытаниями и их положительными практическими результатами; соответствием полученных результатов общепринятым фактам и работам других авторов.

Апробация научно-исследовательской работы. Основные положения диссертационной работы исследований докладывались и обсуждались на: IV, VII и VIII Международных студенческих строительных форумах (Белгород, 2019, 2022, 2023); II Международном онлайн-конгрессе «Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека» (Белгород, 2019); V и VII Международных научно-практических конференциях «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 2021, 2023), I международной научно-практической конференции «Архитектура. Строи-

тельство. Информационные технологии» (Новороссийск, 2023), Национальной конференции «Актуальные вопросы техники, науки, технологии» (Брянск, 2024), IX Всероссийской научно-практической конференции «Инженерное дело на Дальнем Востоке России» (Владивосток, 2024), VII Международной научно-практической конференции «Современный автоклавный газобетон» (Москва, 2024).

Внедрение результатов исследований. Апробация полученных результатов в промышленных условиях осуществлялась на предприятиях ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону), ООО «Сибирский элемент «Рента-К» (д. Обухово, Калужская обл.), ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (г. Белгород).

Для практического использования результатов работы разработан стандарт организации СТО 02066339-068-2023 «Газобетон с высокоорганизованной структурой» и Рекомендации по производству газобетона с высокоорганизованной структурой.

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Публикации. Основные положения работы изложены в 21 публикации, в том числе: 4 статьи в российском журнале, входящем в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 1 работа в издании, индексируемом в базе данных Scopus. Получено 2 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель и Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Личный вклад состоит в непосредственном участии в получении, анализе, систематизации исходных теоретических данных на всех этапах проведения исследований, личном выполнении всех экспериментов, их подготовке и анализе полученных результатов, самостоятельном формулировании положений, вынесенных на защиту, в которых отражаются основные результаты проведенного исследования, а также выводов, составляющих научную новизну и подтверждающих теоретическую и практическую значимость работы. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, последующая обработка и анализ полученных результатов. Принято участие в апробации результатов работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Результаты изложены на 230 страницах машинописного текста, включающих 31 таблицу, 105 рисунков, список литературы из 226 источников, 11 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Производство автоклавных газобетонов – быстро развивающаяся отрасль. Технология отличается гибкостью, высокой экономической эффективностью, экологически чистая и перспективна в плане расширения номенклатуры и повышения качества продукции. Многофункциональные свойства ячеистых бетонов определили его широкое применение в строительстве. Изделия из автоклавного газобетона являются лучшим конструкционно-теплоизоляционным материалом для строительства зданий. Свойства изделий позволяют позиционировать их как материал самодостаточный для возведения однослойных стен.

Формирование пористой структуры в газобетонной смеси является наиболее ответственным технологическим процессом при изготовлении газобетонных изделий. Однако химизм и механизм газообразования, гидратации извести и цемента и их совокупная роль в процессе формирования пористой структуры все еще являются дискуссионными и требуют дальнейшего изучения. Отсутствуют данные о взаимосвязи параметров экзотермических процессов и принципов управления тепловой самообработкой в газобетонной смеси с учетом энергетического потенциала ингредиентов и других значимых для технологии факторов.

Для выявления причинно-следственных связей и закономерностей формирования дефектов в структуре газобетона, обусловленных технологическими переделами, проведен анализ существующих представлений о закономерностях процессов, протекающих при производстве автоклавного ячеистого бетона на начальном этапе твердения массива – в доавтоклавный период, механизмах формирования поровой структуры, видах дефектов газобетона, а также исследованы заводские партии автоклавного газобетона с маркой по средней плотности $D500$ различных действующих предприятий по выпуску автоклавного газобетона.

Как известно, структура ячеистых бетонов представлена ячеистыми порами и межпоровыми перегородками, сформированными гидросиликатами кальция и кремнеземом, что создает плотную твердую фазу мембраны. Пористость газобетона за счет газовыделения образуется в интервале от момента заливки ячеистобетонной смеси до 30 мин, а свойства межпоровых перегородок, фиксирующих пористость окончательно, формируется при автоклавировании. Помимо пористой структуры и первичной структуры межпоровых перегородок в газобетонной смеси в доавтоклавный период образуются дефекты структуры, являющиеся предметом исследования.

На основании проведенного анализа предложена классификация и сопоставление видов дефектов с их природой (рис. 1). Показано, что основными дефектами макропористой структуры, обусловленными технологическими операциями и формируемыми в доавтоклавный период, являются: поры воздухововлечения – как результат турбулентности смеси в процессе заливки (гидродинамическая природа дефектов); сегментные пузыри (разрывы сплошности) – как результат экзотермических процессов (термическая природа дефектов).

Минимизация технологических дефектов с целью создания высокоорганизованной структуры пористого композита и, как следствие, повышения нормируемых характеристик газобетона, возможна за счет физико-механической обработки смеси после ее заливки и

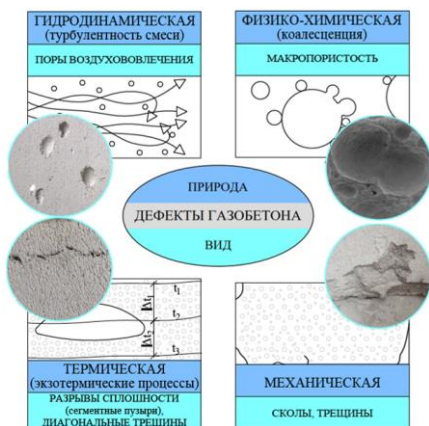


Рисунок 1 – Сопоставление природы и вида дефектов газобетона

создания термосных условий на стадии предварительного твердения, что явилось **рабочей гипотезой исследования**.

