

На правах рукописи

Прищепа Инга Александровна

**ПЕНОБЕТОН НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ
С ДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ
И ОДНОРОДНОЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ**

Специальность 2.1.5 – Строительные материалы и изделия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО ТГАСУ)

Научный руководитель:	КУДЯКОВ Александр Иванович, доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	ЗАГОРОДНЮК Лилия Хасановна, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государствен- ный технологический университет им. В.Г. Шухова» СЛАВЧЕВА Галина Станиславовна, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государствен- ный технический университет»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего об- разования «Новосибирский государствен- ный архитектурно-строительный универ- ситет (Сибстрин)»

Защита состоится «18» октября 2024 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.414.01 в Томском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, корпус 2, зал заседаний Ученого совета (ауд. 303/2); тел.: 8-(3822) 659952.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского государственного архитектурно-строительного университета по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, и на сайте <https://tsuab.ru/article/prishchepa-inga-aleksandrovna?lang=ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Копаница Наталья Олеговна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В соответствии с национальным проектом «Жилье и городская среда» в России к 2030 г. доля малоэтажного жилищного строительства увеличится до 40 % от общего объема строительства жилья. Малоэтажное жилье обладает рядом преимуществ: возможность строительства в районах с достаточно сложным рельефом, отсутствие необходимости привлечения значительных человеческих ресурсов и использования тяжелой специальной техники, сокращение сроков строительства, а также более низкие цены на содержание жилья в сравнении с многоквартирными домами. Все это позволяет рассматривать индивидуальное жилье как альтернатива городской квартире.

Привлекательным стеновым материалом по возможности организации технологии изготовления в заводских условиях или непосредственно на территории объекта строительства с использованием местного сырья является пенобетон неавтоклавного твердения. Известно, что пенобетон обладает хорошими теплоизоляционными свойствами при обеспечении требуемой прочности и долговечности. Многочисленными исследованиями установлено, что при изготовлении изделий из неавтоклавного пенобетона возникают сложности при управлении процессами структурообразования на различных масштабных уровнях, а именно при формировании пористой структуры, что приводит к существенному снижению качества продукции. Для решения этой проблемы при производстве пенобетонов используются различные модифицирующие добавки. В большинстве случаев эти добавки при введении в пенобетонную смесь разрушают пузырьки пены, что приводит к снижению количества макро- и микропор, однородности структуры и теплозащитных свойств пенобетона. В связи с этим исследования влияния модифицирующих добавок на свойства пен, пенобетонной смеси и пенобетона в производстве стеновых материалов являются актуальными.

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEMN-2022-0001.

Степень разработанности темы диссертационного исследования. Исследованиями повышения качества ячеистых бетонов неавтоклавного твердения занимались отечественные и зарубежные ученые: П.С. Горбач, Л.Х. Загороднюк, А.С. Коломацкий, А.И. Кудяков, А.П. Меркин, А.Е. Местников, В.Н. Моргун, Л.В. Моргун, Т.А. Низина, В.А. Пинскер, П.А. Ребиндер, Г.С. Славчева, В.В. Строкова, Л.А. Сулейманова, В.И. Удачкин, Т.А. Ухова, Л.Д. Шахова, В.Г. Хозин, С.Л. Kalousek, I.W. Weber, F.N. Leich и др. Общепринятым считается, что применение модифицирующих добавок позволяет улучшить свойства пенобетонной смеси и пенобетона, что подтверждается большим количеством работ различных авторов. Проведенными исследованиями, выполненными ранее в Томском государственном архитектурно-строительном университете, доказана возможность использования дисперсных добавок: термомодифицированных торфяных (далее – ТМТ) и золы-уноса для регули-

рования структуры и свойств цементных систем. Однако, при всей значимости результатов научных исследований, открытыми остаются вопросы комплексного действия добавок на процессы структурообразования и формирования однородной пористой структуры пенобетона неавтоклавного твердения, что является важным фактором для управления теплофизическими и механическими свойствами материалов.

Объект исследования – пенобетон неавтоклавного твердения с дисперсными добавками и однородной пористой структурой.

Предмет исследования – процессы формирования макропористой структуры на стадии вспенивания и твердения пенобетонной смеси, обеспечивающие получение пенобетона неавтоклавного твердения с равномерно распределенной пористой структурой.

Цель работы: разработка научно обоснованных технологических решений производства пенобетона неавтоклавного твердения с дисперсными добавками и однородной пористой структурой.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- научное обоснование выбора дисперсных добавок при производстве неавтоклавного пенобетона;
- установление закономерностей влияния дисперсных добавок на свойства пен, цементного теста и цементного камня;
- разработка оптимальных составов и исследование свойств пенобетонных смесей и пенобетона с дисперсными добавками;
- разработка методики оценки степени однородности пористой структуры модифицированного пенобетона неавтоклавного твердения и установление феноменологической связи с эксплуатационными характеристиками стеновых материалов;
- разработка технологии и обоснование технико-экономической эффективности производства пенобетона с дисперсными добавками;
- проведение опытно-промышленной апробации результатов исследований и разработка практических рекомендаций производства пенобетона с дисперсными добавками.

Научная новизна:

1. Предложены научно обоснованные технологические решения управления процессом структурообразования пенобетона неавтоклавного твердения с однородной пористой структурой с преимущественным размером пор до 0,5 мм путем введения в смесь дисперсной добавки ТМТ600, что позволяет снизить коэффициент теплопроводности на 34,8 % (0,11 Вт/м °С) и повысить марку по морозостойкости до F75 с сохранением марки пенобетона по средней плотности D700.

2. Установлены закономерности влияния добавки ТМТ600 на процессы начального структурообразования пенобетонной смеси: через три часа твердения смеси пластическая прочность повышается на 65 %, через 28 сут прочность

при сжатии пенобетона увеличивается на 52,3 % (3,58 МПа), а усадка при высыхании уменьшается на 70 %, по сравнению с контрольными составами.

3. Установлено, что при введении в пену добавки ТМТ600 происходит адсорбция твердых дисперсных частиц на границе раздела фаз и уплотнение пленки, что препятствует разрушению пены и приводит к увеличению ее стойкости. При этом не адсорбированная часть добавки на пузырьках располагается в межпузырьковом пространстве, что обеспечивает кольматацию каналов Плато – Гиббса с формированием плотной упаковки твердых частиц и приводит к существенной стойкости структуры пены.

Теоретическая значимость работы заключается в получении новых данных по формированию пористой структуры пенобетона за счет введения дисперсных добавок, обеспечивающих формирование однородной поровой структуры, а также уплотнение и упрочнение межпоровых перегородок, что позволяет получить материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Практическая значимость диссертационной работы:

- разработаны составы и технологические решения производства пенобетона неавтоклавного твердения с дисперсной добавкой ТМТ600 в количестве 0,5 %, обеспечивающей повышенные эксплуатационные характеристики материала: класс бетона В2,5, морозостойкость F75, теплопроводность 0,11 Вт/м·°С, с сохранением марки по средней плотности D700;

- разработаны алгоритм и его программная реализация в MathCad для оценки степени однородности пенобетона по пористости и по локальным объемам, проведена его апробация на образцах пенобетона с применением метода компьютерной томографии;

- разработаны технические условия и технологический регламент по производству блоков стеновых из конструкционно-теплоизоляционного пенобетона с дисперсной добавкой ТМТ600;

- проведена опытно-промышленная апробация результатов исследования и осуществлено внедрение практических рекомендаций в ООО «Золотые ворота»;

- новизна технических решений, представленных в диссертационной работе, защищена патентом на изобретение РФ № 2514069 «Сырьевая смесь для приготовления пенобетона»;

- научные и практические результаты диссертационной работы применяются в учебном процессе кафедры «Строительные материалы и технологии» ТГАСУ.

