



Коринчук Михаил Александрович

**РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА
СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АРБОЛИТА МЕТОДАМИ ЦИФРОВИЗАЦИИ
РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ**

2.1.5 Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: **Красильников Игорь Викторович**, доктор технических наук, доцент, советник РААСН

Официальные оппоненты: **Стельмах Сергей Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», заведующий кафедрой «Строительство уникальных зданий и сооружений»

Сергеева Ирина Владимировна, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», доцент кафедры «Основы архитектуры и художественных коммуникаций»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

Защита состоится «18» сентября 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.300.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, Иваново, пр. Шереметевский, 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета (www.ivgpu.ru).

Автореферат разослан «___» августа 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Касьяненко Наталья Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Арболит занимает устойчивую нишу на рынке энергоэффективных строительных материалов для малоэтажного строительства благодаря уникальному сочетанию низких теплопроводности и плотности, высокой паропроницаемости и экологичности. Однако широкое применение арболита сдерживается его ключевым недостатком – нестабильностью геометрических размеров и склонностью к трещинообразованию. Природа данного дефекта следствие гетерогенной структуры композита: гигроскопичная древесная щепа и цементный камень по-разному реагируют на изменения влажности и температуры.

Актуальность диссертационного исследования обусловлена отсутствием в научной литературе полной математической модели, описывающей нестационарный взаимосвязанный тепло- и влагоперенос при термовлажностной обработке (ТВО) строительных изделий из арболита как двухфазного органоминерального капиллярно-пористого тела, а также необходимостью создания научно обоснованных методов управления режимом ТВО для уменьшения дефектообразования и снижения удельных энергозатрат. Решение данной задачи соответствует приоритетам Стратегии научно-технологического развития РФ в части ресурсо- и энергосбережения, развития зелёных строительных технологий и импортозамещения в сфере производства эффективных строительных материалов.

В современной производственной практике режимы ТВО и сушки арболитовых изделий регламентируются статичными, эмпирическими графиками. Применение таких режимов неизбежно приводит к формированию в теле блока критических градиентов температуры и влажности. Существующие технологии сушки арболитовых изделий базируются на эмпирических режимах, не учитывающих сопряжённый характер нестационарных процессов тепломассопереноса, эндо- и экзотермические эффекты гидратации и испарения, а также структурную неоднородность композита. Это приводит к повышенному энергопотреблению, браку по трещинообразованию и нестабильности физико-механических характеристик готовой продукции.

Разрешение данного противоречия требует отказа от эмпирического управления в пользу научно обоснованных адаптивных технологий. Это невозможно без создания математического аппарата, способного прогнозировать сопряженные нестационарные процессы тепломассопереноса с учетом нелинейной зависимости коэффициентов переноса от текущей влажности, эндо- и экзотермических эффектов гидратации, а также реальных граничных условий. В связи с этим, разработка методов цифровизации и создания «цифровых двойников» процессов ТВО для предиктивного контроля внутренних градиентов и предотвращения скрытого дефектообразования является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное значение для обеспечения качества и ресурсосбережения в промышленности строительных материалов.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы разработки и совершенствования технологии лёгких бетонов на основе органических заполнителей, в том числе арболита, формирования их структуры и эксплуатационных свойств отражены в трудах Ю.М. Баженова, В.Т. Ерофеева, И.Х. Наназашвили, С.В. Федосова, Е.В. Королева, С.А. Стельмаха, О.В. Тараканова, Е.М. Чернышова, С.С. Каприелова, В.Г. Батракова, В.И. Логаниной, А.П. Пичугина, Л.В. Закревской, Б.И. Булгакова, А.С. Жива, Б.Р. Исакулова, Ю. А. Соколовой, А. В. Волженского и др. В научных работах авторов доказана экологическая и экономическая эффективность использования древесного и растительного вторичного сырья, изучены методы минерализации и термомодификации заполнителя, подобраны оптимальные составы композитов и модифицирующие добавки, исследованы физико-механические и теплофизические свойства готовых материалов.

Модифицированию структуры легких бетонов из неорганических вяжущих, ускорению процесса твердения бетонов, улучшению физических, механических и

химических свойств композитов на основе цементных бетонов посвящены исследования Ю.М. Баженова, Н.О. Копаницы, М.А. Гончаровой, Д.Н. Коротких, В.С. Лесовика, Ю. А. Соколовой, Н.В. Любомирского, В.И. Калашникова, С.С. Каприелова, Е.В. Королева, Ю.В. Пухаренко, О.В. Артамоновой, В.В. Строковой, В.И. Логаниной, П.Н. Курочка, Г.В. Несветаева, Р.С. Федюка, И.В. Ерофеевой и др.

Зарубежный опыт создания и исследования строительных материалов с использованием органических заполнителей и древесных отходов отражен в трудах W. Ahmed, Q. Al-Kaseasbeh, M. Bederina, F. Berger, O. Bourzik, S. Dias, A.A.M. Fadiel, Firesenay Zerabruk Gigar, Q. Fu, S.A. Hafidh, Zh. Ilmaliyev, D. Maier, M.J. Morales-Conde, S. Pescari, A. Quiroga, D. Smith, T.S. Thandavamoorthy, D. Zwicky. В работах авторов исследованы физико-механические свойства, теплопроводность и долговечность древесно-цементных композитов (wood-cement composites, wood concrete), изучено влияние гидрофобизирующих добавок и модификации древесины на адгезию к цементной матрице.

Фундаментальные основы теории тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах, процессы сушки и математического моделирования сопряженных процессов разработаны в исследованиях А.В. Лыкова, Ю.А. Михайлова, С.П. Рудобашты, Э.М. Карташова, С.В. Федосова, В.В. Кафарова, П.Г. Романкова, В.Ф. Фролова, В.Н. Блиничева, В.Н. Кисельникова, А.С. Гинзбурга, К.Н. Белоногова, Б.С. Сажина, А.А. Долинского, Г.С. Шубина, В.Г. Гагарина, А.А. Титунина, В.Г. Котлова, А.М. Ибрагимова, а также зарубежные исследователи: Т. Шервуд, О. Кришер, Г. Карслоу, Д. Егер, А. Маджумдар, Ч. Струмилло, Л.И. Хайфец и др. В трудах авторов созданы математические аппараты для описания нестационарных процессов тепло- и массопереноса, методы идентификации коэффициентов переноса, аналитические и численные методы решения краевых задач, включая численно-аналитический метод микропроцессов.

Проведенный анализ научной литературы показал, что, несмотря на значительный объем исследований, посвященных составу и свойствам арболита, вопросы управления нестационарными процессами тепломассопереноса при ТВО и сушки изделий остаются недостаточно изученными. В большинстве работ основное внимание уделяется конечным эксплуатационным свойствам затвердевшего материала, тогда как кинетика влагоудаления, формирование нестационарных температурных и влажностных полей, а также возникновение внутренних напряжений в процессе сушки не получили системного математического описания. До настоящего времени не сформулирована и не решена полная нестационарная задача сопряженного тепломассопереноса при ТВО арболита как двухфазного органоминерального композита с одновременным учетом экзотермического тепловыделения при гидратации, эндотермического эффекта испарения, нелинейной зависимости коэффициентов переноса от текущей влажности и реальных асимметричных граничных условий. Отсутствуют научно обоснованные методы цифровизации и алгоритмы адаптивного управления режимами ТВО на основе концепции «цифрового двойника», позволяющие предиктивно оценивать внутренние градиенты для предотвращения скрытого микротрещинообразования.

Диссертационное исследование выполнено в рамках научной школы академика РААСН С.В. Федосова, основными результатами которого являются фундаментальные математические модели нестационарного тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых средах и численно-аналитические методы их решения, применяемые при различных технологических процессах строительной индустрии.

Научная гипотеза. Управление кинетикой структурообразования, твердения и сушки строительных изделий из арболита на основе предиктивного математического моделирования сопряженных нестационарных процессов тепломассопереноса с учетом нелинейной зависимости феноменологических коэффициентов переноса от текущей влажности, эндо- и экзотермических эффектов гидратации и испарения, а также асимметрии

граничных условий (проницаемости технологических оснований), позволит минимизировать критические внутренние градиенты температуры и влажности. Это, в свою очередь, обеспечит предотвращение скрытого микротрещинообразования в переходной зоне «древесная щепка – цементная матрица», сохранение структурной целостности композита и повышение его прочностных характеристик при одновременной оптимизации энергозатрат на этапе термовлажностной обработки.

Объектом исследования являются технологии производства, режимы термовлажностной обработки и сушки строительных изделий из арболита.

Предмет исследования: закономерности формирования нестационарных полей температуры и влажности в арболите, влияние экзотермических эффектов гидратации на структурную целостность композита, а также алгоритмы адаптивного цифрового управления режимами ТВО для минимизации внутренних градиентов и предотвращения скрытого трещинообразования.