В качестве сырьевых компонентов в работе были использованы материалы, применяемые в составе сырьевой смеси большинства заводов автоклавного газобетона – известь негашеная комовая (ГОСТ 9179-2018), цемент (ГОСТ 30515-2013, ГОСТ 31108-2020), песок кварцевый (ГОСТ 8736-2014), двуводный гипс (ГОСТ 125-2018, ГОСТ 4013-2019), алюминиевый газообразователь (ГОСТ 5494-2022), вода (ГОСТ 23732-2011).



Рисунок 2 – Определение тепловыделения в модельных системах в термоизолированных ячейках

Для расширения представлений о протекающих во времени процессах гидратообразования при формировании массива до его автоклавирования и формализации этих процессов проведен анализ образующихся через 10 мин, 1, 2, 6 и 24 ч от начала твердения продуктов гидратации в модельных системах «Известь – Алюминий – Вода», «Известь – Алюминий – Цемент – Вода», «Известь – Алюминий – Цемент – Гипс – Вода» с применением компонентов, используемых на заводах автоклавного ячеистого бетона. Эксперименты в модельных системах проведены в термоизолированных ячейках с регистрацией температуры (рис. 2).

Система «Известь – Алюминий – Цемент – Гипс – Вода» представляет собой модель, характеризующую процессы гидратообразования в технологии автоклавного газобетона с введением в состав смеси двуводного или полуводного гипса. Гипс был введен в количестве, соответствующем мольному отношению $\text{CaO}:\text{CSH}_2$, равному 5:1,5.

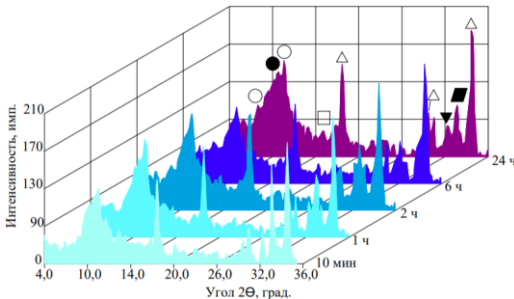


Рисунок 3 – Рентгенограммы продуктов гидратации известково-цементного вяжущего с добавками Al и гипса: $\triangle$ – $\text{Ca}(\text{OH})_2$; $\square$ – C_3AH_6 ; $\circ$ – AFm-фаза; $\blacktriangledown$ – C_3S ; $\bullet$ – AFt-фаза; $\blacksquare$ – C_5H_2

Введение $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ приводит к образованию моногидратов и значительно снижает количество образующегося C_3AH_6 на начальном этапе гидратообразования (рис. 3). Гипс с основным отражением $d=2,776 \text{ \AA}$ в начальный момент является одной из основных кристаллических фаз системы. Спустя 1 ч количество $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ существенно уменьшается.

Наиболее интенсивные отражения на спектре относятся к гидроксиду кальция. Значительные изменения на дифракционных спектрах наблюдаются в области углов 2θ 8-12°, где находятся основные пики гексагональных AFm-фаз и

эттрингитоподобной AFt-фазы. В данной области углов имеется наложение отражений от не менее четырех гидратных фаз, каждая из которых представляет собой твердые растворы. Введение в систему гипса способствует появлению AFt-фазы с $d = 9,77 \text{ \AA}$, аналогом которой является эттрингит. Процессы гидратации во всех изученных модельных системах направлены на образование твердых растворов кальциевых гидратов. При фиксации температур в модельных системах наблюдалось повышение в основном за счет экзотермических реакций: гидратации извести и окислительно-восстановительного процесса взаимодействия дисперсного алюминия.

В связи с важностью процессов тепловыделения на ранних стадиях твердения газобетона были решены задачи определения максимальных температур, которые могут быть развиты газобетонными смесями при твердении. Энергетический потенциал газобетонной смеси определяется преимущественно составом смеси. На каждом отдельно взятом современном заводе автоклавного газобетона в процессе производства изделий изменяются характеристики сырья, корректируется состав смеси и варьируются технологические параметры. Объективно меняющиеся параметры требуют оперативного управления технологическим процессом. Анализ технологии производства и используемых рецептур на ряде предприятий, таких как: ЗАО «АэроБел» (г. Белгород, Россия), ЗАО «Могилевский КСИ» (г. Могилев, Республика Беларусь), ООО «ЛСР. Стеновые» (п. Кикерино, Ленинградская обл., Россия), ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону, Россия) и других, предопределил назначение номинальных составов (табл. 1). В процессе формирования структуры газобетонной смеси происходит изменение ее состава, однако, существенного изменения теплотемкости смесей за счет протекания реакций гидратообразования не происходит, так как удельная теплотемкость безводных компонентов и гидратных фаз находится на одинаковом уровне.

