

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



Коринчук Михаил Александрович

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

2.1.5. Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Советник РААСН,
доктор технических наук, доцент
Красильников Игорь Викторович



Иваново 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АРБОЛИТА, ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....	20
1.1. Структурообразование, эксплуатационные свойства и перспективы применения арболитовых композитов	20
1.1.1 Состав и структура композиционного строительного материала арболита	20
1.1.2 Механические свойства арболита	23
1.1.3 Теплотехнические и гигроскопические свойства арболита	29
1.1.4 Сравнительный анализ арболита с другими легкими бетонами.....	31
1.1.5 Область применения и ключевые особенности материала	34
1.2. Технологии производства строительных изделий из арболита	35
1.2.1. Подготовка сырьевых компонентов.....	35
1.2.2. Дозирование и приготовление бетонной смеси.....	39
1.2.3. Формование изделий и их уплотнение	41
1.2.4. Твердение и набор прочности композита.....	43
1.3. Нормативно-техническая регламентация и исходные параметры для моделирования сушки.....	45
1.4. Научно-методические предпосылки исследования тепломассопереноса при сушке арболитовых изделий	48
1.5. Тепломассоперенос в капиллярно-пористой структуре арболита: физические основы сушки и влияние режимов на структуру	53
1.5.1. Механизмы переноса энергии (теплопроводность, конвекция и излучение)	53
1.5.2. Механизмы переноса вещества (диффузия пара и жидкости).....	56
1.5.3. Сопряженные процессы тепломассопереноса	58
1.5.4. Нестационарность, неизотермичность и структурная зависимость коэффициентов переноса.....	61

1.5.5. Взаимосвязь тепломассопереноса со структурообразованием и механическими свойствами строительного материала	64
1.5.6. Влияние термовлажностного режима на кинетику формирования свойств композита	66
1.6. Выводы по главе 1. Постановка задач исследования	68
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АРБОЛИТА	72
2.1. Материалы и технология изготовления образцов	72
2.1.1. Вяжущее вещество	72
2.1.2. Древесный наполнитель	74
2.1.3. Вода для приготовления бетонной смеси	75
2.1.4. Минерализатор сахаров древесного наполнителя	76
2.1.5. Технология изготовления образцов арболита для исследования тепло- и влагопереноса	78
2.2. Краткое описание применяемых экспериментальных методик исследования нестационарного тепломассопереноса при термовлажностной обработке строительных изделий из арболита	80
2.2.1. Методика измерения температурного поля по толщине арболитового блока	81
2.2.2. Измерение влажности арболита игольчатым влагомером	82
2.3. Математическое моделирование нестационарного тепломассопереноса и структурообразования арболита при термовлажностной обработке	87
2.3.1. Физико-химические факторы, определяющие кинетику сушки и структурообразование	87
2.3.2. Математическая постановка задачи взаимосвязанного нестационарного тепломассопереноса	88
2.3.3. Решение нелинейных задач тепломассопереноса методом микропроцессов	89

2.3.4. Критический анализ современных методов моделирования сушки капиллярно-пористых материалов	90
2.4. Выводы по главе 2	97
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И КИНЕТИКИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ АРБОЛИТА ПРИ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ	99
3.1. Определение зависимости между плотностью и влажностью арболита	99
3.2. Результаты экспериментального определения динамики тепло- и влагопереноса при тепловой обработке изделий в стальной опалубке	101
3.2.1. Температурное поле	104
3.2.2. Влажностное поле	105
3.3. Определение коэффициента теплопроводности и мощности выделения тепла	108
3.4. Определение коэффициента массопроводности и мощности поглощения влаги	115
3.4. Определение коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности потоков тепла и влаги	121
3.5. Выводы по главе 3	123
ГЛАВА 4. ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ОБОСНОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АРБОЛИТА	125
4.1. Физико-математическая постановка задачи создания цифровой модели сопряженного нестационарного теплопереноса при термовлажностной обработке строительных изделий из арболита	126
4.2. Цифровое моделирование нестационарного теплопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита	129
4.2.1. Математическая формулировка краевой задачи для метода микропроцессов	129