Цель диссертационного исследования: разработка адаптивных технологий производства строительных изделий из арболита на основе математического моделирования сопряженных процессов нестационарного теплопереноса и цифрового управления режимами термовлажностной обработки для обеспечения их структурной целостности и повышения прочностных характеристик.

Для достижения цели были определены задачи:

- выполнить анализ научно-технической литературы в области технологии производства и теплофизики древесно-цементных композитов для выявления закономерностей структурообразования арболита, оценки существующих методов моделирования процессов ТВО и обоснования необходимости цифровизации их режимов;

- организовать и провести натурный эксперимент по мониторингу нестационарных полей температуры и влажности строительных изделий из арболита в процессе ТВО, установить дискретные пространственно-временные закономерности распределения температуры и влажности;

- идентифицировать численные значения и функциональные зависимости коэффициентов тепло- и массопереноса, а также мощности внутренних физико-химических источников и стоков теплоты и влаги в зависимости от текущей влажности и температуры композита;

- адаптировать и обосновать математический аппарат на основе численно-аналитического метода микропроцессов для решения нелинейных краевых задач тепло- и теплопроводности с переменными коэффициентами переноса;

- сформулировать и решить краевую задачу нестационарного теплопереноса в блоке арболита при ТВО в металлической опалубке с учетом экзотермических эффектов гидратации цемента и нелинейной зависимости коэффициентов переноса от влажности;

- сформулировать и решить краевую задачу нестационарного влагопереноса в блоке арболита при ТВО в металлической опалубке с учетом объемного поглощения влаги при гидратации портландцементных минералов и асимметричных граничных условий;

- разработать математические модели нестационарного влагопереноса для различных технологических схем сушки арболитовых изделий после распалубки (на проницаемых, непроницаемых и частично проницаемых основаниях) с целью оценки рисков усадочного трещинообразования;

- разработать технологию и алгоритм адаптивного цифрового управления режимами ТВО на основе концепции «цифрового двойника» для предиктивного контроля внутренних градиентов температуры и влажности, а также предотвращения скрытого дефектообразования;

- выполнить производственную апробацию и оценить эффективность внедрения разработанных адаптивных режимов ТВО на прочность и структурную целостность

арболитовых изделий в условиях реального производства.

Научная новизна:

1. Проведённым теоретико-экспериментальным анализом установлено, что на кинетику твердения и структурную целостность изделий из арболита при термовлажностной обработке (ТВО) определяющее влияние оказывают нестационарные градиенты температуры и влагосодержания, инициирующие встречные потоки теплоты и влаги, а также суперпозиция тепловыделения и влагопоглощения вследствие гидратации портландцементных минералов.

2. На основе математического аппарата численно-аналитического метода микропроцессов сформулирована и решена полная нестационарная задача сопряжённого тепломассопереноса при ТВО арболита как двухфазного органоминерального капиллярно-пористого композита. В отличие от существующих моделей, в математической постановке одновременно учтены: экзотермическое тепловыделение при гидратации портландцементных минералов, нелинейная зависимость коэффициентов тепло- и массопроводности от текущих значений влажности, а также реальные граничные условия технологических схем сушки в заводских условиях (в металлической опалубке и на настилах с различной проницаемостью).

3. Разработана и реализована оригинальная методика экспериментального исследования нестационарного температурно-влажностного поля при ТВО блока арболита-сырца в металлической опалубке. На основе длительных натурных измерений установлены пространственно-временные закономерности изменения полей температуры и влажности по толщине блока арболита-сырца при тепловой обработке до $+40^{\circ}\text{C}$. Получены функциональные зависимости коэффициентов температуро- и массопроводности, теплопроводности, удельной теплоёмкости, плотностей потоков тепла и влаги, а также мощностей объёмного тепловыделения и влагопоглощения при гидратации от текущей влажности образца в диапазоне 49...20 %. Экспериментальные данные послужили основой для верификации разработанной математической модели.

4. Теоретически обоснована и количественно подтверждена взаимосвязь между кинетикой нестационарного тепломассопереноса, асимметрией профиля влажности и риском усадочного трещинообразования арболитовых изделий. На основе аналитического решения задачи нестационарной массопроводности с применением безразмерных критериев Фурье и Кирпичёва доказано, что сушка на непроницаемом основании формирует максимум влажности в придонной зоне, увеличивая градиенты усадочных напряжений, тогда как применение частично проницаемых настилов обеспечивает снижение времени сушки на 25...30 % при сохранении структурной однородности. Полученные закономерности создают научную базу для прогнозирования полей температуры и влажности, а также проектирования заводских режимов ТВО изделий из арболита.

5. Предложен метод адаптивного цифрового управления режимами ТВО на основе концепции «цифрового двойника», отличающаяся тем, что в реальном времени на основе предиктивной модели оцениваются внутренние градиенты температуры и влажности, и при их приближении к критическим порогам автоматически формируются корректирующие воздействия, предотвращающие скрытое трещинообразование в контактной зоне «древесная щепка – цементная матрица».

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается и подтверждается следующими факторами: исследования опираются на фундаментальные законы термодинамики, теории тепломассопереноса академика АН СССР А.В. Лыкова и численно-аналитические методы математической физики (метод микропроцессов научной школы академика РААСН С.В. Федосова); натурные эксперименты и физико-механические испытания проводились с применением сертифицированного оборудования и поверенных приборов (термоэлектрические

преобразователи ТХК, игольчатый влагомер AQ-M20SO1, гидравлический пресс ИП-1250М) в строгом соответствии с требованиями действующих ГОСТ; репрезентативностью массива данных; адекватность разработанной цифровой модели сопряженного тепломассопереноса подтверждена сопоставлением расчетных данных с результатами независимого натурального эксперимента (оценка по критерию согласия Пирсона показала высокую достоверность).

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научных представлений о физике сопряженных нестационарных процессов тепломассопереноса в двухфазных органоминеральных капиллярно-пористых композитах. Впервые для арболита экспериментально идентифицированы и математически описаны функциональные зависимости феноменологических коэффициентов переноса (температуро- и массопроводности, теплопроводности), а также мощностей внутренних физико-химических источников тепла и влаги от текущей влажности и температуры композита. Адаптирован численно-аналитический метод микропроцессов для решения нелинейных краевых задач тепло- и влагопроводности с переменными коэффициентами и асимметричными граничными условиями, что позволяет сводить сложные нестационарные задачи к последовательности линейных подзадач с минимальной погрешностью накопления. Теоретически обоснована и количественно подтверждена взаимосвязь между кинетикой нестационарного тепломассопереноса, асимметрией профилей влажности и риском усадочного трещинообразования в переходной зоне «древесная щепка – цементная матрица».

Практическая значимость определяется возможностью перехода от эмпирического управления режимами ТВО к научно обоснованному адаптивному цифровому регулированию. Разработан и реализован алгоритм адаптивного цифрового управления режимами ТВО на основе концепции «цифрового двойника», позволяющий в реальном времени прогнозировать внутренние градиенты и предотвращать трещинообразование. Сформулированы технологические рекомендации по организации сушки изделий после распалубки: доказано, что применение частично проницаемых решетчатых настилов вместо сплошных непроницаемых поддонов обеспечивает снижение времени сушки на 25...30 % при сохранении структурной однородности.

Разработанный математический аппарат обладает универсальностью и может быть масштабирован для оптимизации режимов сушки и твердения других капиллярно-пористых строительных композитов на основе органических заполнителей.

Методология и методы диссертационного исследования. Методологическую базу исследования составили фундаментальные положения термодинамики, физической химии силикатов, теории тепломассопереноса и численно-аналитические методы математической физики.

Для решения поставленных задач применялся комплекс взаимодополняющих методов. Теоретические методы: системный анализ научно-технической литературы; математическое моделирование сопряженного тепломассопереноса; формулировка и аналитическое решение краевых задач в безразмерных переменных с использованием критериев подобия (Фурье, Кирпичева, Померанцева). Экспериментальные методы: натурный мониторинг нестационарных полей температуры и влажности в теле арболитового блока с применением поверенного оборудования в соответствии с требованиями ГОСТ. Методы идентификации и обработки данных: расчет эффективных феноменологических коэффициентов переноса и мощностей внутренних источников по экспериментальным профилям распределения потенциалов; статистическая обработка результатов с применением линейной и полиномиальной регрессии (оценка достоверности по критерию детерминации). Верификация моделей: оценка адекватности разработанной цифровой модели путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных с использованием критерия

согласия Пирсона. Производственные методы: сравнительные испытания контрольных и опытных партий арболитовых блоков в условиях реального производства («Арбоград» (ИП Сосновики И.И.), г. Иваново) для подтверждения эффективности разработанных адаптивных режимов ТВО.