Методология диссертационного исследования основана на многофакторном анализе совместного функционирования элементов в системе «состав – структура – свойства». Для изучения сырьевых компонентов и пенобетона на их основе применен комплекс методов исследования с использованием современного высокотехнологичного оборудования, что позволило получить обоснованные и достоверные результаты. Исследования базируются на физико-химических методах, оптической и электронной микро-

скопии, рентгенофазовом анализе, компьютерной томографии. Стандартизированные характеристики пенобетонов определяли в соответствии с нормативными документами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Механизм стабилизации пены добавкой ТМТ600 за счет адсорбции твердых дисперсных частиц на границе раздела фаз, препятствующей разрушению пены и приводящей к увеличению ее стойкости в 1,3 раза.

2. Механизм начального структурообразования модифицированной дисперсными добавками пенобетонной смеси с повышенным значением начальной прочности и уменьшением усадки пенобетона.

3. Закономерности влияния дисперсной добавки ТМТ600 на структуру и свойства пенобетона неавтоклавного твердения.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований обеспечивается: проведением экспериментальных работ с использованием поверенных средств измерений и аттестованного испытательного оборудования с достаточной воспроизводимостью результатов исследований; применением стандартных методик, обеспечивающих достаточную точность полученных результатов с учетом требований нормативных документов с вероятностью 0,95, в том числе применением статистических методов обработки данных и необходимого числа повторных испытаний; сопоставлением полученных результатов с аналогичными результатами других авторов; положительными результатами опытно-промышленных испытаний модифицированных пенобетонных изделий.

Внедрение результатов исследования. Результаты научных исследований внедрены при изготовлении блоков пенобетонных неавтоклавного твердения с термомодифицированной торфяной добавкой ТМТ600 на технологической линии ООО «Золотые ворота».

Разработаны нормативные документы:

– технологический регламент на производство блоков стеновых из конструкционно-теплоизоляционного пенобетона;

– технические условия ТУ23.61.12-093-02069295-2022 «Блоки пенобетонные стеновые неавтоклавного твердения с термомодифицированной торфяной добавкой. Технические условия».

Полученные в ходе выполнения диссертационных исследований данные используются в подготовке и проведении учебных занятий со студентами направления 08.03.01 «Строительство» профиля 08.03.01.05 «Производство строительных материалов, изделий и конструкций».

Личный вклад. Автором сформулирована рабочая гипотеза. Проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение эффективности использования дисперсных добавок с целью получения пенобетона неавтоклавного твердения с однородной пористой структурой. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, проведена последующая обработка и анализ полученных результатов, а также разработка и апробация полученных результатов.

Апробация работы. Диссертационная работа и ее отдельные части докладывались и обсуждались: на Международной научно-практической конференции «Инвестиции, градостроительство, недвижимост как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения» (Томск, ТГАСУ, 2016, 2019, 2022, 2023); на Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук (Томск, 2015, 2018, 2021, 2023); на Международной научно-технической конференции «Эффективные рецептуры и технологии в строительном материаловедении» (Новосибирск, 2017); на Международном симпозиуме «Современные ресурсосберегающие материалы и технологии: перспективы и применение» (Новосибирск, 2020); на VII Международной научно-практической конференции «Качество. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2024).

Публикации по работе. Основные результаты диссертации изложены: в 5 статьях журналов, входящих в Перечень ВАК РФ; в 8 статьях журналов, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science. Получен патент на изобретение № 2514069, разработана и осуществлена Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2018617893.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 196 наименований и трех приложений. Работа содержит 144 страницы сквозной нумерации, 51 рисунок и 32 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и основные задачи для достижения поставленной цели, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Современное состояние производства пенобетона» представлен аналитический обзор по теме исследований в области применения модифицирующих добавок для управления процессами структурообразования и разработки технологических решений в производстве пенобетона неавтоклавного твердения с целью получения материала с улучшенными физико-механическими характеристиками.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационных исследований.

Во второй главе «Используемые материалы и методы исследования» представлены характеристики применяемых материалов и методики проведения исследований. Для проведения исследований использовались следующие материалы: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ООО «Топкинский цемент» (ГОСТ 31108–2020); песок Кудровского месторождения (ГОСТ 8736–2014,

ГОСТ 26633–2012), модуль крупности 1,44; синтетические пенообразователи: «Бенотех ПБ-С» (ТУ 2481-010-58771162–2007), «Пеностром» (ТУ 2481-001-22299560–99), «ПБ-Люкс» (ТУ 2481-004-59586231–2005). В качестве дисперсных добавок применялись термомодифицированные торфяные добавки ТМТ400, ТМТ600, ТМТ800 (патент на полезную модель № 107151) и зола-унос – отход от сжигания каменных углей Кузнецкого бассейна ТЭЦ-5 г. Новосибирска (ГОСТ 25818–2017). Добавки ТМТ получены из низинного торфа Гусевского месторождения. Это гидрофобный тонкодисперсный однородный порошок темно-серого цвета с удельной поверхностью 600 м²/кг, средний размер частиц торфяной добавки – (42 ± 3) мкм. Зола-унос ТЭЦ-5 г. Новосибирска – тонкодисперсный материал из частиц размером 3–315 мкм. По химическому составу зола-унос кислая, 75 % SiO₂ и Al₂O₃ (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав золы-уноса

Окислы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	CaO _{св}	P ₂ O ₅
Содержание, %	30,0–55,0	3,0–15,0	5,0–12,0	10,0	5,0	1,5	0,05–0,5	6,0	0,77	8,0	5,0

В работе применялись физико-механические и физико-химические методы исследования с использованием поверенных средств измерений, аттестованного оборудования и стандартных методик, соответствующих требованиям нормативных документов РФ.

В третьей главе «Особенности влияния добавок на свойства пен и цементных композиций» представлены результаты оценки влияния вида и концентрации синтетических пенообразователей на свойства пены, на основании которых по критериям кратности и стойкости пены для проведения экспериментальных исследований пенобетона выбран пенообразователь Бенотех ПБ-С. В качестве рабочей гипотезы сделано предположение, что введение добавок в пенный раствор позволит получить стабильные пены для изготовления пенобетона. При проведении исследований устанавливались закономерности влияния вида и количества дисперсных добавок ТМТ и золы-уноса на свойства пен. Добавки вводились в водный раствор пенообразователя перед началом взбивания пены. В работе установлены закономерности по влиянию дисперсных добавок ТМТ400, ТМТ600 и ТМТ800 на свойства пен, цементного теста и камня. Наиболее эффективное влияние на свойства пен оказывает добавка ТМТ600. При введении добавки ТМТ600 в водный раствор пенообразователя (таблица 2) наблюдается незначительное снижение кратности пены, что, возможно, связано с увеличением плотности пенного раствора, однако при этом стойкость пены увеличивается в 1,3 раза. При введении золы-уноса в пенный раствор снижается кратность пены на 35 % и стойкость в 3,5 раза. Из результатов проведенных исследований сде-

лан вывод, что наиболее эффективным для использования в производстве пенобетона повышенного качества по критериям стойкости и кратности пены является добавка ТМТ600 при ее содержании 0,5–1,5 %.