4.2.2. Решение краевой задачи нестационарного теплопереноса для i -го микропроцесса	131
4.2.3. Численные эксперименты по цифровой модели кинетики и динамики нестационарного теплопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита.....	133
4.3. Цифровое моделирование нестационарного влагопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита	138
4.3.1. Математическая формулировка краевой задачи для метода микропроцессов	138
4.3.2. Решение краевой задачи нестационарного влагопереноса для i -го микропроцесса	140
4.3.3. Численные эксперименты по цифровой модели кинетики и динамики нестационарного влагопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита.....	142
4.4. Верификация цифровой модели нестационарного сопряженного тепло- и влагопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита.....	147
4.5. Моделирование нестационарного влагопереноса при сушке арболитовых блоков на различных технологических основаниях после распалубки	154
4.5.1. Математическая формулировка краевой задачи для метода микропроцессов	159
4.5.2. Аналитическое решение задачи краевой задачи	161
4.5.3. Численные эксперименты по цифровой модели динамики нестационарного влагопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита после распалубования.....	163
4.6. Разработка алгоритма адаптивного цифрового управления режимами термовлажностной обработки арболитовых изделий.....	167
4.7. Экспериментальное исследование влияния градиентов температуры и влажности при термовлажностной обработке на структурную целостность и прочностные характеристики изделий из арболита	170
4.8. Выводы по главе 4	175

Заключение.....	177
Список литературы.....	180
Приложение 1	213
Приложение 2	217
Приложение 3	219
Приложение 4	220

ВВЕДЕНИЕ

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 теплопереноса 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 теплопереноса 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 влагопроводности 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 РАН 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 наполнителей.

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 Сосновиков 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 Сосновиков И.И.), г. Иваново позволило устранить причину скрытого дефектообразования, обеспечить отсутствие видимого брака и повысить предел прочности арболита при сжатии (с 1,5 до 1,7 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.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АРБОЛИТА, ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

1.1. Структурообразование, эксплуатационные свойства и перспективы применения арболитовых композитов

1.1.1 Состав и структура композиционного строительного материала арболита

Арболит представляет собой вид легкого ячеистого бетона или, более точно, композитного материала на минеральном вяжущем, в котором роль крупного и мелкого заполнителя выполняет щепа древесины [102]. В отличие от традиционных бетонов, где в качестве заполнителей используются песок, гравий или щебень, в арболите органический наполнитель играет двойную роль: он значительно снижает плотность и удельный вес готового изделия, а также оказывает существенное влияние на его уникальный комплекс физико-механических свойств [1, 88, 110, 258]. Данный материал относится к группе цементных композитов, где древесина инкорпорируется в минеральную матрицу в виде волокон (см. рис. 1.1), опилок, стружек или частиц [18, 129, 140, 187, 192]. Таким образом, арболит следует рассматривать не просто как "бетон с опилками", а как многофазную систему, состоящую из трех основных компонентов: вяжущего, наполнителя (древесной щепы) и воды, необходимой для гидратации вяжущего и смачивания древесины [29, 221].

Структура арболита является многофазной и гетерогенной, так как включает три основных компонента: вяжущее, наполнитель (древесина) и вода [29, 150, 251]. Основным вяжущим компонентом для производства арболита является портландцемент или шлакопортландцемент. Выбор конкретного типа цемента может влиять на скорость твердения, прочность и долговечность материала [6, 10, 39, 40]. В качестве наполнителя используется щепа древесины, которая может быть получена из различных пород деревьев, как хвойных, так и лиственных [22, 97, 108]. Геометрические характеристики щепы, такие как размер, форма и

распределение ее по размерам, являются критически важными параметрами, влияющими на свойства конечного продукта [9, 13, 44, 90, 94, 146, 184, 197]. Вода, помимо своей стандартной роли в процессе гидратации цемента, также смачивает древесину, что необходимо для обеспечения адгезии между органической и минеральной фазами [36, 136, 203]. Совокупность этих компонентов формирует сложную структуру, где цементный камень, образующийся в результате гидратации, обволакивает частицы древесины и связывает их воедино, создавая единую монолитную структуру [21, 37, 40, 170].



Рис. 1.1. Внешний вид изделия из арболита

Цементный камень, образующийся в результате гидратации, заполняет пространство между частицами древесины. Внутренняя структура материала характеризуется наличием пор - как капиллярных пор в самой древесине, так и цементном камне, а также между частицами щепы и цементного камня [73, 77, 103, 189, 206]. Качество связи (адгезии) между древесиной и цементным камнем, известное как зона перехода фаз, играет решающую роль в определении механической прочности и долговечности арболита [35, 36, 136, 203, 239]. Нарушение этой связи может приводить к локальным разрушениям под нагрузкой [31, 129, 194].

При изучении микроструктуры и границы раздела фаз в арболите используются современные методы анализа, такие как рентгеновская

дифрактометрия (РХД), которая позволяет определить кристаллический состав минеральных фаз, и Фурье-спектроскопия с преобразованием Фурье (ФТ-ИК), которая предоставляет информацию о химическом составе и наличии различных соединений в материале [41, 42, 74, 172]. Эти методы позволяют исследовать, например, степень гидратации цемента и наличие продуктов взаимодействия между компонентами смеси [98, 99, 143, 144].