Положения, выносимые на защиту:

1. Физико-химические закономерности тепломассопереноса в арболите. Установлено, что кинетика структурообразования и сушки арболита лимитируется сопряженным характером нестационарного тепло- и массопереноса, сопровождающегося экзотермическим тепловыделением и поглощением влаги при гидратации цемента. Идентифицированы нелинейные зависимости коэффициентов тепло- и массопроводности, а также мощностей внутренних источников и стоков от текущей влажности композита.

2. Математический аппарат моделирования нестационарных процессов. Адаптирован метод микропроцессов для решения нелинейных краевых задач тепло- и влагопроводности в двухфазном органоминеральном композите с переменными коэффициентами переноса и асимметричными граничными условиями (в стальной опалубке и на настилах с различной проницаемостью), что позволяет прогнозировать пространственно-временные поля температуры и влажности с высокой точностью (подтверждено критерием Пирсона).

3. Механизм формирования скрытых дефектов. Теоретически и экспериментально доказано, что визуальный контроль не выявляет скрытую микротрещиноватость, инициируемую критическими градиентами температуры и влажности при форсированных режимах ТВО. Установлено, что накопление влаги в придонной зоне на непроницаемых поддонах генерирует усадочные напряжения в контактной зоне «щепа-цемент», снижая прочность блока.

4. Технология адаптивного цифрового управления и рациональные схемы сушки. Разработан алгоритм «цифрового двойника» для предиктивного управления режимами ТВО, автоматически корректирующий параметры камеры ТВО при приближении градиентов к критическим порогам. Обосновано, что применение частично проницаемых решетчатых настилов после распалубки снижает время сушки на 25...30 % и минимизирует риск трещинообразования.

5. Результаты производственной апробации. Внедрение разработанных адаптивных режимов ТВО на предприятии «Арбоград» (ИП Сосновики И.И.), г. Иваново позволило устранить причину скрытого дефектообразования, обеспечить отсутствие видимого брака и повысить предел прочности арболита при сжатии (с 1,5 до 1,75 МПа) при высокой структурной однородности изделий.

Апробация работы: результаты диссертационного исследования представлены и рассмотрены на Международной межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые - развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК)» г. Иваново, 2019, 2022, 2023, 2026 гг.; Национальной научно-практической конференции с международным участием «Экологические аспекты современных городов» г. Иваново, 2023, 2025; Международной научно-практической конференции «Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование», г. Иваново, 2023, 2024, 2026 гг.; IX-ой Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти академика РААСН Чернышова Е.М. «Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт. Материалы» г. Тамбов, 2022 г.; IV Всероссийской научно-технической конференции молодых исследователей (с международным участием) «Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности» г. Волгоград, 2017 г.; VIII Межрегиональном семинаре «Экологические аспекты современных городов» г. Иваново, 2022; XII International Scientific and Practical Forum - «Environmentally sustainable cities and settlements: problems and solutions» (ESCP-2023) Moscow, Hanoi, 2023; XXVI International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2023) Tashkent, 2023.

Внедрение результатов исследований. Разработанные адаптивные режимы ТВО внедрены в производственный процесс предприятия «Арбоград» (ИП Сосновиков И.И., г. Иваново, акт о внедрении от 02.04.2026). Внедрение результатов исследований и разработок позволило: снизить риск образования температурно-усадочных трещин и коробления за счёт контроля градиентов температуры и влажности в блоках; адаптировать режимы тепловой обработки к сезонным изменениям климатических параметров (температура, относительная влажность, скорость воздушного потока); сократить продолжительность цикла сушки примерно на 15 % при использовании частично проницаемых поддонов; снизить удельные энергозатраты на тепловую обработку за счёт расчётного обоснования минимально необходимых параметров теплоносителя.

Результаты научных исследований, представленные в диссертационной работе внедрены в учебный процесс кафедры строительства и инженерных систем ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Строительные материалы», «Механика материалов и основы конструирования»; «Техническая термодинамика и тепломассообмен»; «Композиционные материалы» для обучения бакалавров направления 08.03.01 Строительство и магистров направления 08.04.01 Строительство (акт о внедрении от 12.02.2026).

Личный вклад автора. Автор, совместно с научным руководителем, сформулировал цели и задачи, выбрал объект и методы исследований, разработал теоретическую концепцию; организовал и лично участвовал в проведении экспериментальных исследованиях тепло- и влагопереноса; обработал и проанализировал полученные результаты. В совместных работах, выполненных в соавторстве академиком РААСН, д.т.н., профессором С.В. Федосовым и членом-корреспондентом РААСН, д.т.н., профессором В.Е. Румянцевой, к.т.н., доцентом И.А. Красильниковой и научным руководителем, автор лично участвовал в организации и проведении натурных обследований, мониторинге нестационарных полей температуры и влажности, идентификации феноменологических коэффициентов переноса и обсуждении полученных результатов.

Область исследований соответствует **паспорту специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия** в части направления исследований: п. 2. Разработка математических моделей физико-механических, физико-химических, биологических, гидромеханических и тепломассообменных процессов, оптимизирующих параметры структуры, режимы изготовления и свойства строительных материалов и изделий; п.7. Развитие, совершенствование и разработка новых энергосберегающих и экологически безопасных технологических процессов и оборудования для получения строительных материалов и изделий различного назначения; п.9. Разработка составов и совершенствование технологий изготовления эффективных строительных материалов и изделий с использованием местного сырья и отходов промышленности, в том числе повторного использования материалов от разборки зданий и сооружений; п. 14. Развитие технологии получения сборных строительных изделий, включая разработку составов, способов отверждения, самовосстановления и т.д., позволяющих повысить их качество и (или) адаптировать к условиям эксплуатации.

Публикации. Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 16 научных публикациях, в том числе: 4 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, из которых 1 статья в научных журналах, индексируемых в международных реферативных базах данных Scopus, 1 статья в журнале, входящем в Russian Science Citation Index.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений; изложена на 221 странице машинописного текста, содержит 42 рисунка, 27 таблиц, список литературы из 258 наименования и 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

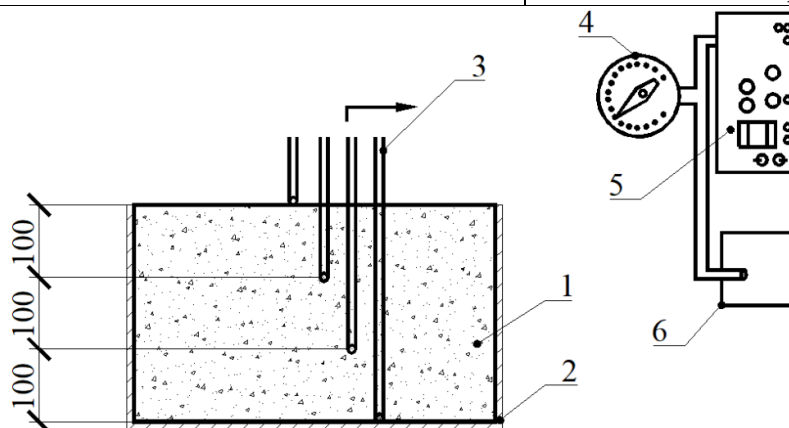
Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы цель и задачи исследования, основные элементы научной новизны, приведена общая характеристика работы, а также научные положения, которые выносятся на защиту, аргументирована практическая значимость, реализация и апробация результатов исследования.

В первой главе проведен комплексный анализ научно-технической литературы в области технологии производства и теплофизики древесно-цементных композитов. Арболит рассмотрен как двухфазный органоминеральный капиллярно-пористый композит, гетерогенная структура которого предопределяет его уникальные эксплуатационные свойства, но одновременно формирует риски нестабильности геометрических размеров и трещинообразования. Показано, что существующие эмпирические режимы термовлажностной обработки (ТВО) не учитывают сопряженный характер нестационарных процессов теплопереноса и экзотермические эффекты гидратации. Обоснована необходимость перехода к научно обоснованным адаптивным технологиям на основе математического моделирования и концепции «цифрового двойника».

Во второй главе описаны материалы и методики экспериментальных исследований. Для изготовления образцов использован портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, древесная дробленка и сульфат алюминия в качестве минерализатора. Базовый состав смеси, обеспечивающий нормативные характеристики для арболита, представлен в таблице 1. Разработана и апробирована оригинальная методика натурного мониторинга нестационарных полей температуры и влажности в теле блока-сырца. Схема дискретного измерения температурного поля по толщине образца с использованием термоэлектрических преобразователей представлена на рисунке 1. В качестве математического аппарата обоснован численно-аналитический метод микропроцессов, позволяющий сводить нелинейные краевые задачи с переменными коэффициентами переноса к последовательности линейных подзадач.