Таблица 2 – Свойства пен в зависимости от вида и содержания дисперсных добавок

Вид добавки	Количество, %	Кратность, раз	Стойкость, мин
Без добавки	0	10,8	105
ТМТ600	0,5	10,4	130
	1,0	10,0	133
	1,5	9,9	130
	2,0	9,8	120
Зола-унос	0,5	10,0	35
	1,0	9,8	30
	1,5	9,4	27
	2,0	8,0	25

По результатам микроскопического исследования пен с добавкой ТМТ600, представленных на рисунке 1, установлено, что при введении в пену добавки ТМТ600 происходит адсорбция твердых дисперсных частиц на границе раздела фаз и уплотнение пленки, что препятствует разрушению пены и приводит к увеличению ее стойкости. При этом часть добавки, не адсорбированной на пузырьках, располагается в межпузырьковом пространстве, что обеспечивает кольматацию каналов Плато – Гиббса с формированием плотной упаковки твердых частиц и приводит к существенной стойкости структуры пены.

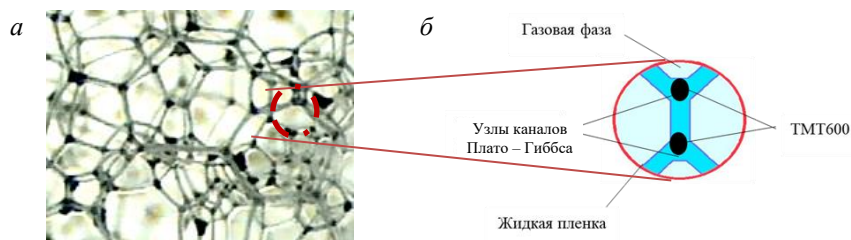


Рисунок 1 – Распределение добавки ТМТ600 по каналам Плато – Гиббса:

а – через 5 мин после приготовления пены; *б* – схема структуры пены с добавкой ТМТ600

Элементный состав торфяной добавки ТМТ600 представлен преимущественно кальцием, углеродом (рисунок 2, таблица 3).

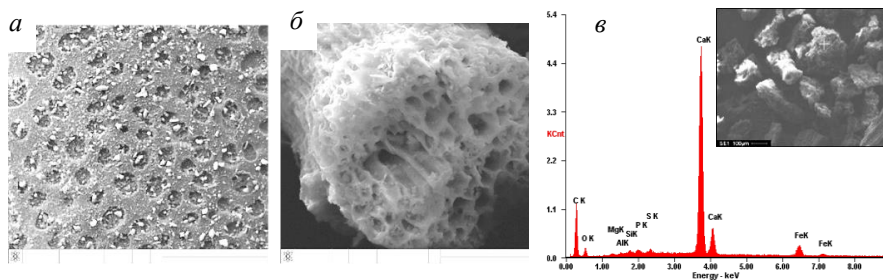


Рисунок 2 – Микроструктура термомодифицированной торфяной добавки ТМТ600:
а – при $\times 100$; б – при $\times 2500$; в – элементный состав

Таблица 3 – Элементный состав термомодифицированной торфяной добавки ТМТ600

Показатель	Элемент								
	C	O	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Fe
Масс. %	48,48	13,02	00,54	00,46	00,63	00,58	00,54	31,72	04,04
Ат, %	69,46	14,00	00,38	00,29	00,38	00,32	00,29	13,62	01,25

В таблице 4 приведены свойства цементного теста нормальной густоты и цементного камня с дисперсными добавками ТМТ600 и золы-уноса. Согласно полученным данным, в 28-суточном возрасте прочность на сжатие исследуемых образцов из пенобетона с добавкой ТМТ600 увеличивается на 54,2 % по сравнению с контрольными образцами. Уменьшение сроков схватывания и существенное повышение прочности цементного камня позволяют предполагать, что на ранней стадии гидратации минералов цемента образуются продукты с более высокой степенью дисперсности и кристалличности. Инициирование указанных процессов, несомненно, обусловлено введением добавки ТМТ600, т. к. ее концентрация составляет 0,5 %, то возможно и каталитическое действие ТМТ600. Установлено, что в цементном тесте при замене цемента золой-уносом на 10 % в 1,5–2,0 раза замедляется начало и конец сроков схватывания. При этом прочность образцов в возрасте 28 сут практически не изменяется по сравнению с контрольными образцами, что объясняется оптимальным топологическим расположением частиц, созданием благоприятных условий для гидратации цемента вследствие высокой водоудерживающей способности золы, а также образованием дополнительных низкоосновных гидросиликатов кальция по пуццолановому типу и уменьшением пористости цементного камня. Увеличение количества золы-уноса свыше 10 % приводит к снижению прочности цементного камня из-за повышения водоцементного отношения и образования капиллярных пор. В связи с этим дальнейшие исследования цементного камня были продолжены на составе с содержанием золы-уноса 10 %.

Таблица 4 – Характеристики цементного теста и камня с дисперсными добавками

Состав	Расход цемента, %	Содержание добавки, % от массы цемента	Сроки схватывания цементного теста, мин		Предел прочности при сжатии цементного камня, МПа
			Начало	Конец	
Контрольный состав	100	–	80	250	46,8
Составы с ТМТ600	99,9	0,1	80	245	53,2
	99,8	0,2	75	245	55,8
	99,7	0,3	70	240	61,6
	99,6	0,4	65	230	67,2
	99,5	0,5	60	220	77,5
	99,4	0,6	62	220	67,3
	99,3	0,7	64	230	56,9
Составы с золой-уносом	90	10	120	300	45,0
	80	20	160	350	40,5
	70	30	170	360	30,0
	60	40	180	400	28,0

Из данных термогравиметрического анализа цементного камня образцов без добавок, с добавкой ТМТ600 и с золой-уносом (рисунок 3) следует, что первый эндозффект (115,2 и 119,7 °С) соответствует потере слабосвязанной воды, второй эндозффект (459,3 и 457,2 °С) относится к разложению гидроксидов кальция и образованию низкоосновных гидросиликатов кальция типа C-S-H(I), а эндозффект при 645–701 °С соответствует дегидратации высокоосновных гидросиликатов кальция.

Из данных, приведенных на рисунке 4, следует, что введение добавки ТМТ600 приводит к образованию однородной, плотной и более мелкокристаллической структуры по сравнению с контрольным образцом цементного камня. Очевидно, что в образцах с добавкой ТМТ600 меняется механизм взаимодействия цемента с водой. Из анализа образцов скола цементного камня с добавкой золы-уноса следует, что формируется плотная структура преимущественно со сросшимися гелеобразными тончайшими пластинками низкоосновных гидросиликатов кальция.