Производство изделий из арболита регламентируется нормативными документами, одним из ключевых из которых является ГОСТ 19222-84 «Бетон арболитовый и изделия из него. Технические условия». Этот стандарт устанавливает общие требования к сырью, составу смеси, способам формования и эксплуатационным характеристикам изделий [34, 50, 161]. Процесс производства обычно включает следующие этапы: приготовление смеси, формование и последующее твердение [3, 32, 101, 149]. Приготовление смеси заключается в тщательном перемешивании компонентов в специальных смесителях [3, 101]. После этого смесь загружается в формы и уплотняется. Существует несколько методов формования, наиболее распространенными из которых являются вибропрессование и автоклавная обработка [37, 95, 161]. Вибропрессование предполагает одновременное воздействие вибрации и высокого давления на смесь в металлической форме, что позволяет получить блоки с высокой плотностью и точными геометрическими размерами [32, 101].

Автоклавная обработка, в свою очередь, проводится при повышенных температуре и давлении, что ускоряет процессы твердения и повышает прочностные характеристики изделий [37, 95, 169, 170]. Затем изделия выдерживаются в условиях, способствующих набору прочности, после чего они извлекаются из форм и отправляются на дальнейшую обработку или хранение [32, 33]. Контроль качества строительных изделий из арболита выполняют методами испытаний, описанные в соответствующих стандартах - ГОСТ 30459 и ГОСТ 19222 (см. приложение 1).

Улучшение физико-механических свойств арболита достигается модифицирующими веществами. Обязательным этапом изготовления является

модификация древесного заполнителя, например, предварительное замачивание щепы в растворах щелочей, таких как гидроксид кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Было показано, что обработка щепы химическими реакциями удаляет сахара, что улучшает адгезию межфазного взаимодействия между древесиной и цементным тестом [20, 28, 35, 167, 168], что в конечном итоге повышает прочность композита [180, 239].

Другое направление - модификация вяжущей смеси путем введения различных добавок. Использование силикатных жидкостей может повысить долговечность арболита и снизить коробление изделий [33, 38, 39, 40]. Кроме того, в последние годы активно исследуется применение микро- и наноразмерных частиц, таких как биоуголь или металлические наночастицы, которые могут влиять на кинетику гидратации цемента, изменять микроструктуру цементного камня и, как следствие, улучшать его прочностные характеристики [143, 144, 171, 178, 221]. Например, добавление наночастиц биоуглерода-цинка увеличило прочность цементного теста на 22,6% через 28 дней [171, 178]. Эти подходы направлены на решение одной из главных проблем арболита - его нестабильности геометрических размеров, которая будет рассмотрена в контексте процессов сушки в последующих разделах диссертации [115, 119, 157, 158].

1.1.2 Механические свойства арболита

Механические свойства арболита, такие как прочность при сжатии, морозостойкость и усадка, являются характеристиками, определяющими его применимость в строительстве [26, 31, 126, 129, 174, 175, 176]. Они обусловлены сложным взаимодействием между минеральной матрицей (цементным камнем) и органическим наполнителем (древесиной) [29, 31, 110, 129, 192, 195]. Прочность на сжатие арболита, как правило, находится в диапазоне от низкой до средней, что является одним из его основных ограничений по сравнению с другими видами бетона [31, 126, 129, 176, 192, 197]. Это объясняется тем, что древесина, являющаяся основным наполнителем, имеет значительно более низкую прочность на сжатие по сравнению с твердеющим цементным камнем [31, 126, 192, 197].

Таким образом, чем выше содержание щепы в составе смеси, тем ниже итоговая прочность материала. Соотношение "щепа/цемент" является одним из наиболее влияющих факторов, определяющих механические свойства композита [26, 31, 32, 126, 146, 192, 197]. Снижение доли вяжущего приводит к формированию менее связной структуры, где частицы древесины не полностью обволакиваются цементным тестом, что создает зоны ослабления и снижает общую прочность на сжатие [31, 32, 126, 192].

Помимо количественного соотношения компонентов, большое значение имеют геометрические характеристики наполнителя. Размер, форма и распределение частиц щепы по размерам напрямую влияют на плотность и однородность структуры арболита [9, 13, 44, 90, 94, 146, 184, 197]. Использование смеси щепы разного размера позволяет достичь более эффективного уплотнения: мелкая щепа заполняет пустоты между крупными частицами, что увеличивает объем наполнителя и повышает плотность материала [32, 146, 184]. Однако чрезмерное количество мелкой щепы может привести к снижению прочности и ухудшению других свойств [31, 126, 192]. С другой стороны, использование преимущественно крупной щепы способствует образованию большего количества внутренних полостей и пор, что улучшает тепло- и звукоизоляционные качества, но одновременно значительно снижает прочность на сжатие [25, 27, 133, 134, 135, 138, 147, 184, 226, 256].