Таблица 1 – Составы газобетонных смесей

Наименование компонентов	Ед. изм.	Количество для марки по средней плотности					
		D100	D200	D300	D400	D500	D600
Известь	кг	15	25	35	45	50	55
Цемент	кг	45	85	90	100	95	90
Песок	кг	35	80	160	230	325	420
Гипс полуводный	кг	1	1,5	2	2	2,5	3
Алюминиевая паста	кг	1,01	0,91	0,83	0,77	0,71	0,64
Вода	л	80	130	170	190	210	230
Твердая фаза*	кг	95	190	285	375	470	565
Газовая фаза**	л	885	800	720	670	615	555

Примечание: * – без учета алюминиевой пасты; ** – во вспученном массиве

Анализ тепловыделения газобетонных смесей марок по средней плотности от D100 до D600 (рис. 4) показал следующее. В газобетонной смеси с маркой по средней плотности D100 существенный вклад на тепловыделение в смеси вносит реакция с алюминиевым газообразователем. Начиная с марки по сред-

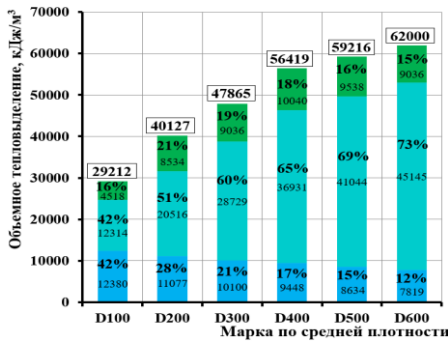


Рисунок 4 – Тепловыделение в газобетонных смесях: ■ – алюминий; ■ – оксид кальция; ■ – цемент ЦЕМ I 42,5 Н; □ – суммарный потенциал

Для марок по средней плотности от D200 до D600 тепловыделение практически не меняется, составляя соответственно 8534 кДж/м³ и 9036 кДж/м³.

Основную роль в формировании теплового режима массива играет негашеная молотая известь. Если для газобетонной смеси марки по средней плотности D100 экзотермия от реакций с CaO и с Al сопоставима, то для смесей марки по средней плотности D200 вклад CaO в суммарное тепловыделение в 2 раза больше. Для марки по средней плотности D500 объемное тепловыделение за счет извести составляет 41044 кДж/м³ или 70 % от суммарного.

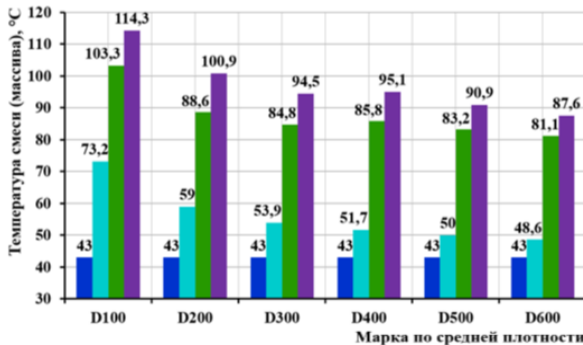


Рисунок 5 – Температуры в газобетонных смесях (массиве): ■ – заливка смеси в форму; ■ – газообразование в смеси; ■ – формирование структуры (гидратация CaO); ■ – массив

температуру газобетонной смеси менее чем на 10 °C. За счет последующей гидратации CaO замедленной добавкой гипса формируется структура с пластической прочностью массива. Независимо от марки по средней плотности приращение температуры смеси от гидратации CaO составляет величину на уровне 30 °C. Структурообразование в массиве завершается за счет твердения цемента. Экзотермические реакции гидратации цемента способствуют несущественному приращению температуры в газобетонной смеси.

Газобетонная смесь за счет экзотермических процессов взаимодействия дисперсного алюминия, гидратации извести и начального твердения цемента

ней плотности D200, величина тепловыделения реакции составляет уже четверть от суммарного объемного тепловыделения, а в газобетонной смеси для марки по средней плотности D500 – 15 %. Т.е. чем меньше проектная марка по средней плотности, тем существенней роль дисперсного алюминия в формировании теплового режима в газобетонной смеси. Вклад твердеющего цемента в суммарное тепловыделение при предварительном твердении массива для технологии автоклавного газобетона незначителен. Для марок по средней плотности от

В технологическом процессе от момента заливки газобетонной смеси в форму до распалубки массива прежде всего идет газообразование за счет дисперсного алюминия, и температура газобетонной смеси D100 увеличивается на 30,2 °C (рис. 5). У газобетонных смесей с маркой по средней плотности от D300 и выше экзотермия газообразователя повышает

имеет высокий термический потенциал. Основной вклад в тепловыделение в смеси вносит оксид кальция. Значимыми показателями для теплового режима массива являются проектная марка по средней плотности, расход извести и водотвердое отношение. Расход тепла газобетонной смеси на нагрев формы и окружающей среды является негативным фактором, создающим термический градиент в массиве.

Процессы, протекающие в твердеющей газобетонной смеси, ранжированы по значимости вклада в создание температурного уровня: гидратация цемента → газовыделение за счет дисперсного алюминия → гидратация оксида кальция.

Одним из видов пор в ячеистом бетоне являются **поры воздухововлечения**, которые отнесены к дефектам структуры. Для предотвращения процесса их образования оптимизируются параметры приготовления ячеистобетонной смеси, режим заливки смеси в формы и обработку смеси. Поры воздухововлечения в изделиях из ячеистых бетонов могут быть как единичные, так и многочисленные (рис. 6), при этом все они характеризуются тремя радиусами кривизны R_1 , R_2 , R_3 , а также высотой h (рис. 7).

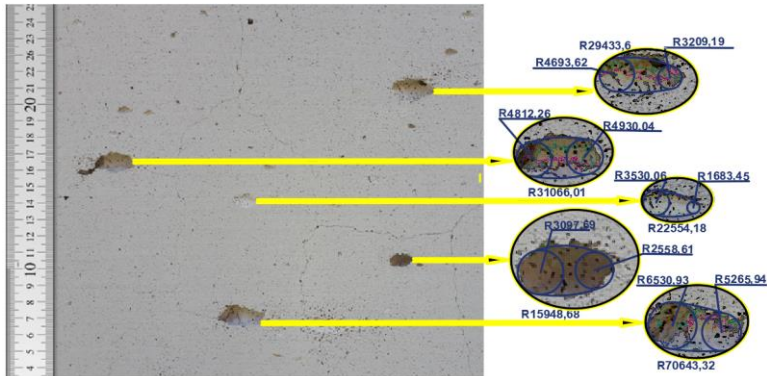


Рисунок 6 – Многочисленные поры воздухововлечения в газобетонном блоке

Статистические данные результатов замеров 100 пор воздухововлечения в образцах ячеистого бетона позволили выделить мелкие (до 50 мм^3), средние (от 50 до 500 мм^3) и крупные (500 мм^3 и выше) поры.