Таблица 1. Соотношения исходных компонентов смеси для формирования арболита на 1 м³

Исходные материалы	Расход для изготовления, кг.
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	330
Заполнитель – древесная дробленка влажностью 24%	240
Минерализатор сахаров древесного заполнителя – сульфат алюминия	11
Вода	170
В/Ц	0,52



- 1 - блок арболита; 2- стальная оплубка;
3 - термоэлектрические преобразователи;
4 - потенциометр ПП-63; 5 - переключатель ПНТ; 6 - термостат

Рис. 1. Принципиальная схема измерения температурного поля по толщине образца

В третьей главе представлены результаты натурального эксперимента по идентификации нестационарных параметров теплопереноса и кинетики структурообразования арболита при ТВО. Тепловая обработка блока проводилась в сушильной камере с плавным повышением температуры воздуха от 20 до 40 °С в течение первых двух часов и последующей изотермической выдержкой при 40 °С; общая продолжительность цикла составила 12 часов. Экспериментально установлена структурно-зависимая функциональная связь между плотностью композита и его текущей влажностью, что позволило обосновать необходимость пошагового обновления объемных параметров в алгоритмах цифрового моделирования. В ходе длительных натурных измерений в теле блока-сырца, твердеющего в стальной опалубке, зафиксирована пространственно-временная динамика температурного (см. рис. 2) и влажностного (см. рис. 3) полей. Выявлена существенная асимметрия профилей влажности: если на открытой поверхности влажность за 12 часов падает на 42 %, то в придонной зоне – лишь на 10 %. Зафиксировано формирование устойчивых градиентов температуры (до 4...5 °С на 100 мм, рис. 4) и влажности (рис. 5).

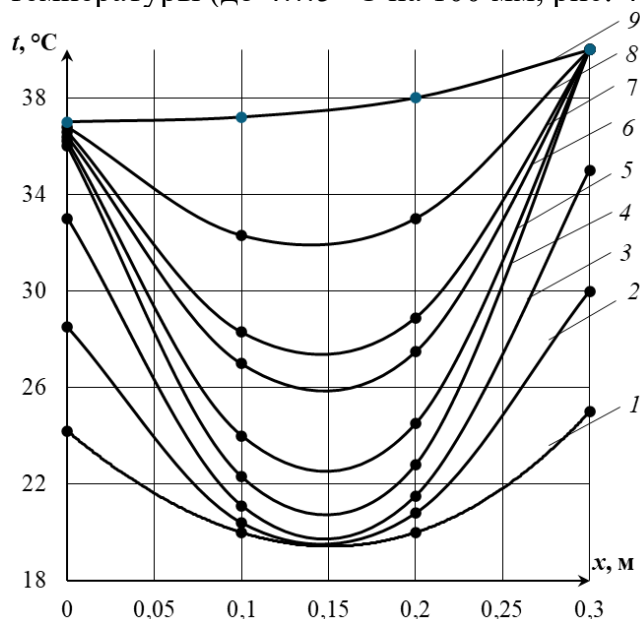


Рис. 2. Динамика полей температур при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке

Время нагрева: 1 – 0,5 ч.; 2 – 1 ч.; 3 – 1,5 ч.; 4 – 2 ч.; 5 – 3 ч.; 6 – 5 ч.; 7 – 7 ч.; 8 – ч.; 9 – 12 ч.

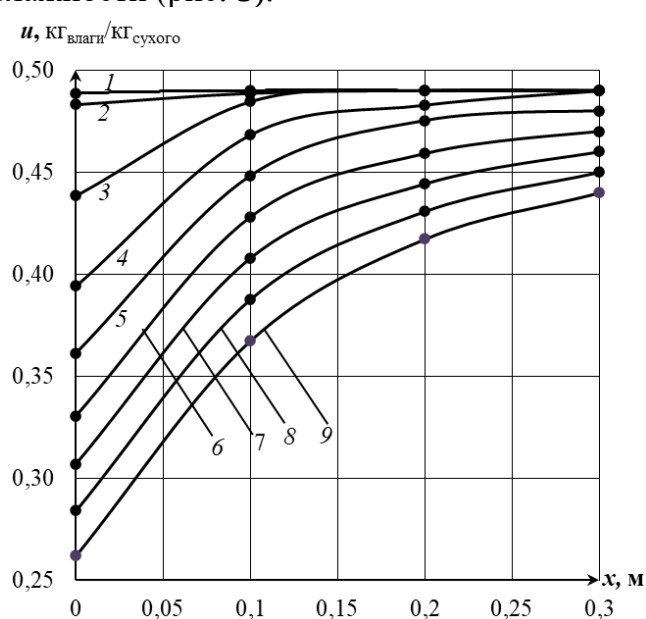


Рис. 3. Динамика полей влаги при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке

На основе дифференциальных уравнений тепло- и массопроводности и полученных экспериментальных профилей выполнена количественная идентификация феноменологических коэффициентов переноса и мощностей внутренних физико-химических источников. Доказано, что коэффициенты температуропроводности (см. рис. 6) и массопроводности (см. рис. 7) не являются константами, а существенно зависят от текущего влагосодержания. Получены аппроксимирующие зависимости с высокой степенью детерминации ($R^2 > 0,98$):

$$a = (-105,47 u^2 + 52,233 u - 4,2539) \cdot 10^{-7}, \quad (1)$$

$$k = (29,251 u - 7,0374) \cdot 10^{-9}. \quad (2)$$

Впервые рассчитаны мощности экзотермического тепловыделения (см. рис. 8) и поглощения влаги (рис. 9) при гидратации цемента. Определены плотности тепловых и массовых потоков, коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости (см. табл. 2). Совокупность полученных данных сформировала информационно-параметрическую базу для верификации и настройки цифровой модели.

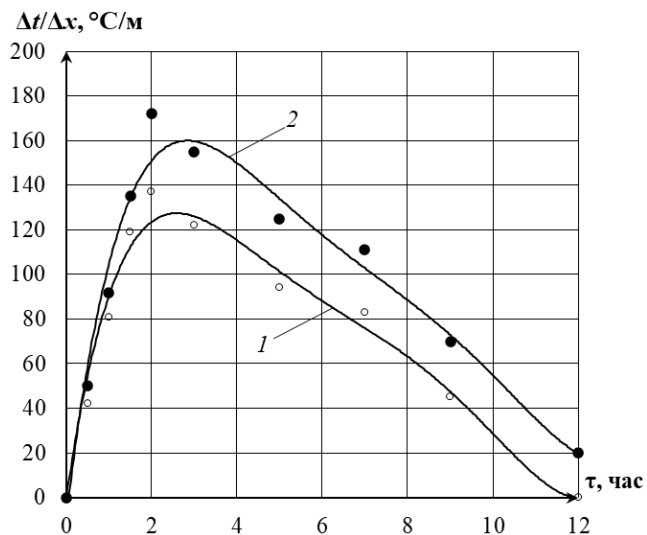


Рис. 4. Кинетика изменения градиентов температур при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке
1 – на открытой поверхности ($x=0$); 2 – в придонной зоне ($x=0,3$ м)

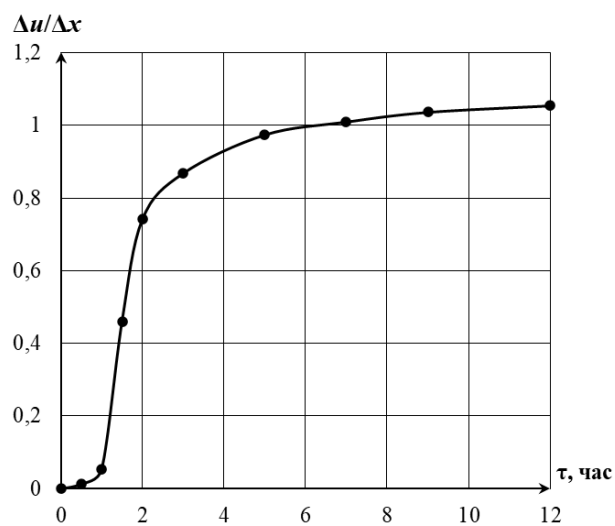


Рис. 5. Кинетика изменения градиента влажности на открытой поверхности ($x=0$) при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке

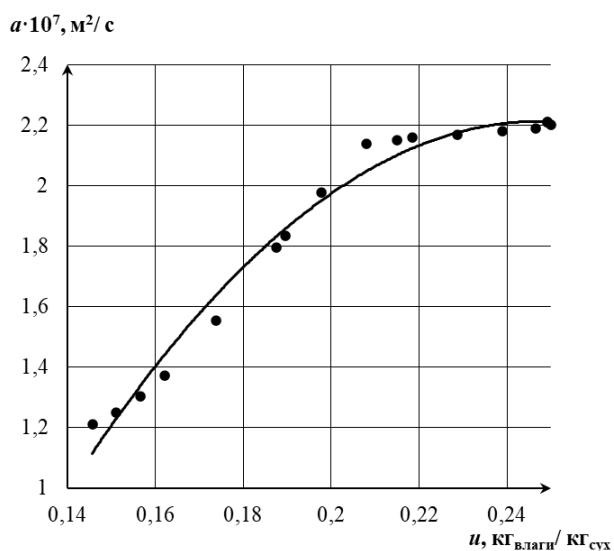


Рис. 6. Зависимость коэффициента температуропроводности от влажности арболита

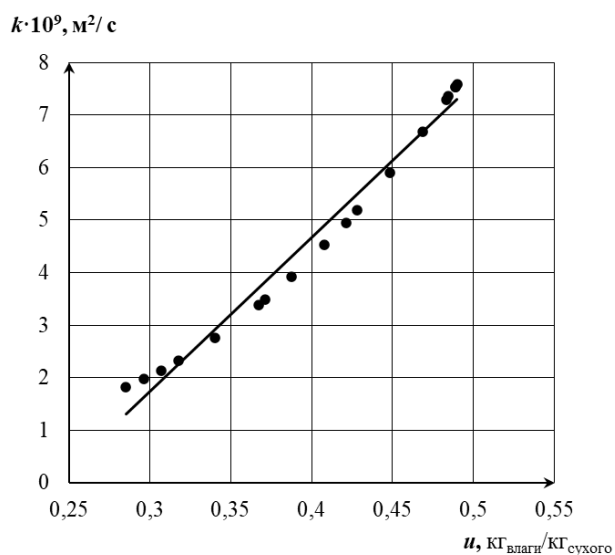


Рис. 7. Зависимость коэффициента массопроводности от влажности арболита

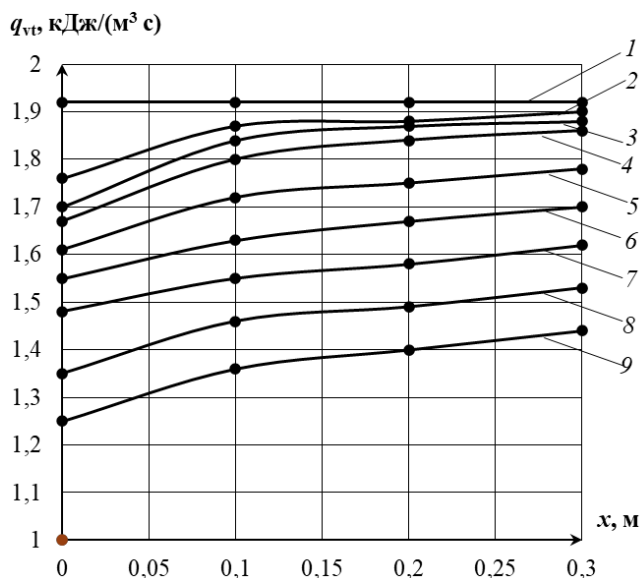


Рис. 8. Изменение мощности выделения тепла в твердеющем блоке арболита

Время нагрева: 1 – 0,5 ч.; 2 – 1 ч.; 3 – 1,5 ч.; 4 – 2 ч.; 5 – 3 ч.; 6 – 5 ч.; 7 – 7 ч.; 8 – ч.; 9 – 12 ч.

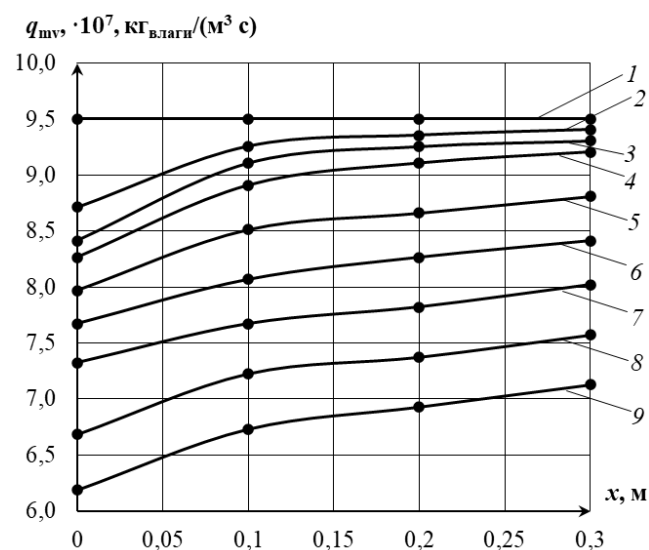


Рис. 9. Изменение мощности поглощения влаги в твердеющем блоке арболита

Таблица 2. Результаты определения параметров ТВО в твердеющем блоке арболита при температуре 40°С

Наименование параметра ТВО	Ед. изм.	Значение параметра с момента начала ТВО, час.					
		1	2	5	7	9	12
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·К)	0,43	0,38	0,34	0,30	0,26	0,22
Удельная теплоёмкость	кДж/(кг·К)	3,10	2,95	2,82	2,70	2,55	2,40
Плотность потока тепла	Вт/м²	16,8	11,4	7,5	4,8	2,9	1,8
Плотность потока влаги	·10 ¹⁰ кг/(м²·с)	7,11	8,65	10,42	12,15	13,70	15,03

В четвертой главе сформулирована и решена полная нестационарная задача сопряженного теплопереноса при ТВО арболита как двухфазного органоминерального капиллярно-пористого композита. На основе адаптированного численно-аналитического метода микропроцессов нелинейные краевые задачи сведены к последовательности линейных подзадач. В отличие от существующих моделей, в разработанной математической постановке одновременно учтены: экзотермическое тепловыделение при гидратации портландцементных минералов, нелинейная зависимость коэффициентов тепло- и массопроводности от текущей влажности, а также реальные асимметричные граничные условия при ТВО в стальной опалубке:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + q_{vt}(x, \tau), \quad \tau > 0, 0 \leq x \leq H, \quad (1) \quad \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 u(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_{vm}(x, \tau)}{\rho_{сyx}}, \quad \tau > 0, 0 \leq x \leq H, \quad (5)$$

$$t(x, \tau)|_{\tau=0} = t_0(x), \quad (2) \quad u(x, \tau)|_{\tau=0} = u(0, \tau) = u_0(x), \quad (6)$$

$$t(H, \tau) = t_k, \quad (3) \quad \left. \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=H} = 0, \quad (7)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = q_r, \quad (4) \quad \rho_{сyx} k \left. \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = -q_m. \quad (8)$$

Получены аналитические решения распределения температурных и влажностных полей в блоке арболита-сырца при ТВО в металлической опалубке с применением безразмерных критериев подобия (Фурье, Кирпичева, Померанцева):

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_k}{t_k} = Ki_m^* (1 - \bar{x}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \int_0^1 T_0(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi +$$

$$+ 2 \int_0^1 T_0(\xi) d\xi + 2 \int_0^1 Po_m^*(\xi) d\xi - \frac{8}{\pi^2} Ki_m^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] -$$

$$- \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right]}{(2n-1)^2} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi. \quad (9)$$

$$U(\bar{x}, Fo_m) = \frac{u(x, \tau) - u_p}{u_p} = -\frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\pi m \bar{x})}{m^2} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi +$$

$$+ \left(Fo_m + \frac{3\bar{x}^2 - 1}{6} \right) \int_0^1 Po_m^*(\xi) d\xi + \frac{1}{2} \int_0^1 Po_m^*(\xi) (1 - \xi)^2 d\xi + \frac{2}{\pi^2} Ki_m^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\pi m \bar{x})}{m^2} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) -$$

$$- \frac{Ki_m^*}{2} \left[(1 - \bar{x})^2 - \frac{1}{3} + Fo_m \right] + \int_0^1 U_0(\xi) d\xi + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 U_0(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi. \quad (10)$$

Выполнено цифровое моделирование нестационарного теплопереноса (рис. 10) и влагопереноса (рис. 11) с применением безразмерных критериев подобия (Фурье, Кирпичева, Померанцева). Теоретически доказано, что форсирование режима сушки на начальных этапах неизбежно ведет к перегреву поверхностной и генерации высоких термических напряжений, а наличие стальной опалубки формирует снижает эффективность ТВО в придонной зоне. Проведена верификация разработанной цифровой модели путем сопоставления расчетных полей

с результатами натурального эксперимента (рис. 2 и 3). Оценка адекватности по критерию согласия Пирсона подтвердила высокую достоверность модели с вероятностью 0,98.