Характеристикой, определяющей долговечность арболита, является морозостойкость, которая определяет способность материала многократно выдерживать циклы замораживания и оттаивания при насыщении водой без значительной потери прочности и массы [38, 174, 175, 193]. Для арболитовых изделий существует нормированная классификация по морозостойкости, которая должна быть не менее F25 [174, 175]. Основной причиной снижения морозостойкости арболита является наличие пор в самой древесине, которые способны накапливать и удерживать значительное количество воды [73, 77, 103, 174, 189, 206]. При замерзании этой воды происходит ее расширение, создавая внутренние напряжения, которые могут приводить к микротрещинам и

разрушению структуры материала [67, 75, 122, 174]. Поэтому для повышения морозостойкости арболита применяются различные модифицирующие добавки, например, жидкое стекло [20, 38, 39, 40, 175].

Одной из наиболее серьезных проблем, связанных с механическими свойствами арболита, является его нестабильность геометрических размеров, проявляющаяся в виде коробления изделий [115, 119, 157, 158, 174, 175]. Эта проблема имеет два основных источника. Первый - усадка самого цементного камня, которая возникает в результате испарения свободной воды и протекания процессов гидратации, сопровождающихся уменьшением общего объема системы [4, 73, 98, 99, 143, 144]. Второй, не менее значимый, источник - изменение геометрии самой древесины при изменении ее влажности. Древесина является гигроскопичным материалом, и при высыхании она уменьшается в объеме, а при увлажнении - расширяется [15, 97, 108, 140, 174, 185, 205, 218, 235]. Поскольку частицы древесины жестко связаны с цементной матрицей, эти внутренние деформации древесины вызывают напряжения в окружающем ее цементном камне, что в конечном итоге приводит к деформациям и растрескиванию готовых изделий [115, 119, 140, 157, 158, 174, 235]. Именно эта особенность делает арболит значительно менее стабильным по размерам по сравнению, например, с пенобетоном, который имеет полностью минерализованную, не подверженную усадке структуру [176, 52, 53, 54, 114, 116, 117, 118, 120]. Попытки решения этой проблемы включают как химическую модификацию древесины для стабилизации ее геометрических размеров, так и использование специальных добавок, которые могут снизить деформации всего композита [20, 28, 35, 38, 39, 40, 167, 168, 175, 180, 239]. Основные механические свойства арболита и основные определяющие факторы по данным источников [1, 26, 31, 32, 126, 129, 174, 175, 176; 184, 192, 197, 258] приведены в таблице 1.1., а дополнительно рассмотрены факторы влияющие на плотность изделия из арболита (см. табл. 1.2).

В таблице выше обобщены основные механические свойства арболита и ключевые факторы, на них влияющие. Как видно из таблицы, прочность на сжатие напрямую зависит от соотношения компонентов и размера наполнителя, тогда как

морозостойкость и деформативность связаны со структурой пор и гигроскопическими свойствами древесины [31, 126, 129, 174, 175, 192, 197]. Все эти факторы должны учитываться при проектировании состава смеси и выборе технологии производства для получения изделий с заданными эксплуатационными характеристиками [3, 32, 33, 101, 149, 161].

Таблица 1.1. - Основные механические свойства арболита и основные определяющие факторы

Характеристика	Диапазон значений / Описание	Влияющие факторы
Плотность, кг/м ³	300...1000	см. таблицу 1.2 [1, 26, 31, 32, 126, 184, 197]
Прочность при сжатии, МПа	0,5...3,5	Соотношение щепа/цемент; размер щепы; плотность; марка цемента; качество твердения [31, 32, 126, 146, 192, 197]
Прочность на осевое растяжение, МПа	0,13...0,74	
Прочность при изгибе, МПа	Не менее 0,35	
Морозостойкость (марка)	F25, F35, F50	Плотность; структура пор; наличие модифицирующих добавок; марка по прочности [38, 174, 175, 193]
Усадка	низкая	Влажность цементного камня; влажностные деформации древесины; состав смеси [115, 119, 140, 157, 158, 174]
Коробление	Значительное	Неравномерная усадка по объему изделия; неоднородность состава смеси; технология производства [115, 119, 157, 158, 174, 175]