По результатам рентгенофазовых исследований в цементном камне с добавкой ТМТ600 подтверждается образование новых фаз (рисунок 5). В цементном камне с добавкой ТМТ600 идентифицируются: пики слабо закристаллизованных гидросиликатов кальция CSH – d , Å = 2,76; 2,62; портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – d , Å = 2,63; 1,93; 4,91; гидросиликата кальция (тоберморит) $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – d , Å = 11,28; 10,9, а также негидратированных минералов портландцементного клинкера C_3S (алит) – d , Å = 3,03; 3,06; 2,74; β C_2S (белит) – d , Å = 3,09; 3,003; 1,75; 2,18.

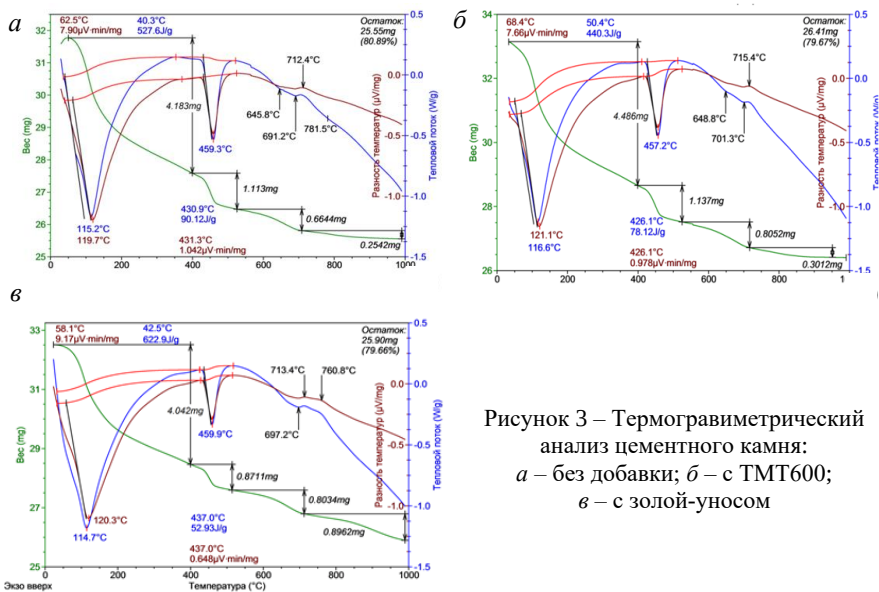


Рисунок 3 – Термогравиметрический анализ цементного камня:
 а – без добавки; б – с TMT600;
 в – с золой-уносом

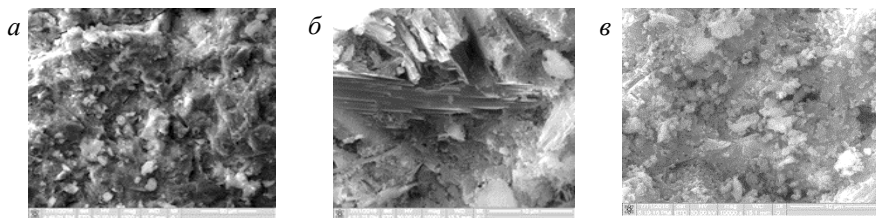


Рисунок 4 – Электронные микрофотографии образцов цементного камня:
 а – без добавки; б – с добавкой TMT600; в – с золой-уносом (×10 000)

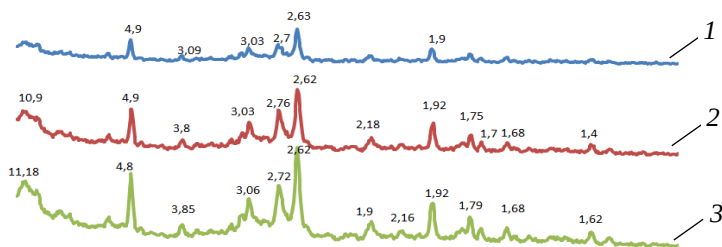


Рисунок 5 – Результаты рентгенофазового анализа цементного камня и цементного камня с добавками:
 1 – контрольный состав; 2 – состав с TMT600; 3 – состав с золой-уносом

Формирование дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция обусловлено связыванием оксидов кальция функциональными группами минерально-органических комплексов в добавке ТМТ600, что приводит к повышению прочности модифицированного цементного камня. Установлено, у образцов цементного камня с добавками интенсивность основного пика (4,474 и 3,56Å), характерного для портландита, а также пики тоберморита выше по сравнению с контрольным образцом, что объясняет повышение степени гидратации портландцемента. Таким образом, одной из причин повышения прочности цементного камня при введении добавок является увеличение степени гидратации портландцемента и кристаллизации новообразований.

На основании многокритериальной оценки характеристик по влиянию добавок на свойства пен, цементного теста и камня, для получения пенобетона повышенного качества дальнейшие исследования проводились с добавкой ТМТ600. Исследования по влиянию золы-уноса на свойства пенобетонной смеси и пенобетона проводились при ее содержании 10 % от массы цемента.

В четвертой главе представлены результаты исследований влияния дисперсных добавок на свойства пенобетонных смесей и пенобетона. Для разработки рациональных составов пенобетона с добавкой ТМТ600 применено математическое планирование эксперимента. Оценку оптимизации состава и свойств проводили на основании анализа физико-механических характеристик пенобетона: плотности и предела прочности при сжатии. В таблице 5 приведены условия планирования экспериментальных исследований пенобетона. В качестве варьируемых параметров были выбраны: водотвердое отношение, количество дисперсных добавок: ТМТ600 и пенообразователя, номограммы зависимости плотности и предела прочности. С использованием условий планирования эксперимента была составлена матрица планирования, согласно которой изготовлены образцы пенобетона с учетом выполненного анализа и выбраны оптимальные составы, представленные в таблице 6.

Таблица 5 – Условия планирования экспериментов с пенобетоном

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	–1	0	1	
В/Т	X1	0,45	0,5	0,55	0,05
ТМТ600, кг	X2	1,04	2,08	3,12	1,04
Пенообразователь, кг	X3	0,45	0,9	1,35	0,45

Примечание. Состав рассчитан на 1 м³ смеси.

На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии для построения номограмм зависимости прочности на сжатие и плотности:

$$Y_1 = a_1 + a_2x_1 + a_3x_2 + a_4x_3;$$

$$Y_2 = a_1 + a_2x_1 + a_3x_2 + a_4x_3 + [a_5(x_1)^2 + a_6(x_2)^2 + a_7(x_3)^2 + a_8x_1x_2 + a_9x_2x_3 + a_{10}x_1x_3].$$

Таблица 6 – Составы пенобетонных смесей на 1 м³

Составы пенобетона	Расход цемента, кг	Расход песка, кг	Расход воды, л	Расход пенообразователя Бенотех ПБ-С, л	Расход добавки ТМТ600, кг	Расход золы-уноса, кг
Контрольный состав	416,00	212,11	318,18	0,90	—	—
Состав пенобетона с ТМТ600	374,40	212,11	308,18	0,90	2,08	—
Состав пенобетона с золой-уносом	413,92	212,11	318,18	0,90	—	41,60

С использованием полученных уравнений регрессии были построены номограммы зависимостей плотности и предела прочности пенобетона при сжатии (рисунок 6).