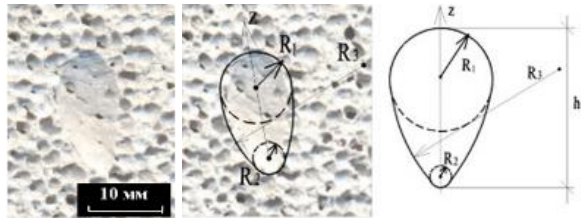


Рисунок 7 – Поры воздухововлечения в форме перевернутой капли

Для установления причин, объясняющих форму формирующихся пор воздухововлечения проведена количественная оценка составляющих энергетического потенциала данного вида дефектов в ячеистобетонной смеси. Рассмотрен газовый пузырек радиусом $R_0 = 10 \text{ мм}$ в ячеистобетонной смеси. Пусть в начальный момент времени после заливки смеси в форму пузырек гипотетически имел сферический вид и расположен на глубине $L = 100 \text{ мм}$ от поверхности смеси (рис. 8). Потенциальная энергия газового пузырька обуславливает выталкивающую силу из-за различий плотностей воздуха ($\rho_v = 1,29 \text{ кг/м}^3$) и смеси ($\rho_c = 1800 \text{ кг/м}^3$).

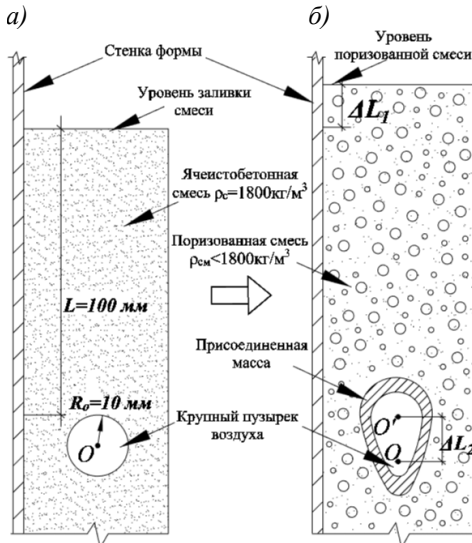


Рисунок 8 – Схема преобразования формы пор воздухововлечения в ячеистобетонной смеси:
 а – гипотетический начальный момент;
 б – энергетически предпочтительное состояние

влияние на состояние поры воздухововлечения в газобетонной смеси. В традиционной теории присоединенная масса определяется как половина объема среды, вытесненной пузырьком, умноженная на плотность этой среды.

Передача энергии от присоединенной массы поры воздухововлечения, при изменении температуры газобетонной смеси на 1°C (с 43°C до 44°C) достаточна, чтобы нагреть воздух в поре практически до 1000°C . На момент контакта пор воздухововлечения с окружающей его горячей газобетонной смесью пузырек с воздухом подвержен мощному энергетическому воздействию со стороны окружающей его среды. В таких условиях пора воздухововлечения примет энергетический статус, соответствующий минимуму его потенциальной энергии, который и определяет форму перевернутой капли.

Вторым видом дефектов (крупных пор) в ячеистобетонной смеси являются **сегментные пузыри**. Разработана теория сегментных пузырей в ячеистобетонной смеси, которые предложено рассматривать в форме двояковыпуклой линзы с разными радиусами кривизны и с округлыми краями преимущественно разного радиуса закругления (рис. 9).

Форму пузыря определяют четыре радиуса кривизны с условием $R_1 > R_2 >> R_3 > R_4$ и телесные углы с θ_1 и θ_2 . Рост сегментного пузыря происходит за счет коалесценции функциональных пор, заполненных водородом, а также за счет перехода воды в парообразное состояние. К концу процесса газообразования в ячеистобетонной смеси из-за пузырей на поверхности твердеющего массива появляются вздутия высотой от 3 до 15 мм.

Вклад в энергию за счет кривизны поверхности и соответствующего давления Лапласа $14,55\text{ Па}$ на четыре порядка ниже атмосферного давления $P_0 = 1,013 \cdot 10^5\text{ Па}$. Потенциальная энергия за счет межфазной границы $E_\phi = 9,14 \cdot 10^{-5}\text{ Дж}$. Энергия пузырька за счет выталкивающей силы $\Delta E_a = 7,4 \cdot 10^{-3}\text{ Дж}$. Следовательно, ключевым фактором, влияющим на энергетическое состояние газового пузырька в газобетоне, является его потенциальная энергия, которая определяется уровнем смеси ячеистого бетона над порой воздухововлечения. Характеристики среды, окружающей поры воздухововлечения, и количество вещества в этой среде, измеряемое через присоединенную массу, оказывают существенное

Наблюдения за поверхностью массива (рис. 10) показывают, что бугристость от вздутия остается неподвижной или может сделаться от одного до нескольких быстрых, непрогнозируемых по направлению перемещений на расстояние до 30 см от первоначального положения. Для выявления причины перемещений сегментного пузыря в твердеющей смеси ячеистого бетона рассмотрены эпюры тангенциальных напряжений от давления на искривленной поверхности пузыря. Базовая фигура сегментного пузыря в виде сечения с $R_4 = 2,5$ мм, представлена на рис. 11.