Таблица 1.2. - Факторы регулирования плотности арболита

№ п/п	Факторы	Механизм влияния на плотность	Диапазон влияния / Количественная оценка	Рекомендации по управлению
1	Состав и соотношения компонентов			
1.1	Расход вяжущего (цемент, шлакощелочное вяжущее)	Увеличение доли вяжущего заполняет межзерновое пространство и снижает общую пористость матрицы	Плотность возрастает с 450 до 800 кг/м ³ при увеличении расхода вяжущего на 30...50%	Оптимизировать расход вяжущего под целевую плотность: 250...350 кг/м ³ для теплоизоляционных, 400...500 кг/м ³ для конструктивных марок
1.2	Тип органического заполнителя (древесная щепа, рисовая шелуха, конопляная костра)	Различная насыпная плотность заполнителей (120...300 кг/м ³) и водопоглощение определяют исходную пористость смеси	Замена щепы на шелуху снижает плотность композита на 8...15% при равном объёмном содержании	Использовать заполнители с контролируемой фракцией и предварительной сушкой для стабильности плотности
1.3	Доля органического заполнителя в объёме	Увеличение объёма лёгкого заполнителя вытесняет более плотную цементную матрицу	Рост доли заполнителя с 30% до 60% снижает плотность на 15...35%	Подбирать объёмное содержание заполнителя в диапазоне 40...55% для баланса плотности и прочности
1.4	Водоцементное отношение (В/Ц)	Избыточная вода после гидратации испаряется, формируя капиллярную пористость; недостаток воды снижает полноту гидратации	Отклонение В/Ц на $\pm 0,1$ от оптимума меняет плотность на 3–7%; оптимальное В/Ц = 0,4...0,55	Контролировать В/Ц с точностью $\pm 0,05$; использовать пластификаторы для снижения водопотребности
2	Технологические параметры формования			
2.1	Коэффициент уплотнения (К)	Механическое уплотнение уменьшает воздушные пустоты между частицами заполнителя и вяжущего	Рост К с 1,0 до 2,0 повышает плотность на 25...40% и прочность на сжатие с 0,05 до 0,95 МПа	Применять К = 1,8...2,2 для конструктивных марок; К = 1,3...1,6 - для теплоизоляционных
2.2	Удельное давление прессования	Давление способствует переупаковке частиц	Рост давления с 0,012 до 0,29 МПа увеличивает	Оптимизировать давление под тип заполнителя:

№ п/п	Факторы	Механизм влияния на плотность	Диапазон влияния / Количественная оценка	Рекомендации по управлению
		и выдавливанию воздуха из смеси	плотность; эффект насыщается при $P > 0,3$ МПа	0,15...0,25 МПа для щепы, 0,05...0,15 МПа для шелухи
2.3	Способ формования (вибропрессование, ручное трамбование)	Разная эффективность удаления воздуха и распределения компонентов по объёму	Вибропрессование обеспечивает на 8...12% более высокую и однородную плотность по сравнению с ручным формованием	Предпочитать вибропрессование для серийного производства; вибролитьё - для сложных форм
2.4	Режим уплотнения (время, амплитуда, частота вибрации)	Интенсивность и длительность воздействия определяют степень переупаковки и деаэрации смеси	Увеличение времени вибрации с 30 до 90 с повышает плотность на 4...9%, далее - эффект насыщения	Устанавливать время вибрации 45...75 с в зависимости от жёсткости смеси
2.5	Тепловлажностная обработка (ТВО)	Ускорение гидратации и раннее структурообразование снижают усадочную пористость	ТВО при 70 °С по режиму 3+3+8+3 ч повышает раннюю плотность на 5...8% без ухудшения долгосрочных характеристик	Применять щадящие режимы ТВО для арболита с органическими заполнителями во избежание деформаций
3	Модифицирующие добавки			
3.1	Поризующие добавки (вспученный перлит, микросферы, гранулированный полистирол)	Введение лёгких частиц создаёт дополнительную замкнутую пористость в матрице	Добавка 5...15% перлита снижает плотность на 10...25% при сохранении прочности на 85...95%	Использовать поризаторы для тонкой настройки плотности в целевом диапазоне
3.2	Химические модификаторы (жидкое стекло, сульфатсодержащие компоненты, пластификаторы)	Улучшение адгезии вяжущего к заполнителю позволяет снизить расход цемента без потери плотности	Введение 1...3% жидкого стекла повышает адгезию на 40...60%, позволяя сократить расход вяжущего на 10...15%	Подбирать модификаторы под тип заполнителя: сульфаты - для древесины, силикаты - для шелухи

№ п/п	Факторы	Механизм влияния на плотность	Диапазон влияния / Количественная оценка	Рекомендации по управлению
3.3	Гидрофобизирующие добавки (стеараты, кремнийорганические соединения)	Снижение водопоглощения заполнителя уменьшает потребность в воде затворения и, как следствие, пористость	Обработка заполнителя 0,5...1,5% гидрофобизатора снижает В/Ц на 0,05...0,08, повышая плотность на 2...4%	Предварительно обрабатывать органический заполнитель гидрофобизаторами для стабилизации реологии
3.4	Дисперсное армирование (фибра, микрофибра)	Волокна формируют каркас, препятствующий оседанию и сегрегации смеси при формовании	Введение 0,5...2% фибры повышает однородность плотности по сечению изделия на 10...18%	Применять фибру для крупноформатных изделий для минимизации градиентов плотности