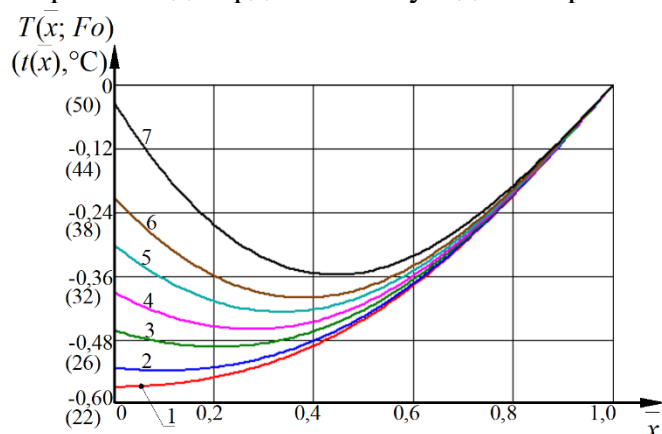


Рис. 10. Динамика распределения температур по толщине изделия при $Fo=0,1$ и $Ki^* = 1 - 0; 2 - 0,1; 3 - 0,3; 4 - 0,5; 5 - 0,75; 6 - 1; 7 - 1,5$

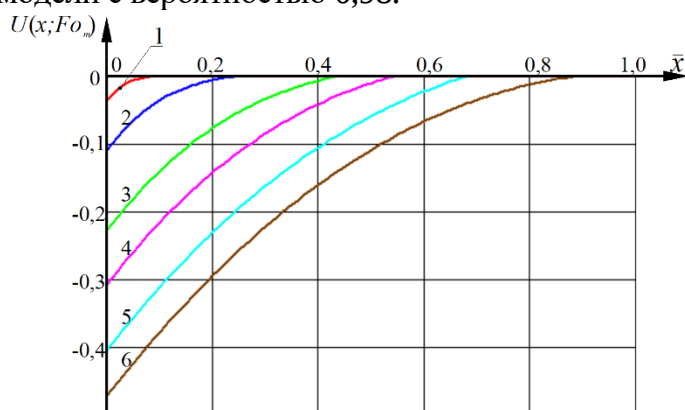


Рис. 11. Динамика безразмерных влагосодержаний по толщине блока арболита при ТВО в стальной опалубке при $Ki_m^* = 1$ и $Fo_m = 1 - 0,001; 2 - 0,01; 3 - 0,05; 4 - 0,1; 5 - 0,2; 6 - 0,3$

Выполнено математическое моделирование нестационарного влагопереноса для этапа сушки изделий после распалубки. Показано, что извлечение блока из стальной опалубки кардинально меняет граничные условия массообмена, что требует разработки специализированных расчетных схем. Сформулированы и аналитически решены краевые задачи массопроводности для трех базовых технологических схем сушки (рис. 12): на сплошном проницаемом основании (двусторонний массообмен); на непроницаемом металлическом поддоне (односторонний массообмен); на частично проницаемом решетчатом настиле (асимметричный массообмен).

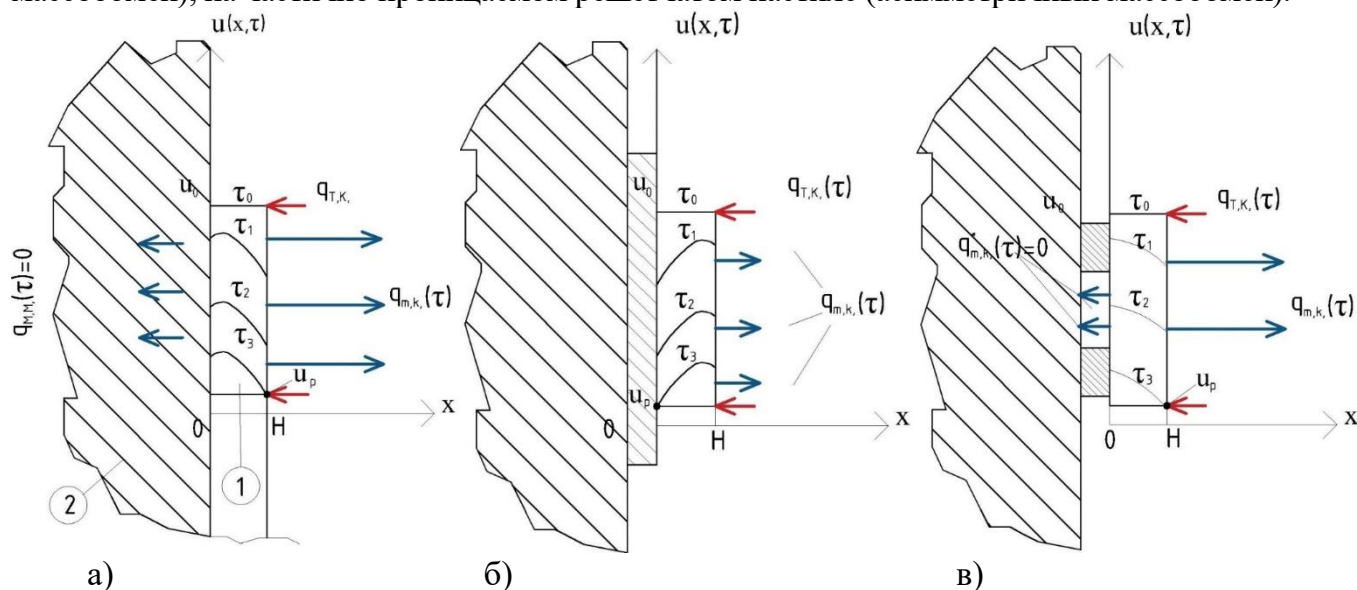


Рис. 12. Расчетные схемы влагопереноса для технологических схем организации сушки на сплошном проницаемом (а), непроницаемом (б) и частично проницаемом (в) основании
Варианты размещения блоков в зоне теплообмена. 1-блок-сырец; 2- основание

На верхней поверхности блока ($x=H$) граничное условие характеризует плотность потока влаги, поступающего из внутренних слоев к границе раздела фаз, а на нижней границе ($x=0$) поток влаги, подходящий из толщи изделия, уравнивается ее фильтрационным переносом в основание:

$$-k \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=H} = q_{m,k}(\tau); \quad -k \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{m,ph}(\tau). \quad (11)$$

Получено аналитическое решение, описывающее распределение влагосодержания в безразмерных переменных по толщине арболитового блока, которое можно использовать при соответствующих конкретных технологических схемах сушки на проницаемом, непроницаемом или частично проницаемом настиле:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = \int_0^1 U_0(\bar{x}) d\bar{x} - \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*) + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 U_0(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi - \\ - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - (-1)^m Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*). \quad (12)$$

На основе полученных решений проведены численные эксперименты (см. рис. 13-15), которые теоретически доказали, что сушка на непроницаемом основании формирует резко асимметричный профиль влажности с опасным накоплением влаги в придонной зоне, генерирующим критические усадочные напряжения. Применение же частично проницаемых настилов позволяет нивелировать асимметрию и сократить общее время достижения проектной влажности на 25...30 % без риска трещинообразования.

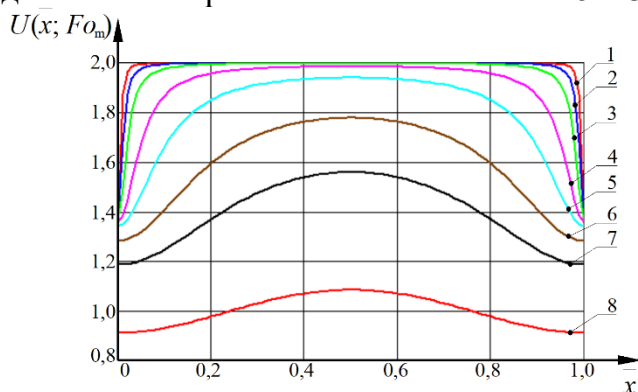


Рис. 13. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита

($U_0 = 2$, $Ki_{mk}=1$, $Ki_{m\phi}=1$, значения Fo_m :

1-0,005; 2-0,01; 3-0,02; 4-0,05; 5-0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

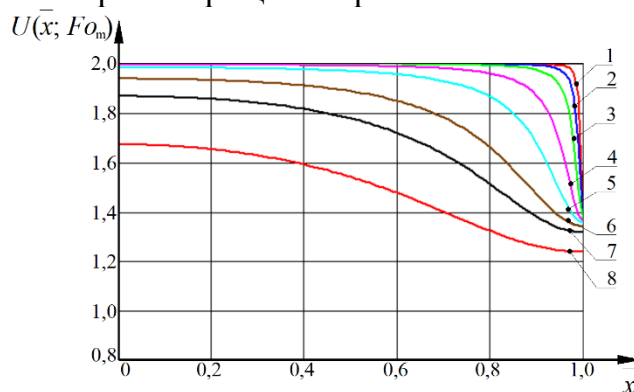


Рис. 14. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита

($U_0 = 2$, $Ki_{mk}=1$, $Ki_{m\phi}=0$, значения Fo_m :