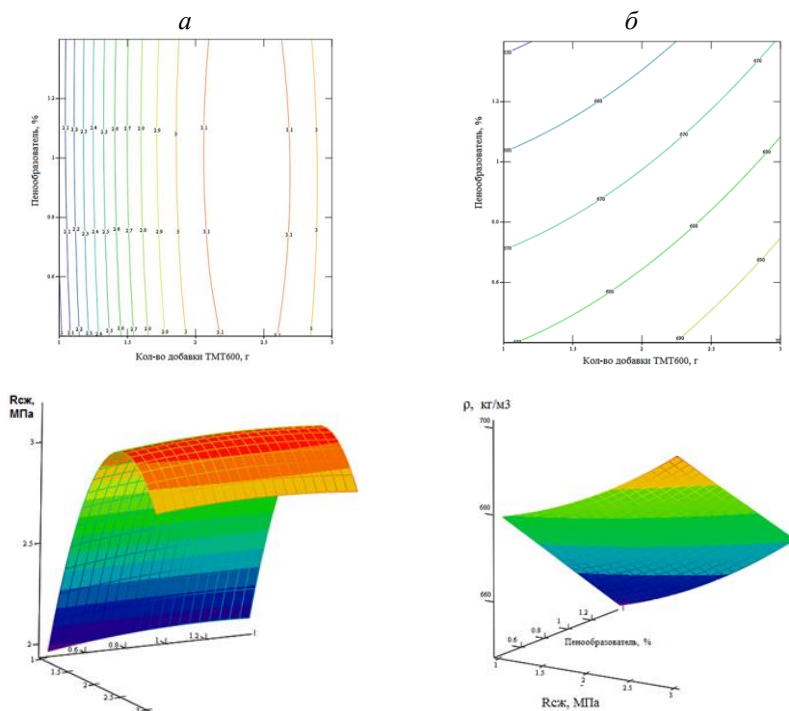


Рисунок 6 – Номограммы зависимости предела прочности при сжатии (а) и плотности пенобетона (б)

В технологиях изготовления стеновых изделий из пенобетонных смесей важной характеристикой является время распалубки отформованных изделий, которое может быть установлено по показателям пластической прочности. Данная характеристика используется при управлении процессами структурообразования и разработке технологических регламентов во время проведения пенобетонных работ (рисунок 7). Из полученных результатов исследований можно сделать вывод, что пенобетонные смеси с добавками в начальные сроки твердения имеют более высокие показатели пластической прочности в сравнении с контрольными составами. У образцов с добавкой ТМТ600 через 3 ч твердения пластическая прочность увеличивается до 65 %, а с золой-уносом – до 39 %. Увеличение пластической прочности образцов пенобетона с добавками объясняется повышением плотности упаковки частиц цементной матрицы (см. главу 3).

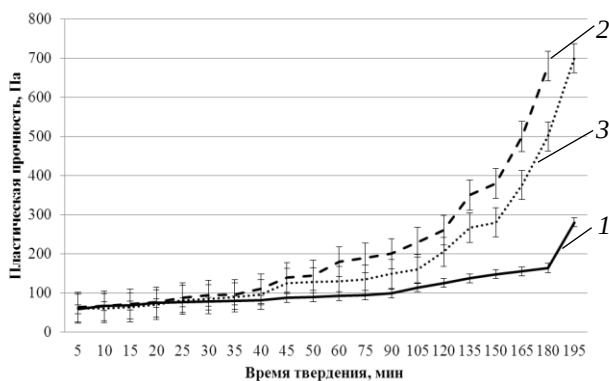


Рисунок 7 – Пластическая прочность пенобетонной смеси:
1 – контрольный состав; 2 – состав пенобетона с ТМТ600;
3 – состав пенобетона с золой-уносом

По результатам исследования зависимости прочности при сжатии образцов пенобетона с добавками от времени твердения установлено повышение прочности при сжатии пенобетона с добавкой ТМТ600 в возрасте 3 сут в 3 раза, 7 суток – на 62,3 %, в 28 сут – на 49,7 % в сравнении с контрольным составом (рисунок 8). Предел прочности при сжатии пенобетона с золой-уносом в 7-суточном возрасте равен 1,43 МПа, что на 7,7 % ниже прочности пенобетона контрольного состава, а в 28 сут – 2 МПа (на 17,5 %).

Сформированная структура исследуемых образцов пенобетона представлена на рисунке 9. Основным отличительным признаком пенобетона с добавкой ТМТ600 является его более однородная пористая структура, поры равномерно заполняют объем материала, преобладают закрытые поры размером 0,5 мм. Межпоровые перегородки тонкие, но плотные. Упрочнение перегородо-

док подтверждается результатами испытаний пенобетона на прочность при сжатии. В пенобетоне без добавок поры расположены хаотично, встречаются капиллярные поры, основания пор трещинообразные, целостность перегородок пор нарушена. При такой структуре пор повышается вероятность увеличения теплопередачи, что позволяет прогнозировать снижение теплозащитной способности пенобетона.

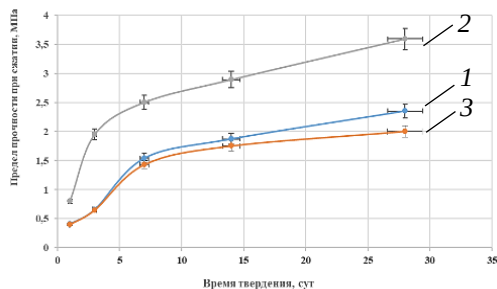


Рисунок 8 – Зависимость прочности при сжатии образцов пенобетона с добавками от времени твердения:
1 – контрольный состав;
2 – состав пенобетона с TMT600; 3 – состав пенобетона с золой-уносом

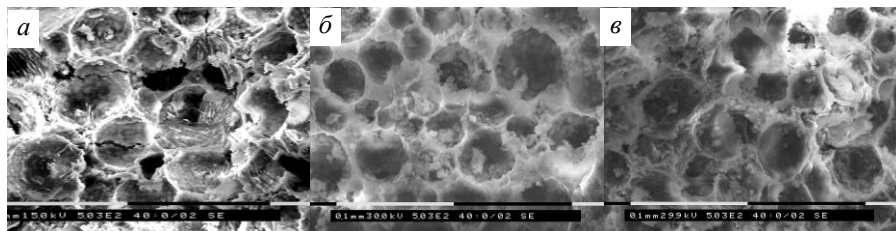


Рисунок 9 – Структура пористости образцов пенобетона:
а – контрольный; б – с добавкой TMT600; в – с золой-уносом

Методом компьютерной томографии проведен анализ внутренней пористой структуры образцов пенобетона (рисунок 10). Поры отображаются белым цветом. На рисунке отчетливо интерпретируются: отдельные крупные поры размером 3–5 мм и поры 1–2 мм; мелкопористые фрагменты 0,5 мм и менее; цепочки пор, которые могут превратиться в трещины; крупные фрагменты высокой плотности. По результатам анализа реконструированных изображений сечений испытанных образцов сделаны выводы, что у пенобетона с содержанием 0,5 % добавки TMT600 до 60 % – поры с размером 0,5 мм, с золой-уносом и у контрольного состава 37 % – 1,5 мм, максимальный диаметр пор – до 5,5 мм.