Пузырь имеет асимметричный вид с $R_3 > R_4$. Силы, действующие на материальную точку у поверхности жидкой фазы, рассмотрены как тангенциальная $\bar{F}\tau$ и нормальная $\bar{F}n$ составляющие. Вектор тангенциальной силы направлен вдоль траектории движений параллельно оси X . Вектор $\bar{F}\tau$ совпадает с направлением вектора скорости и фактически определяет изменение энергии при перемещении сегментной полости в ячеистобетонной смеси.

Когда $R_3 = 5$ мм, а $R_4 = 2,5$ мм по краям сегментного пузыря возникает асимметричность с максимумом при $\frac{\pi}{2}$, равным 5,661 и минимум при $\frac{3\pi}{2}$, равном -3,862 (рис. 12). Центры закруглений в сечениях сегментного пузыря смещены вверх от оси X , что повышает асимметричность фигуры.

Наблюдаемое на практике перемещение сегментного пузыря у поверхности ячеистобетонной смеси обусловлено асимметрией пузыря в области закругления. Уменьшение радиуса закругления и асимметрия сечения пузыря приводят к градиенту тангенциальных векторов (рис. 13) и появлению силы, вызывающей направленное перемещение пузыря.

Независимо от того перемещался сегментный пузырь или находился в состоянии покоя, из него происходит выхлоп газа и оседание ячеистобетонной смеси в форме. Наличие сегментных пузырей в массиве приводит к образованию разрывов сплошности в газобетоне (рис. 14), что ухудшает физико-механические и теплотехнические характеристики изделий.

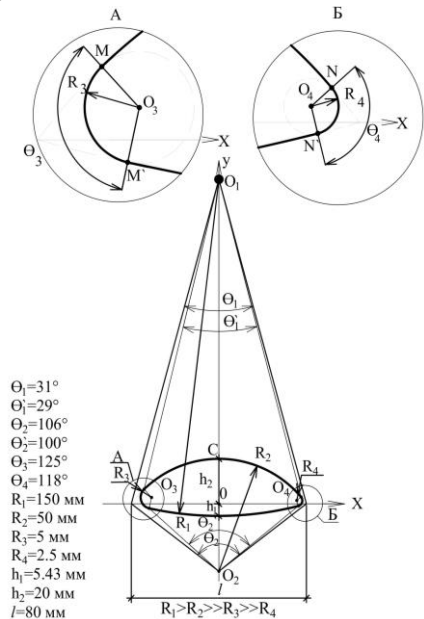


Рисунок 9 – Схема сегментного пузыря в ячеистобетонной смеси



Рисунок 10 – Образование пузыря у поверхности смеси и выхлоп из пузыря газа

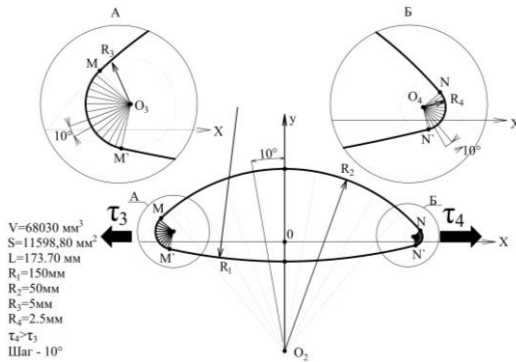


Рисунок 11 – Сечение сегментного пузыря с $R_4 = 2,5$ мм

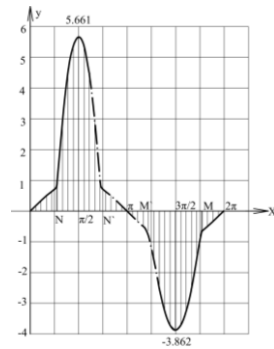


Рисунок 12 – Синусоидальная кривая сегментного пузыря с $R_3 = 5$ мм и $R_4 = 2,5$ мм

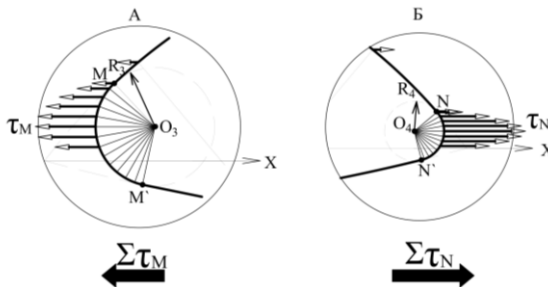


Рисунок 13 – Тангенциальные векторы пузыря с $R_3 = 5$ мм и $R_4 = 2,5$ мм

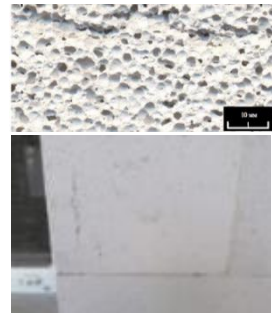


Рисунок 14 – Разрывы сплошности в газобетоне от сегментных пузырях

Проведена экспериментальная оценка температур на поверхности и внутри массива (рис. 15). Установлено, что температура на поверхности массива (датчики 1-6) в проведенной серии эксперимента составляла порядка 42°C , температура дна массива – в среднем 54°C . Создание термосных условий за счет пленочного укрытия позволяет уменьшить градиент температур на поверхности массива до $12-15^\circ\text{C}$ и получить температуру на наружной поверхности массива (датчики 1-6) в среднем до 54°C , что соответствует температуре на дне массива.