1-0,005; 2-0,01; 3-0,02; 4-0,05; 5-0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

Разработана методология и алгоритм адаптивного цифрового управления режимами ТВО на базе концепции «цифрового двойника» (Digital Twin) арболитового блока. Доказано, что традиционные статичные (эмпирические) графики нагрева неизбежно ведут к скрытому дефектообразованию из-за инерционности тепломассопереноса и нелинейности коэффициентов. Разработан циклический алгоритм работы АСУ ТП камеры ТВО (с шагом дискретизации 30 мин), включающий пять функциональных блоков: инициализацию, мониторинг среды, имитационное моделирование, оценку внутренних градиентов и предиктивное принятие решений. Отличительной особенностью алгоритма является его способность в реальном времени решать обратную задачу: прогнозировать эволюцию полей температуры и влажности и автоматически формировать корректирующие воздействия (ступенчатое изменение температуры теплоносителя, регулирование влажности и скорости циркуляции воздуха) при

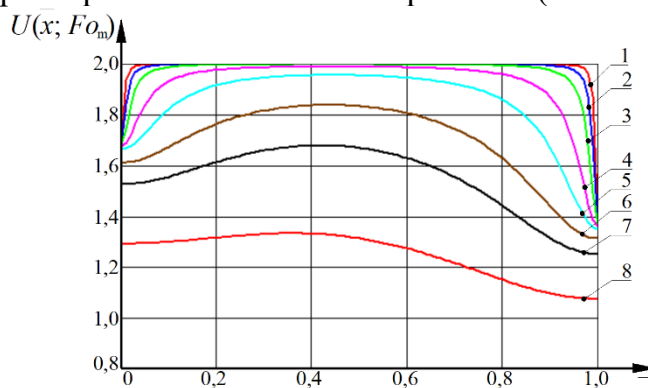


Рис. 15. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита ($U_0 = 2$, $Ki_{mk}=1$, $Ki_{m\phi}=0,5$, значения Fo_m : 1-0,005; 2-0,01; 3-0,02; 4-0,05; 5-0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

приближении внутренних градиентов к пороговым значениям, инициирующим разрыв связей в зоне «щепа–цемент».

Приведены результаты производственной апробации разработанных адаптивных режимов на мощностях предприятия «Арбоград» (г. Иваново). Экспериментально вскрыт и доказан недостаток визуального контроля качества: текстура арболита маскирует скрытую микротрещиноватость контактной зоны «древесный наполнитель – цементная матрица», которая неизбежно формируется при высоких градиентах ТВО и выступает концентратором напряжений. Сравнительные натурные испытания контрольной (эмпирический режим, высокие градиенты) и опытной (адаптивный режим по цифровой модели) партий блоков выявили следующее (таблица 3): применение адаптивного режима (ступенчатый нагрев до 40...45 °С и сушка на частично проницаемых настилах) позволило полностью исключить видимый макро-брак (коробление и сквозные трещины); за счет сохранения микроструктурной целостности композита предел прочности при сжатии вырос на 34 % (с 1,3 до 1,75 МПа), а коэффициент вариации прочности снизился с 18,5 % до 8,2 %, что свидетельствует о высокой структурной однородности изделий.

Таблица 3. Сравнительная оценка качества арболитовых блоков при различных режимах ТВО

Показатель	Эмпирический режим ТВО (высокие градиенты)	Адаптивный режим ТВО (по модели диссертации)
Максимальная скорость нагрева, °С/ч	12 ... 15	4 ... 6
Температура в камере ТВО, °С	60 ... 65	40 ... 45
Схема сушки после распалубки	Непроницаемый сплошной поддон	Частично проницаемый решетчатый настил
Расчетный градиент влажности (по модели), кг/кг	> 0,15	< 0,06
Видимые макродефекты (коробление, трещины), %	4,5 %	0 %
Предел прочности при сжатии, МПа	1,3 ± 0,14	1,75 ± 0,08
Коэффициент вариации прочности (однородность), %	18,5 (низкая)	8,2 (высокая)

Дополнительное зонное испытание образцов, выпиленных из различных сечений одного блока, подвергнутого жесткому эмпирическому режиму, подтвердило теоретические выводы модели: разнородность свойств по толщине изделия (прочность верхней пересушенной зоны - 1,15 МПа, нижней переувлажненной - 1,20 МПа, ядра - 1,45 МПа) заставляет блок работать как неоднородная система, разрушающаяся при нагрузках, значительно меньших расчетных. Результаты апробации подтверждены Актом о внедрении.

Внедрение адаптивного режима (ступенчатый нагрев до 40...45 °С и частично проницаемые настилы) позволило полностью исключить видимый брак, повысить предел прочности при сжатии на и обеспечить высокую структурную однородность изделий. Таким образом, в главе 4 решена полная нестационарная задача сопряженного тепломассопереноса, создана верифицированная цифровая модель и разработана технология адаптивного управления, внедрение которой обеспечивает выпуск изделий с проектными прочностными характеристиками при снижении энергозатрат и времени сушки.

В заключении указаны основные выводы по результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

1. Проведённый анализ научной литературы не выявил работ, формулирующих и решающих проблему разработки адаптивных технологий производства строительных изделий из арболита, рассматривающих полную нестационарную задачу тепломассопереноса при ТВО арболита с одновременным учётом тепловыделения и влагопоглощения при гидратации, нелинейной зависимости коэффициентов переноса от текущих параметров и реальных

технологических граничных условий. Выявленные пробелы обосновывают необходимость разработки методов цифровизации регулирования режимов термовлажностной обработки, что позволит прогнозировать пространственно-временные поля температуры и влажности, адаптировать режимы ТВО и минимизировать образование дефектов в строительных изделиях из арболита.

2. На базе длительного эксперимента, проводимого с использованием общепринятых физико-химических методов оценки свойств материалов, выполнен мониторинг нестационарных полей температуры и влажности блока из арболита-сырца при его тепловой обработке в течение 12 часов. Результаты проведённого мониторинга при заданном режиме нагрева воздуха в камере ТВО до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволили с помощью дискретных измерений установить данные о пространственно-временном распределении температуры и влажности по толщине блока. Полученные экспериментальные данные использовались для: анализа кинетики прогрева материала; определения градиентов температуры, являющихся движущей силой теплопереноса; верификации математической модели нестационарных процессов теплопроводности и массопереноса.

3. Для рассматриваемого процесса ТВО арболита-сырца определены численные значения параметров тепло-массопереноса, изменяющиеся при уменьшении влажности образца: коэффициент температуропроводности $-(2,2...1,3) \cdot 10^{-7}\text{ м}^2/\text{с}$; коэффициент массопроводности $-(7,6...1,8) \cdot 10^{-9}\text{ м}^2/\text{с}$; коэффициент теплопроводности $-0,4...0,22\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; удельная теплоёмкость $-3,1...2,4\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; плотность потоков тепла $-16,8...1,8\text{ Вт}/\text{м}^2$ и влаги $-(7...15) \cdot 10^{-10}\text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$; мощность объёмного выделения тепла $-1,92...1,25\text{ кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$ и поглощения влаги $-(9,5...6,2) \cdot 10^{-7}\text{ кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$ при гидратации минералов цемента.

4. Применительно к термической обработке арболита-сырца адаптирована методология синтеза и решения краевых задач нестационарной теплопроводности и диффузии с переменными коэффициентами переноса, основанная на численно-аналитическом методе микропроцессов. Указанный подход, разработанный в рамках общей теории тепло-массопереноса, был модифицирован с учётом физико-химической специфики органоминерального композита и позволяет сводить решение нелинейной краевой задачи тепло- или влагопроводности к последовательности линейных подзадач. В пределах каждого расчётного микропроцесса теплофизические характеристики арболита (удельная теплоёмкость, коэффициенты тепло- и влагопроводности) принимаются постоянными, однако их значения ступенчато актуализируются при переходе к следующему временному шагу в соответствии с изменением текущих температурно-влажностных параметров материала.

5. Сформулирована и решена краевая задача нестационарной теплопроводности в блоке арболита-сырца при ТВО в металлической опалубке с учётом изменяющихся коэффициентов переноса и выделения тепла при гидратации минералов цемента. В основу математической постановки задачи положено нелинейное дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа в частных производных с заданным начальным распределением температуры, наличием распределённого источника тепла в объёме блока и граничными условиями первого и второго рода.

6. Сформулирована и решена краевая задача нестационарного влагопереноса в блоке арболита-сырца при ТВО в металлической опалубке с учётом изменяющихся коэффициентов переноса и поглощения влаги при гидратации минералов цемента. В основу математической постановки задачи положено нелинейное дифференциальное уравнение диффузии параболического типа в частных производных с заданным начальным распределением влажности, учётом объёмного поглощения влаги и граничными условиями второго рода.