1.1.3 Теплотехнические и гигроскопические свойства арболита

Теплотехнические и гигроскопические свойства являются одними из наиболее важных характеристик арболита, определяя его широкое применение в энергоэффективном строительстве (см. табл.1.3) [23, 25, 27, 53, 56, 60, 80, 151]. Основным преимуществом материала является его низкая теплопроводность, которая обусловлена наличием в его структуре древесной щепы, обладающей гораздо более низкой теплопроводностью, чем цементный камень [133, 134, 135, 138, 147, 184, 226, 254]. Благодаря этому свойству, арболитовые стеновые блоки позволяют возводить тонкие, но высокоэффективные по теплоизоляции ограждающие конструкции, что особенно актуально для малоэтажного строительства [23, 27, 53, 60, 80, 151]. Значения коэффициента теплопроводности для арболита зависят от его плотности и варьируются в широком диапазоне, что позволяет подбирать материал для различных климатических условий [11, 25, 133-135, 138, 147, 184, 226, 254], а для легких марок арболита этот показатель может быть достаточно низким, обеспечивая высокий уровень энергоэффективности зданий [53, 80, 151].

Таблица 1.3. - Теплотехнические и гигроскопические свойства арболита

Свойство	Типичное значение	Источники сведений
Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/(м·°С)	0,07...0,17	[25, 27, 133, 134, 135, 138, 147, 184, 226]
Коэффициент теплопроводности (при рабочей влажности), Вт/(м·°С)	0,11...0,21	[25, 27, 133, 134, 135, 138, 147, 184, 254]
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	> 0,04	[11, 164, 183, 230]
Водопоглощение по объему, %	50... 80	[164, 174, 230]
Водопоглощение по массе, %	70... 100	[164, 174, 230]
Теплоемкость, кДж/(кг·°С)	2,3	[25, 27, 79, 138, 147, 254]

Помимо теплопроводности, важными теплотехническими характеристиками являются теплоемкость и температуропроводность. Теплоемкость определяет способность материала накапливать и отдавать тепловую энергию, что влияет на термическую инерционность помещения [79, 82-87, 190]. Высокая теплоемкость стен из арболита способствует стабилизации температурного режима внутри здания, снижая перепады температур в течение суток [11, 79, 162, 204]. Температуропроводность, в свою очередь, характеризует скорость распространения теплового поля в материале [47, 100, 177, 190]. Эти параметры, наряду с теплопроводностью, определяют совокупный теплотехнический комфорт зданий, построенных из арболита [11, 79, 215].

Гигроскопические свойства арболита тесно связаны с его теплотехническими характеристиками и долговечностью [15, 78, 140, 174, 185, 205, 218, 230, 235]. Основными показателями здесь являются водопоглощение и паропроницаемость. Водопоглощение - это способность материала впитывать и удерживать воду. В арболите вода может находиться в двух состояниях: в порах цементного камня и в порах самой древесины [73, 77, 103, 174, 189, 206, 230]. Высокое водопоглощение, особенно за счет древесного наполнителя, является одним из факторов, снижающих морозостойкость материала, так как замерзание накопленной влаги приводит к разрушению структуры [67, 75, 122, 174, 193]. С

другой стороны, наличие открытых пор в структуре арболита обеспечивает ему высокую паропроницаемость [11, 164, 183, 232]. Паропроницаемость характеризует способность материала "дышать", то есть пропускать водяной пар. Высокая паропроницаемость арболита является большим преимуществом по сравнению с некоторыми синтетическими утеплителями, так как она предотвращает накопление конденсата внутри ограждающих конструкций, поддерживая здоровый микроклимат в помещении [11, 53, 230]. Арболит способен поглощать избыточную влагу из воздуха при высокой влажности и отдавать ее в сухой воздух, выполняя функцию естественного гигростата [235].

В целом, совокупность теплотехнических и гигроскопических свойств делает арболит идеальным материалом для стен малоэтажных зданий, где сочетаются требования к теплоизоляции и воздухообмену. Однако эти же свойства накладывают определенные ограничения на его применение в конструкциях, подверженных постоянному увлажнению [174, 175, 193, 230].