Методом компьютерной томографии, в соответствии с разработанной программой для ЭВМ № 2018617893, осуществлена оценка степени однородности пенобетона по локальным объемам (ЛО). На рисунке 11, а приведены результаты оценки степени однородности по средним значениям для контрольных образцов пенобетона и пенобетона с дисперсными добавками, на ри-

сунке 11, δ – по средним значениям пористости по локальным объёмам, на рисунке 11, ϵ – по среднеквадратическим отклонениям пористости σ_{η} по локальным объёмам.

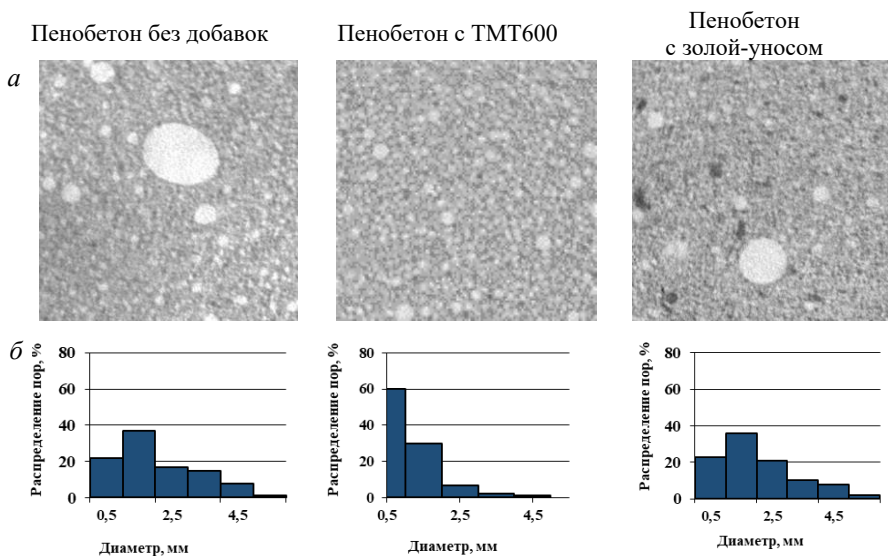


Рисунок 10 – Анализ степени однородности пенобетона по пористости:
 а – реконструированные изображения сечений; б – распределение пор по диаметру

По результатам исследований структуры образцов пенобетона с добавкой TMT600 методом рентгеновской компьютерной томографии установлены: более высокий уровень среднего значения пористости, меньшее значение среднеквадратического отклонения по локальным объёмам, а также сужение плотности распределения анализируемой случайной величины по мере увеличения размера локального объёма у пенобетона, что позволяет сделать вывод о более однородной поровой структуре пенобетона.

В таблице 7 приведены сводные данные физико-механических показателей пенобетона разработанных составов в 28-суточном возрасте, рекомендованных для промышленного использования. Приведенные в таблице 7 показатели качества соответствуют современным технико-экономическим требованиям к пенобетонам, целям и задачам диссертационной работы. При введении в пенобетонную смесь добавки TMT600 при сохранении марки по средней плотности D700 повышаются класс пенобетона по прочности на сжатие до B2,5, марка по морозостойкости – до F75, теплопроводность уменьшается до 0,11 Вт/м·°С, усадка при высыхании – до 1,7 мм/м при снижении коэффициента вариации по плотности до 0,62.

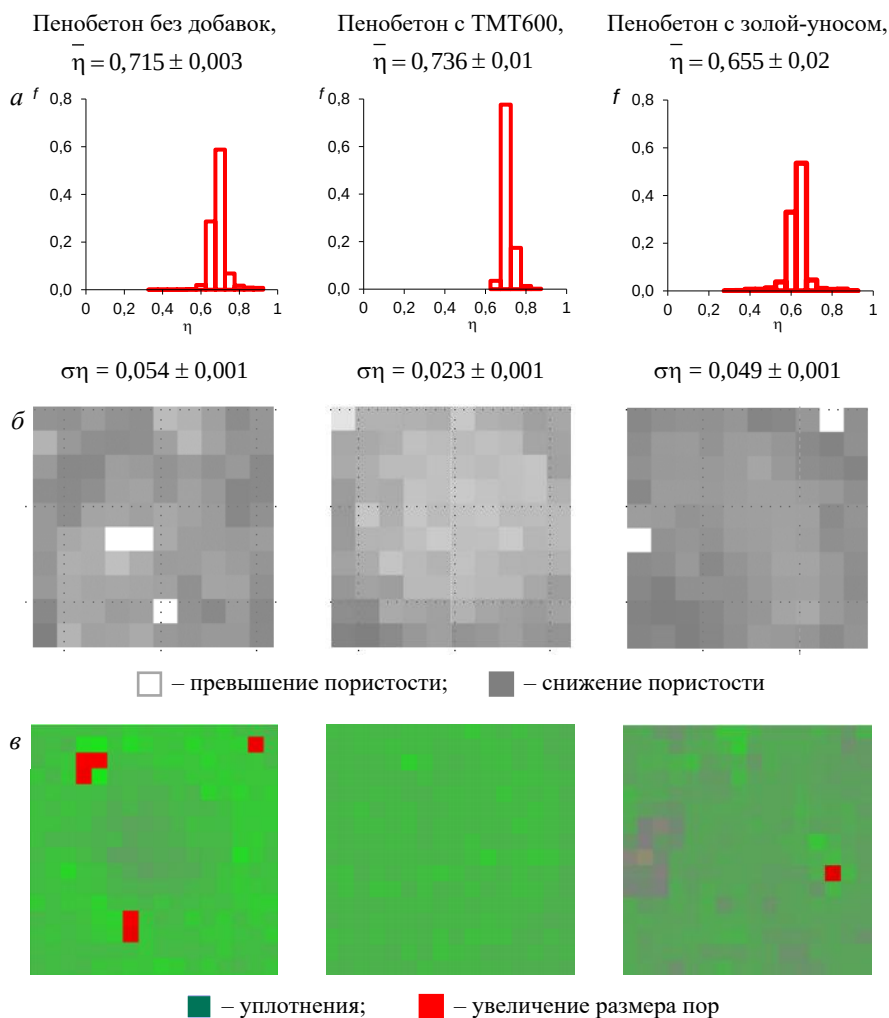


Рисунок 11 – Зависимость информативных параметров пористости пенобетона от размеров локальных объёмов:

a – оценки степени однородности по средним значениям; b – степень однородности по средним значениям пористости по локальным объёмам; b – степень однородности по среднеквадратическим отклонениям пористости $\sigma\eta$ по локальным объёмам

При введении в состав пенобетона золы-уноса снижается прочность пенобетона на 17 %, в сравнении с контрольным составом, и существенных улучшений коэффициентов вариации по плотности и прочности на сжатие не наблюдается.