7. Разработана математическая модель влагопереноса в арболитовых изделиях для трёх технологических схем сушки - на проницаемом, непроницаемом и частично проницаемом основании. На основе нелинейного уравнения диффузии для капиллярно-пористых сред получено аналитическое решение задачи нестационарной массопроводности при неравномерном

начальном распределении влажности и граничных условиях второго рода с применением безразмерных критериев Фурье и Кирпичёва. Моделирование показало, что сушка на непроницаемом основании формирует асимметричный профиль влажности с максимумом в придонной зоне, увеличивая риск усадочных дефектов, тогда как схема с частично проницаемым настилом обеспечивает снижение времени сушки на 25...30 % при сохранении структурной однородности. Предложенная модель создаёт основу для проектирования рациональных режимов ТВО и разработки цифрового двойника производства арболитовых изделий.

8. Разработана технология адаптивного цифрового управления режимами ТВО. Предложен циклический алгоритм работы АСУ ТП камеры ТВО, который на основе предиктивной модели в реальном времени оценивает внутренние градиенты температуры и влажности. При приближении градиентов к критическим порогам, инициирующим разрыв связей в зоне «древесная щепка – цементная матрица», алгоритм автоматически формирует корректирующие воздействия (снижение температуры теплоносителя, изменение влажности и скорости циркуляции воздуха), предотвращая скрытое трещинообразование.

9. Апробированы результаты теоретических и экспериментальных исследований в производственных условиях (компания «Арбоград»). Экспериментально доказано, что визуальный контроль не выявляет скрытую микротрещиноватость, инициируемую градиентами ТВО, которая снижает прочностные характеристики. Внедрение адаптивного режима ТВО (ступенчатый нагрев до 40...45 °С и использование частично проницаемых настилов), сгенерированного на основе разработанной цифровой модели, позволило устранить причину скрытых дефектов, повысить предел прочности арболита при сжатии на 34 % (с 1,3 до 1,75 МПа) и обеспечить высокую структурную однородность изделий, что подтверждено Актом о внедрении.

Принятые обозначения:

t – температура, °С; u – влажность арболита, кг_{влаги}/кг_{сухого}; $t_0(x)$ и $t(x, \tau)$ – распределение температур по толщине блока в начале и конце i -го микропроцесса, °С; $u_0(x)$ и $u(x, \tau)$ – распределение влажности арболита по толщине блока в начале и конце i -го микропроцесса, кг_{влаги}/кг_{сухого}; u_p – равновесная влажность арболита, кг_{влаги}/кг_{сухого}; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; k – коэффициент массопроводности, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); q_{vt} – мощность выделения тепла при гидратации портландцементных минералов, Дж/(м³·с); q_{vm} – мощность поглощения влаги в твердеющем блоке арболита при гидратации портландцементных минералов, кг_{влаги}/(м³·с); $\rho_{сух}$ – плотность сухого композита, кг/м³; t_k – температура опалубки, °С; q_t – плотность теплового потока, Вт/м²; q_m – плотность потока влаги, кг/(м²·с); $q_{mf}(\tau)$ – плотность фильтрационного потока влаги на границе блока арболита с основанием (настилом), кг/(м²·с); $q_{mf}(\tau)$ – плотность потока влаги, поступающей из внутренних слоев блока к границе раздела фаз «арболит-воздух», кг/(м²·с); H – высота блока, м; $T(\bar{x}, Fo) = [t(x, \tau) - t_k] / t_k$ – распределение безразмерных температур по толщине блока; $U(\bar{x}, Fo_m) = (u(x, \tau) - u_p) / u_p$ – распределение безразмерных влажностей по толщине блока; $Fo = at / H^2$ – критерий подобия Фурье; $Fo_m = kt / H^2$ – массообменный критерий подобия Фурье; $Ki = q_t H / t_k \lambda$ – критерий подобия Кирпичева; $Ki_m = q_m H / (u_p k \rho_{сух})$ – массообменный модифицированный критерий подобия Кирпичева; $Ro = q_{vt} H^2 / t_k \lambda$ – критерий подобия Померанцева; $Ro_m = q_{vm} H^2 / (u_p k \rho_{сух})$ – массообменный модифицированный критерий подобия Померанцева.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий и международных реферативные базы данных и системы цитирования, рекомендованных ВАК РФ

1. Федосов С.В., Красильников И.В., Румянцева В.Е., Красильникова И.А., **Коринчук М.А.** Методы теории тепломассопереноса для моделирования процессов сушки блоков арболита-сырца // Строительные материалы. 2026. № 3. С. 60–69. (*Chemical Abstracts, Russian Science Citation Index*)

2. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., **Коринчук М.А.**, Красильникова И.А. Математическое моделирование нестационарного влагопереноса в арболитовых блоках при сушке с учётом технологических схем организации массообмена // Современные проблемы гражданской защиты. 2026. № 1 (58). С. 74–88.

3. Румянцева В.Е., Красильников И.В., **Коринчук М.А.**, Красильникова И.А. Энергоресурсосбережение на основе моделирования физико-химических явлений

теплотемассопереноса в процессах сушки блоков арболита-сырца // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2025. № 6 (420). С. 257–268. (*Scopus, Chemical Abstracts*).

4. Румянцева В.Е., Красильников И.В., **Коринчук М.А.**, Красильникова И.А. Закономерности физико-химических явлений теплотемассопереноса, структурообразования и учета эндо- и экзотермических эффектов в процессах сушки блоков арболита-сырца // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 3 (56). С. 70–80.

Прочие издания

5. **Коринчук М.А.**, Красильников И. В. Экологические и энергосберегающие аспекты производства арболита на основе промышленных отходов // Экологические аспекты современных городов: сборник материалов III национальной научно-практической конференции с международным участием. Иваново, 2026. С. 207–210.

6. Румянцева В.Е., **Коринчук М.А.** Применение отходов в производстве арболитовых блоков // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование : сборник материалов Международной научно-практической конференции. Иваново, 2024. С. 168–170.

7. Румянцева В.Е., **Коринчук М.А.**, Веселов И.А. Экологические блоки (арболиты) с использованием вторичного сырья // Экологические аспекты современных городов : сборник материалов I национальной научно-практической конференции с международным участием. Иваново, 2024. С. 96–98.

8. Румянцева В.Е., **Коринчук М.А.**, Веселов И.А. Получение лёгких бетонов (арболитов) с использованием вторичного сырья на основе хлопчатника, конопли, рисовой шелухи // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование : сборник материалов Международной научно-практической конференции. Иваново, 2023. С. 161–163.

9. Rumyantseva V., Konovalova V., Narmaniya B., **Korinchuk M.** Increasing the biostability of concrete by the introduction of additives // E3S Web of Conferences. XII International Scientific and Practical Forum «Environmentally sustainable cities and settlements: problems and solutions» (ESCP-2023). Moscow, Hanoi, 2023. P. 03005. DOI: 10.1051/e3sconf/202340303005.

10. Konovalova V., Rumyantseva V., **Korinchuk M.** Intensity of mass transfer processes in concrete with inhibitors in chloride corrosion // E3S Web of Conferences. XXVI International Scientific Conference «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2023). EDP Sciences, 2023. P. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202341001009

11. **Коринчук М.А.**, Веселов И.А., Румянцева В.Е. Легкие бетоны (арболиты) на основе вторичного сырья // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2023. № 1. С. 354–355.

12. Румянцева В.Е., **Коринчук М.А.** Получение легких бетонов (арболитов) с использованием вторичного сырья // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти академика РААСН Чернышова Е. М. 2022. С. 164–168.

13. Румянцева В.Е., **Коринчук М.А.** Использование отходов для производства теплоизоляционных материалов // Экологические аспекты современных городов : сборник материалов VIII межрегионального семинара. Иваново, 2022. С. 17–21.

14. **Коринчук М.А.**, Румянцева В.Е. Получение лёгких бетонов (арболитов) с использованием вторичного сырья на основе хлопчатника, конопли, рисовой шелухи // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2022. № 1. С. 321–323.

15. **Коринчук М.А.**, Цедилова Т.В., Ляковский Б.В. Особенности проектирования энергоэффективных зданий // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2019. № 1-2. С. 183–185.

16. **Коринчук М.А.** Фибробетоны для повышения огнестойкости конструкций // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: материалы IV Всероссийской научно-технической конференции молодых исследователей (с международным участием). 2017. С. 148–150.

Подписано в печать 10.07.2026.
Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Плоская печать.
Усл. печ. л. 0,98. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»
153000 г. Иваново, Шереметевский проспект, 21