Анализ характера изменения температур внутри массива (рис. 16) свидетельствует о том, что наиболее быстрой является экзотермическая реакция алюминия с выделением водорода.

Формирование сегментных пузырей происходит в момент наибольшей скорости гидратации оксида кальция к 20 мин от момента заливки. Спустя 30 мин температура в центре массива достигает 70°C . Это способствует появлению в массиве градиента – «ядро – поверхность», превышающего 25°C . Напряжения за счет градиента температур или релаксируют, или проявляются в виде диагональной трещины массива. Трещина может появиться после резки массива или по завершении его автоклавной обработки. Следовательно, процесс начальной выдержки массива до его резки должен предполагать минимизацию термических градиентов.

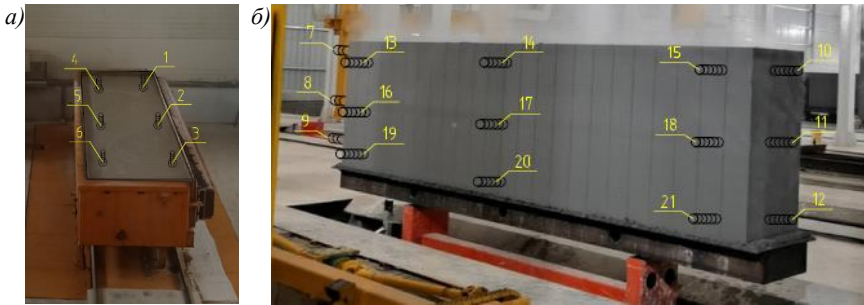


Рисунок 15 – Схема расположения температурных датчиков на поверхности массива: а – в форме; б – после резки

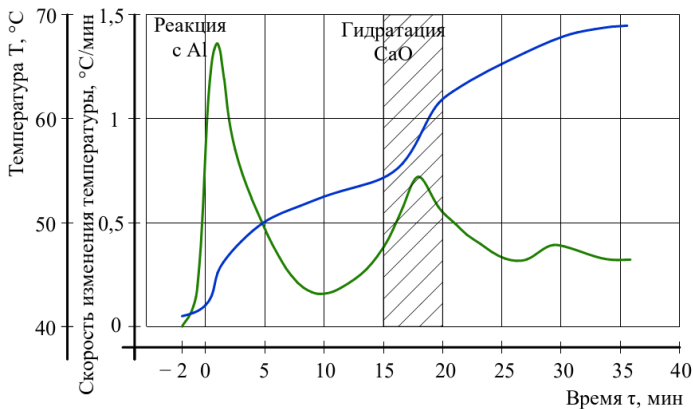


Рисунок 16 – Температурные показатели внутри массива:

■ – изменение температуры внутри массива; ■ – скорость изменения температуры; ▨ – время вероятного разрушения сегментных пузырей

Полученные данные позволяют расширить представления о стадиях технологического процесса формирования массива, которые выделены по результатам исследований модельных систем и расчетам тепловыделения в ячеистобетонных смесях.

Начальная стадия (10 с) – заливка смеси в форму с вовлечением в смесь воздуха, образованием пор воздухововлечения в форме перевернутой капли – дефектов структуры ячеистого бетона.

Первая стадия (от 0 до 10 мин) – тепловыделение в ячеистобетонной смеси за счет дисперсного алюминия с максимумом скорости до 5 мин. Формирование функциональной пористой структуры. Образование алюминатных гидратов в межпоровых перегородках.

Вторая стадия (от 10 до 25 мин) – тепловыделение в смеси за счет гидратации оксида кальция с экстремумом скорости реакции в интервале 15-20 мин. Образование сегментных пузырей – источников дефектов структуры. Фазообразование в межпоровых перегородках за счет гидроксида кальция.

Третья стадия (свыше 25 мин) – тепловыделение в смеси за счет гидратации цемента, образование гидратных фаз, рост пластической прочности в массиве, необходимой для резки.

На основе выявленных теоретических положений об энергоэффективном формировании структуры в смесях автоклавного газобетона обоснованы параметры технологического процесса от стадии заливки смеси в формы до резки массива на изделия. На стадии непосредственно после заливки в форму ячеистобетонная смесь подвергается обработке посредством погружения в нее стержней виброгребня с дальнейшим перемещением формы под виброгребнем со скоростью 12 м/мин.

Газобетон с высокоорганизованной структурой по эксплуатационным свойствам превосходит характеристики традиционных автоклавных газобетонов (табл. 2), что объясняется управлением формирования пористой структуры, исключением дефектов – пор воздухововлечения и разрыва сплошности, за счет научно обоснованного технологического решения обработки ячеистобетонной смеси виброгребнем в момент после ее заливки и применения термостного метода предварительного твердения, снижающего градиенты температур по высоте массива.