Таблица 7 – Физико-механические показатели разработанных пенобетонов

Показатели	Пенобетон	Пенобетон с золой-уносом	Пенобетон с ТМТ 600
Марка по средней плотности	D700	D700	D700
Среднее значение по плотности, кг/м ³	675	670	633
Коэффициент вариации по плотности, %	2,5	1,56	0,62
Класс по прочности на сжатие	B1,5	B1,5	B2,5
Среднее значение по прочности, МПа	2,35	1,95	3,58
Коэффициент вариации по прочности, %	5,53	4,58	0,59
Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/м·°C	0,14	0,14	0,11
Марка по морозостойкости	F50	F35	F75
Водопоглощение по массе, %	50,4	39,2	34,5
Усадка при высыхании, мм/м	3	3	1,7

В пятой главе приведены технологическая схема и технико-экономический расчет эффективности производства пенобетона неавтоклавного твердения. Дан расчет экономической эффективности применения разработанного пенобетона в стеновых конструкциях зданий.

Проведенные опытно-промышленные испытания в ООО «Золотые ворота» (г. Томск) подтвердили достоверность научных результатов и эффективность разработанной технологии приготовления пенобетона неавтоклавного твердения с высокой однородностью параметров качества.

Важным требованием в индивидуальном малоэтажном строительстве жилья является использование эффективных строительных материалов и технологий, современных экономичных конструктивных решений, направленных на повышение качества жилья и на снижение использования топливно-энергетических ресурсов. В работе выполнен сравнительный анализ энергетической эффективности строительства стеновых конструкций двухэтажных домов, выполненных из неавтоклавного пенобетона с ТМТ600 (таблица 8). Район постройки жилого дома – город Томск.

Таблица 8 – Применение пенобетона в стеновых конструкциях

Материал	Теплосопrotивление, (м ² ·°C)/Вт
Вариант 1 Штукатурная смесь (внешняя отделка): $\delta = 0,01 \text{ м}, \lambda = 0,76 \text{ Вт/(м·°C)}$ Пенобетон D700: $\delta = 0,5 \text{ м}, \lambda = 0,145 \text{ Вт/(м·°C)}$ Штукатурная смесь (внутренняя отделка): $\delta = 0,03 \text{ м}, \lambda = 0,02 \text{ Вт/(м·°C)}$	5,12

Окончание таблицы 8

Материал	Теплосопротивление, (м ² ·°C)/Вт
Вариант 2 Штукатурная смесь (внешняя отделка): $\delta = 0,01$ м, $\lambda = 0,76$ Вт/(м·°C) Пенобетон с ТМТ600: D700 $\delta = 0,4$ м, $\lambda = 0,11$ Вт/(м·°C) Штукатурная смесь (внутренняя отделка): $\delta = 0,03$ м, $\lambda = 0,02$ Вт/(м·°C)	5,672

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что при применении пенобетона с добавкой ТМТ600 увеличивается сопротивление теплопередачи ограждающих конструкций. Во втором варианте данный показатель увеличился на 0,552 (м²·°C)/Вт. При обеспечении требуемого теплосопротивления ограждающей конструкции возможно уменьшение толщины стен, что приведет к снижению количества материалов и уменьшению стоимости 1 м² стеновой конструкции.

В **заключении** приведены основные итоги диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы представлены в следующих выводах:

1. Научно обосновано и экспериментально доказано, что введение термомодифицированной торфяной добавки ТМТ600 в водный раствор пенообразователя обеспечивает коагуляцию каналов Плато – Гиббса с формированием плотной упаковки твердых частиц в межпузырьковом пространстве, что приводит к повышению в 1,3 раза стойкости пенной структуры. При введении в пенный раствор золы-уноса происходит пеногашение, снижается кратность на 35 %, а стойкость пены – в 3,5 раза.

2. Установлено, что при модифицировании пенобетонной смеси добавкой ТМТ600 в количестве 0,5 % от массы цемента ускоряется процесс начального структурообразования, увеличивается пластическая прочность пенобетонной смеси через три часа твердения на 65 %, а золы-уноса в количестве 10 % – на 39 %. При введении в пенобетонную смесь добавки ТМТ600 повышается прочность пенобетона на 52,3 % с 2,43 МПа (В1,5) до 3,58 МПа (В2,5) при снижении коэффициента вариации с 5,53 до 0,59. Средняя плотность пенобетона с добавкой ТМТ600 снижается незначительно (на 6,6 %), при этом коэффициент вариации по средней плотности снижается с 2,5 до 0,62, что характеризует повышение однородности структуры пенобетона.

3. Установлено, что при модифицировании пенобетонной смеси золой-уносом в количестве 10 % наблюдается снижение прочности на 20,5 % у образцов пенобетона с 2,43 МПа (В1,5) до 1,95 МПа (В1,5) при незначительном

снижении коэффициента вариации с 5,53 до 4,58, а коэффициент вариации по средней плотности снижается с 2,5 до 1,56.

4. Установлены закономерности влияния рецептурно-технологических факторов на структуру и свойства пенобетона с термомодифицированной торфяной добавкой ТМТ600. Разработаны составы пенобетона с термомодифицированной торфяной добавкой ТМТ600 в количестве 0,5 % от массы цемента при сохранении марки по средней плотности D700, что обеспечивают эксплуатационные свойства: класс бетона B2,5, морозостойкость до F75, теплопроводность до $\lambda = 0,1$ Вт/м °С и получение однородной пористой структуры с размерами пор 0,5 мм (60 %).

5. Разработана методика оценки степени однородности пенобетона по пористости, по локальным объёмам методом компьютерной томографии, что позволяет установить влияние дисперсных добавок и технологических приемов на однородность структуры стенового материала. По результатам исследований структуры пенобетона с добавкой ТМТ600 установлены: высокий уровень среднего значения пористости, меньшее значение среднеквадратического отклонения по локальным объёмам, а также сужение плотности распределения анализируемой случайной величины по мере увеличения размера локального объёма, что позволяет сделать вывод о более однородной поровой структуре и стабильности его качества, в сравнении с контрольным составом и составом пенобетона с золой-уносом.

6. Разработаны технические условия и технологический регламент на изготовление блоков из пенобетонов, изготовленных из пенобетонной смеси с дисперсной термомодифицированной торфяной добавкой ТМТ600, проведена опытно-промышленная апробация по разработанным практическим рекомендациям и внедрение в производство пенобетонных блоков на ООО «Золотые ворота». Пенобетон, изготовленный на заводе по предложенной технологии и рецептуре, соответствует марке по средней плотности D700; классу по прочности на сжатие B2,5; марке по морозостойкости F75. Промышленные испытания составов и технологических приемов приготовления пенобетонной смеси и блоков подтвердили достоверность научных результатов и практических рекомендаций выполненной диссертационной работы.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Кудяков, А. И. Конструкционно-теплоизоляционные пенобетоны с термомодифицированной торфяной добавкой / А. И. Кудяков, Н. О. Копаница, **И. А. Прищепа**, С. Н. Шаньгин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1 (38). – С. 172–177.

2. Применение цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии при исследовании строительных конструкций и в строительном материаловедении / С. П. Осипов, В. А. Клименов, А. В. Батрагин,

А. М. Штейн, **И. А. Прищепа** // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 6 (53). – С. 116–127.

3. Компьютерная томография пенобетона / С. П. Осипов, **И. А. Прищепа**, А. И. Кудяков [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 2 (38). – С. 146–152. – DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-146-152

4. Структурообразование цементного камня с добавкой термомодифицированного торфа / Н. А. Цветков, Ю. С. Саркисов, Н. П. Горленко **И. А. Прищепа**, О. А. Зубкова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 12 (720). – С. 52–61.