1.1.4 Сравнительный анализ арболита с другими легкими бетонами

Сравнение арболита с другими видами легких бетонов, в частности с пенобетоном и опилкобетоном, позволяет наглядно продемонстрировать его преимущества и недостатки, что важно для понимания области применения данного материала и определения направлений дальнейшего научного совершенствования [23, 60, 80, 151]. Арболит, пенобетон и опилкобетон представляют собой три различных подхода к созданию легкого бетона на цементном вяжущем, каждый из которых имеет свои технологические особенности и эксплуатационные характеристики [52-54, 88, 114, 243].

Пенобетон, является искусственным камнем, получаемым путем смешивания цементного теста с газообразующими компонентами, которые создают в смеси множество мелких, герметичных пор [116- 120, 176]. В отличие от арболита, где наполнителем служит твердая древесная частица, в пенобетоне поры образуются

за счет химической реакции (например, с использованием алюминиевой пудры) или механического ввода воздуха [243, 258].

Главное преимущество арболита перед пенобетоном заключается в его значительно более низкой теплопроводности при сопоставимой плотности [25, 27]. Наличие древесной щепы, имеющей очень низкую теплопроводность, делает арболит более эффективным теплоизоляционным материалом [133-138, 147, 184]. Кроме того, в некоторых случаях арболит может быть изготовлен из относительно дешевого вторичного сырья (щепа), что потенциально снижает себестоимость [7, 8, 22, 23, 36, 80, 208, 209, 220, 231]. Однако у арболита есть и серьезные недостатки. Его прочность на сжатие обычно ниже, чем у пенобетона той же плотности, что ограничивает его применение в несущих конструкциях [31, 126, 129, 176, 192, 197]. Наиболее существенным недостатком является низкая стабильность геометрических размеров. Арболит подвержен значительному короблению, что связано с гигроскопическими свойствами древесины и усадкой цементного камня, а пенобетон, будучи полностью минерализованным материалом, имеет гораздо более стабильную форму и меньшие деформации после твердения [176].

Сравнение с опилкобетоном также показывает как сильные, так и слабые стороны арболита [114, 116]. Опилкобетон, по сути, является родственным материалом, так как в нем также используется древесный наполнитель - опилки. Разница заключается в геометрии наполнителя: щепа в арболите имеет более крупные и неправильные формы, в то время как опилки более мелкие и фракционированные [88, 146, 243]. Это может влиять на плотность, прочность и теплотехнические свойства. В целом, оба материала обладают высокой теплоизоляцией и паропроницаемостью благодаря наличию древесины, но арболит, как правило, имеет более низкую прочность на сжатие по сравнению с опилкобетоном, поскольку более крупные частицы щепы создают больше ослаблений в цементной матрице [31, 88, 126, 146, 192, 197]. В то же время, более крупная структура щепы может способствовать лучшей звукоизоляции [27, 146, 184]. Как и арболит, опилкобетон страдает от нестабильности геометрических

размеров и ограниченной морозостойкости [88, 174, 175, 243]. Информация о свойствах опилкобетона в предоставленных источниках ограничена, что затрудняет проведение детального количественного сравнения.

Таблица 1.4. - Сравнительные характеристики некоторых легких бетонов

Свойство	Арболит	Пенобетон	Опилкобетон
Основной наполнитель	Щепа древесины [102, 18, 129, 140, 97, 108]	Пузырьки воздуха (формируются химически) [52, 53, 54, 176]	Опилки древесины [88, 52, 54, 243]
Прочность при сжатии	Низкая - средняя [31, 126, 129, 176, 192, 197]	Низкая - средняя [176, 52, 54, 258]	Низкая [88, 126, 176, 243]
Теплопроводность	Очень низкая [25, 27, 133, 134, 135, 138, 147, 184]	Низкая [176, 52, 54, 114, 116, 117, 118, 120]	Низкая [88, 25, 27, 243]
Морозостойкость	Ограниченная (зависит от марки) [38, 174, 175, 193]	Высокая [176, 52, 54]	Ограниченная [88, 174, 175, 243]
Стабильность размеров	Средняя [115, 119, 140, 157, 158, 174, 175]	Высокая [176, 52, 53, 54, 114, 116, 117, 118, 120]	Низкая [88, 140, 174, 175, 243]
Воздухопроницаемость	Высокая [11, 164, 174, 183, 230]	Средняя [52, 53, 54, 176]	Высокая [88, 164, 183, 230]
Паропроницаемость	Очень высокая [11, 164, 174, 183, 230]	Высокая [52, 53, 54, 176]	Высокая [88, 164, 183, 230]
Стоимость сырья	Относительно низкая [7, 8, 22, 36, 52 - 56, 80, 114 - 120, 150, 151, 208, 209, 220, 231]	Средняя	Средняя [52, 54, 114, 116, 117, 118, 120]