Таблица 2 – Основные физико-механические свойства газобетона

Показатель	Технология газобетона	
	модернизированная	заводская
Средняя плотность, кг/м ³ (марка)	485 (D500)	500 (D500)
Класс бетона	B5	B2,5
Усадка, мм/м	0,39	0,46
Коэффициент паропроницаемости, мг/м·ч·Па	0,17	0,18
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	0,107	0,119
Морозостойкость	F100	F25-F50

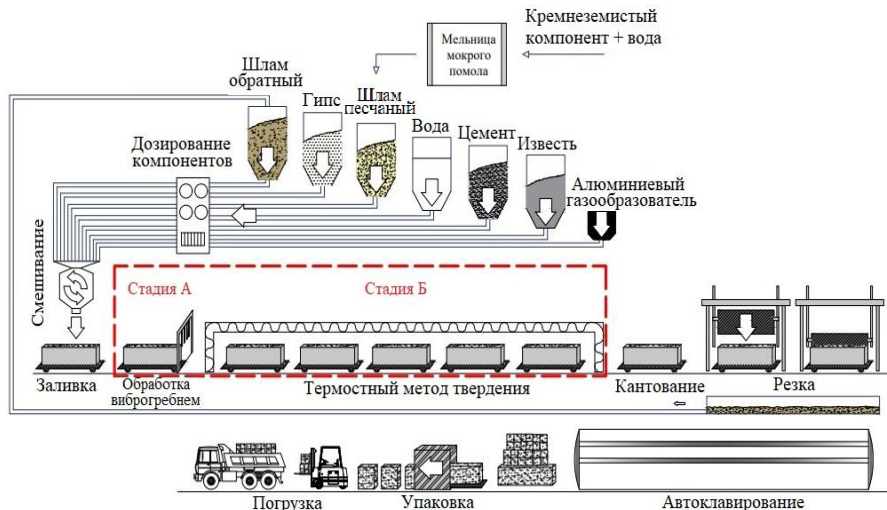


Рисунок 17 – Технологическая схема производства газобетонных изделий

Таким образом, предложено совершенствование технологической схемы производства газобетона в доавтоклавный период (рис. 17) за счет введения физико-механической обработки смеси виброгребнем на стадии после ее заливки (стадия А) и термосного метода в камере предварительного твердения (стадия Б).

Для реализации результатов работы разработаны стандарт организации СТО 02066339-068-2023 «Газобетон с высокоорганизованной структурой» и Рекомендации по производству газобетона с высокоорганизованной структурой. Обоснована технико-экономическая эффективность совершенствования технологии производства, обеспечивающей получение газобетона с высокоорганизованной структурой D500, B5.

Промышленная реализация результатов исследования осуществлялась в ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону), ООО «Сибирский элемент «Рента-К» (д. Обухово, Калужская обл.), ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (г. Белгород).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Развита теоретическая представления о природе и видах дефектов газобетона, а также о формировании высокоорганизованной структуры газобетона, что позволило разработать научно обоснованное технологическое решение совершенствования процесса производства газобетона в доавтоклавный период – от стадии заливки смеси в формы до резки массива.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение газобетона высокоорганизованной структуры за счет: регулирования расхода извести, физико-механической обработки смеси виброгребнем после ее заливки, создания термосных условий в камере предварительного твердения. Изменение расхода извести позволяет регулировать термический потенциал газобетонной смеси из условия $1 \text{ кг/м}^3 \text{ CaO}$ на 1°C . Воздействие на газобетонную смесь виброгребня путем перемещения формы под ним со скоростью 12 м/мин обеспечивает дробление пор воздуховлечения до размера менее 2 мм , сопоставимого с порами газовыделения. Снижение градиента температур при создании термосных условий твердения до $12\text{--}15^\circ\text{C}$ приводит к достижению температуры поверхности массива порядка 54°C , соответствующей значению на дне формы, что предотвращает образование сегментных пузырей. Совершенствование технологии газобетона обеспечивает повышение прочности на $50\text{--}60\%$ и снижение теплопроводности на $10\text{--}15\%$.

Установлены условия формирования дефектов структуры – пор воздуховлечения и сегментных пузырей. Показано, что поры воздуховлечения, образовавшиеся во время заливки ячеистобетонной смеси, имеют форму перевернутой капли, характеризуемой тремя радиусами кривизны и высотой. Образование сегментных пузырей происходит в области максимума скорости гидратации извести, а условием их горизонтального перемещения является градиент тангенциальных сил в направлении повышенной асимметрии данного вида дефекта структуры, что приводит к выходу газа и оседанию смеси в форме или к нарушению структуры массива из-за разрывов сплошности.

Сформулированы теоретические основы получения газобетона высокоорганизованной структуры, раскрывающие влияние термических процессов (как интегрального тепловыделения, так и градиента температур) на снижение доли сегментных пузырей, как дефектов структуры, формируемых в доавтоклавный период. Процессы, протекающие в твердеющей газобетонной смеси, ранжированы

по значимости вклада в создание температурного уровня: гидратация цемента → газовыделение за счет дисперсного алюминия → гидратация оксида кальция.

Предложено совершенствование технологической линии по производству автоклавного газобетона, заключающееся в регулировании содержания извести, введении физико-механической обработки смеси виброгребнем на стадии после ее заливки и применении термосного метода в камере предварительного твердения.

Обоснованное технологическое решение обеспечивает получение газобетона с высокоорганизованной макроструктурой по эксплуатационным свойствам превосходящего характеристики автоклавных газобетонов, произведенных по традиционной технологии, с обеспечением класса прочности *B5* при марке по плотности *D500*.

Разработаны мероприятия по повышению теплотехнической однородности стен из ячеистобетонных блоков.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения на предприятиях по производству газобетонов, а также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Перспективой дальнейших исследований является исследование агрегативности ячеистобетонных смесей, выявление роли конгломератных образований в ячеистобетонной смеси на процесс формирования пористой структуры и установление значимости обратного термического градиента на этапе интенсивного тепловыделения в массиве при технологическом обеспечении получения газобетона высокоорганизованной структуры.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. **Сулейманов, К.А.** Повышение теплотехнической однородности стен из ячеистобетонных блоков / К.А. Сулейманов, И.А. Погорелова, И.С. Рябчевский // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 5. – С. 17-24. (*K2*)

2. **Сулейманов, К.А.** Энергетический потенциал газобетонных смесей / К.А. Сулейманов, И.А. Погорелова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 11. – С. 8-17. (*K1*)

3. **Сулейманов, К.А.** Поры воздухововлечения в структуре газобетона / К.А. Сулейманов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 12. – С. 8-15. (*K1*)

4. **Сулейманов, К.А.** Исследование макропористой структуры ячеистого бетона / К.А. Сулейманов, В.С. Лесовик, И.А. Погорелова, И.С. Рябчевский // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 3. – С. 8-16. (*K1*)

В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus

5. **Suleymanova, L.A.** Energy efficiency improvement of aerated concrete block wall fences / L.A. Suleymanova, I.A. Pogorelova, **K.A. Suleymanov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. T. 945. P. 012006.