5. Кудяков, А. И. Цементный пенобетон неавтоклавного твердения с термомодифицированной торфяной добавкой / А. И. Кудяков, **И. А. Прищепа**, С. П. Осипов // Строительные материалы. – 2022. – № 1–2. – С. 40–49. – DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-40-49

В изданиях, индексируемых в международной базе цитирования SCOPUS и Web of Science

6. Foam concrete of increased strength with the thermomodified peat additives / A. I. Kudyakov, Ju. S. Sarkisov, N. O. Kopanitsa, A. V. Kasatkina, **I. A. Prischepa** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 71. – № 1. – DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012012

7. Kudiakov, A. Foam concrete with porous mineral and organic additives / A. Kudiakov, **I. Prischepa**, M. Tolchennickov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Advanced Materials in Construction and Engineering, Tomsk, 15–17 октября 2014 г. – Tomsk, 2015. – P. 012016. – DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012016

8. Kudyakov, A. Quality Control of Concrete at the stage of designing its Composition and technology / A. Kudyakov, **I. Prischepa**, D. Kiselev, B. Prischepa // AIP Conference Proceedings 2. Сер. «Advanced Materials in Technology and Construction, AMTC 2015: Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Advanced Materials in Technology and Construction"». – 2016. – P. 070016.

9. Algorithms for modeling the formation and processing of information in X-ray tomography of foam materials / S. P. Osipov, **I. A. Prischepa**, S. V. Chakhlov [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – V. 57. – № 3. – P. 238–250. – DOI: 10.1134/S1061830921030050

10. **Прищепа, И. А.** Модифицирование неавтоклавного пенобетона торфяной добавкой ТМТ600 / И. А. Прищепа, А. В. Мостовщиков, Ю. С. Саркисов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 177–186. – DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3839

11. The role of water and aqueous solutions in the formation of induction periods of hydration and structure formation of cement stone / N. P. Gorlenko, B. I. Laptev, Yu. S. Sarkisov, V. A. Zhuravlev, G. N. Sidorenko, **I. A. Prishchepa** // Physics of Wave Phenomena. – 2023. – V. 31. – № 3. – P. 206–215. – DOI: 10.3103/S1541308X23030056.

12. Nanomodification of Non-Autoclaved Foam Concrete / **I. A. Prischepa**, Y. S. Sarkisov, N. P. Gorlenko [et al.] // Russ Phys J. – 2023. – V. 66. – P. 205–212. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02927-y>

13. Osipov, S. Algorithm of Estimation of the Degree of Porosity Homogeneity of Foamed Concretes by Local Volumes by X-ray Computed Tomography Method / S. Osipov, **I. Prischepa** // Materials. – 2023. – V. 16. P. 3244. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma16083244>

Международные и всероссийские конференции, периодические печатные издания

14. **Прищепа, И. А.** Влияние добавок на структурно-механические свойства пенобетона / И. А. Прищепа, М. В. Толченников, Б. А. Прищепа // Перспективные материалы в технике и строительстве (ПМТС-2013) : материалы Первой Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием, Томск, 21–25 октября 2013 г. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2013. – С. 383–385.

15. **Прищепа, И. А.** Влияние концентрации пенообразователя на кратность и стойкость пены / И. А. Прищепа, А. С. Антипова, М. В. Толченников, Б. А. Прищепа // Перспективные материалы в строительстве и технике (ПМСТ-2014) : материалы Международной научной конференции молодых ученых, Томск, 15–17 октября 2014 г. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. – С. 19–22.

16. **Прищепа, И. А.** Применение минеральных и органических добавок в производстве неавтоклавного пенобетона / И. А. Прищепа // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. – С. 1347–1349.

17. **Прищепа, И. А.** Цементный пенобетон с микропористыми минеральными и органоминеральными добавками / И. А. Прищепа, А. И. Кудяков // Вестник Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева. Часть 2. – 2016. – № 4 (113). – С. 496–499.

18. Толченников, М. В. Пенобетон с минеральными пористыми дисперсными добавками / М. В. Толченников, **И. А. Прищепа** // Избранные доклады 62-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. – С. 151–154.

19. Кудяков, А. И. Реологические свойства пеноцементных смесей / А. И. Кудяков, **И. А. Прищепа** // Эффективные рецептуры и технологии в строительном материаловедении : сборник Международной научно-технической конференции. – Новосибирск : Новосибирский государственный аграрный университет, 2017. – С. 136–139.

20. Кудяков, А. И. Пенобетон естественного твердения с микропористой зольной добавкой / А. И. Кудяков, **И. А. Прищепа**, Д. В. Шпаркович // Инвестиции, строительство, недвижимость как драйверы социально-экономического раз-

вития территории и повышения качества жизни населения : материалы IX Международной научно-практической конференции. В 2 частях. Часть 2 / под ред. Т. Ю. Овсянниковой, И. Р. Салагор. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 678–683.

21. Формирование структуры пенобетона с термомодифицированной торфяной добавкой в ранние сроки твердения / **И. А. Прищепа**, А. И. Кудяков, Ю. С. Саркисов [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Химия. – 2020. – № 18. – С. 35–46. – DOI 10.17223/24135542/18/4

22. Кудяков, А. И. Свойства пен с термомодифицированными торфяными добавками для пенобетона неавтоклавного твердения / А. И. Кудяков, **И. А. Прищепа** // Современные ресурсосберегающие материалы и технологии: перспективы и применение: материалы Международного симпозиума. – Новосибирск, 2020. – С. 78–83.

23. **Прищепа, И. А.** Проектирование состава неавтоклавного пенобетона с термомодифицирующими торфяными добавками методом математического планирования / И. А. Прищепа // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 7 томах / под ред. И. А. Курзиной, Г. А. Вороновой. – Томск, 2021. С. 74–76.

25. Кудяков, А. И. Технология цементного пенобетона с дисперсными пористыми добавками / А. И. Кудяков, **И. А. Прищепа** // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : материалы XIII Международной научно-практической конференции, Томск, 28 февраля – 02 марта 2023 г. В 2 частях. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 399–405.

Патенты на изобретения и полезные модели

26. Патент № 2514069 Российская Федерация, МПК C04B 38/10 (2006.01). Сырьевая смесь для приготовления пенобетона : № 2012150707/03 : заявл. 26.11.2012 : опубл. 27.04.2014 / **Прищепа И. А.**, Кудяков А. И., Копаница Н. О., Попов И. И., Иванова А. Б. – Бюл. № 12.

27. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2018617893. Оценка степени однородности пенобетона по локальным объёмам (ЛО) методом компьютерной томографии : заявл. 15.05.2018 : опубл. 03.07.2018 / **Прищепа И. А.**, Осипов С. П., Осипов О. С., Прищепа А. Б.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВО «ТГАСУ». – Бюл. № 7.

Подписано в печать 05.07.2024 Формат 60×84/16.

Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Уч. изд. л. 1,26.

Тираж 100 экз. Заказ № 71.

Изд-во ТГАСУ, 643003, г. Томск, пл. Соляная, 2

Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ТГАСУ.

634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.