6. **Сулейманов, К.А.** Виды пор в ячеистом бетоне / К.А. Сулейманов // IV Международный студенческий строительный форум – 2019 (К 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова): сб. докладов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 335-338.

7. **Погорелова, И.А.** Моделирование пористости и прочностных свойств поробетона / И.А. Погорелова, П.А. Амелин, **К.А. Сулейманов** // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека: сб. докладов II Международного онлайн-конгресса, посвященного 30-летию кафедры Строительного материаловедения, изделий и конструкций. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 602-608.

8. **Амелин, П.А.** Анализ методик определения прочности на сжатие и модуля упругости ячеистого бетона различной плотности / П.А. Амелин, **К.А. Сулейманов**, И.С. Рябчевский // Наука и инновации в строительстве: сб. докладов V Международной научно-практической конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – Т. 2. – С. 128-137.

9. **Рябчевский, И.С.** Особенности формирования пористой структуры ячеистого бетона / И.С. Рябчевский, **К.А. Сулейманов**, И.А. Чесноков // Университетская наука. – 2022. – № 1(13). – С. 81-83.

10. **Сулейманов, К.А.** Влагостойкость строительных материалов для ограждающих конструкций / К.А. Сулейманов, А.В. Бычков // VII Международный студенческий строительный форум – 2022: сб. докладов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 165-168.

11. **Сулейманов, К.А.** Процессы гидратообразования в газобетонной смеси / К.А. Сулейманов, В.С. Лесовик, С.А. Коломацкая // Наука и инновации в строительстве: сб. докладов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 220-225.

12. **Сулейманов, К.А.** Поры воздухововлечения в ячеистобетонной смеси / К.А. Сулейманов, И.А. Погорелова // Архитектура. Строительство. Информационные технологии – 2023 (АСИТ-2023): сб. трудов I международной научно-практической конференции. – Новороссийск, 2023. – С. 35-37.

13. **Рябчевский, И.С.** Анализ методов определения пористой структуры ячеистых бетонов / И.С. Рябчевский, М.А. Богачева, **К.А. Сулейманов** // VIII Международный студенческий строительный форум – 2023: сб. докладов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – Т.2. – С. 225-230.

14. **Сулейманов, К.А.** Особенности изготовления изделий из автоклавного газобетона / К.А. Сулейманов // Актуальные вопросы техники, науки, технологии: сб. научных трудов национальной конференции. – Брянск: Изд-во БГИТУ, 2024. – С. 607-612.

15. **Сулейманов, К.А.** Анализ методов определения макропористости ячеистых бетонов / К.А. Сулейманов, И.С. Рябчевский, М.А. Богачева // Инженерное дело на Дальнем Востоке России: сб. докладов IX Всероссийской научно-практической конференции. – Владивосток: Изд-во ВУЦ ДВФУ, 2024. – С. 289-293.

16. **Сулейманов, К.А.** Формирование высокоорганизованной структуры массива в технологии автоклавного ячеистого бетона / К.А. Сулейманов, А.В. Свиначев, Л.А. Сулейманова, А.С. Коломацкий // Современный автоклавный газобетон: сб. докладов VII Международной научно-практической конференции. – М.: Изд-во Тривант, 2024. – С. 95-102.

Объекты интеллектуальной собственности

17. **Пат. на полезную модель RU 200967.** Кладка стен из ячеистобетонных блоков с их фиксацией // Л.А. Сулейманова, И.С. Рябчевский, И.А. Погорелова, А.С. Коломацкий, **К.А. Сулейманов**, Д. Монко, В.А. Кулагов. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Оpubл. 20.11.2020.

18. **Пат. на полезную модель RU 200968.** Кладка стен из ячеистобетонных блоков с их фиксацией по шву // Л.А. Сулейманова, И.С. Рябчевский, И.А. Погорелова, **К.А. Сулейманов**, М.В. Марушко, П.А. Амелин. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Оpubл. 20.11.2020.

19. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662983.** Программа расчета состава автоклавных ячеистобетонных изделий // В.С. Лесовик, **К.А. Сулейманов**, И.С. Рябчевский. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Оpubл. 08.07.2022.

20. **Пат. RU 2811671.** Способ определения пористости ячеистых бетонов // И.А. Погорелова, **К.А. Сулейманов**, В.С. Лесовик, И.С. Рябчевский. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». Оpubл. 15.01.2024.

21. **Пат. RU 2822855.** Способ изготовления изделий из автоклавного газобетона // И.А. Погорелова, **К.А. Сулейманов**, И.С. Рябчевский. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». Оpubл. 15.07.2024.

СУЛЕЙМАНОВ КАРИМ АБДУЛЛАЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОБЕТОНА
В ДОАВТОКЛАВНЫЙ ПЕРИОД**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 18.10.2024 г.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,15. Тираж 100 экз. Заказ № 140.

Отпечатано в Белгородском государственном
технологическом университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46