Проведенное сравнение показывает, что выбор того или иного материала зависит от конкретных задач проекта [23,60]. Арболит является предпочтительным выбором для стен малоэтажных домов, где максимальное внимание уделяется теплоизоляционным качествам и созданию здорового микроклимата [80, 151]. Его низкая прочность и нестабильность размеров делают его непригодным для

ответственных конструкций и высотного строительства [258]. Пенобетон, предлагает лучший баланс прочности и теплоизоляции при высокой стабильности геометрии, что делает его более универсальным материалом для различных типов зданий [114-120]. Опилкобетон занимает промежуточное положение, но в целом схож по своим с арболитом. Таким образом, арболит занимает свою нишу на рынке строительных материалов, предлагая уникальный набор свойств, которые выгодно отличают его от конкурентов, но при этом сопряженный с рядом серьезных технических вызовов, связанных с ускоренным изготовлением без потери качества, что и является предметом изучения в настоящей диссертации [140, 158, 175].

1.1.5 Область применения и ключевые особенности материала

Арболит востребован в малоэтажном строительстве благодаря сочетанию теплоизоляционных свойств, паропроницаемости и экологичности. Материал оптимален для возведения наружных стен частных домов и дач: высокая энергоэффективность позволяет делать кладку тоньше, сохраняя полезную площадь и снижая расходы на отопление [23, 27]. Внутри зданий из блоков возводят перегородки, обеспечивающие хорошую звукоизоляцию и не требующие сложной подготовки под отделку [105]. Кроме того, арболит применяют как утеплитель для перекрытий и кровель, а также для хозяйственных построек [183].

Однако сфера использования арболита имеет строгие ограничения, обусловленные его физико-механическими характеристиками. Главная преграда - низкая прочность на сжатие, исключая применение материала в многоэтажном строительстве и нагруженных конструкциях [126]. Блоки чувствительны к влаге, поэтому их не используют для фундаментов и цоколей без мощной гидроизоляции, а также требуется защита фасадов от прямого попадания осадков [164]. Стоит учитывать и геометрическую нестабильность материала, что накладывает отпечаток на технологию кладки и архитектуру зданий [119].

В совокупности, арболит представляет собой материал с четко очерченной областью применения. Он идеально подходит для строительства энергоэффективных и экологичных малоэтажных зданий, где его теплоизоляционные и гигиенические

свойства являются решающими преимуществами. Однако его использование в более ответственных и сложных конструкциях требует тщательного проектирования и учета его недостатков [31, 258]. Развитие технологий производства, в частности, внедрение эффективных модифицирующих добавок для снижения усадки и повышения морозостойкости, может расширить горизонты применения арболита в будущем [20, 239]. В настоящее время же его ключевая особенность - это баланс между высокой теплоизоляцией и рядом технологических проблем, связанных с нестабильностью геометрии, которые являются предметом глубокого исследования в рамках данной диссертационной работы, в частности, через анализ нестационарных процессов тепломассопереноса при сушке изделий из арболита [115, 163].

1.2. Технологии производства строительных изделий из арболита

1.2.1. Подготовка сырьевых компонентов

Процесс производства изделий из арболита начинается с подготовки сырьевых компонентов, где закладываются основы будущих свойств материала [102, 5]. Этот этап является многоступенчатым и включает в себя измельчение древесины, ее модификацию и дозирование в заданной пропорции с другими компонентами. Качество и характеристики каждого из этих подэтапов напрямую влияют на однородность, прочность, долговечность и, что особенно важно для последующего анализа, на начальные условия процессов тепломассопереноса, таких как сушка [82, 85]. Основным органическим наполнителем в арболите выступает щепа древесины, которая может быть получена из различных пород деревьев, как хвойных, так и лиственных [102, 5]. Первым шагом в подготовке заполнителя является его измельчение. Исходным материалом служит щепа, которая после измельчения проходит через сито для разделения на фракции. Для этого используются специализированные машины, такие как измельчители (рис.1.2), щепорезы или роторные молотковые дробилки [102].

Работает измельчитель следующим образом: перерабатываемый материал помещается в подающий бункер 9, с помощью которого он подается в зону

расположения торцевой дисковой фрезы 4 с тремя рубильными ножами. Ввиду того, что фреза вращается в направлении подачи перерабатываемого материала, происходит принудительное перемещение материала в зону резания за счет сопротивления резанию. Щепка получается следующим образом: рубильные ножи отрезают от заготовки плоские щепки, которые проходят через прямоугольные отверстия во фрезе и попадают во внутреннюю полость измельчителя. Биты 6 молотковой дробилки разбивают крупные щепки до того момента, когда они смогут свободно пройти через отверстия в калибрующей сетке 7 за счет действия воздушного потока, создаваемого лопастями вентилятора 5. Корпус измельчителя выполнен в виде улитки по параметрам, применяемым при проектировании пылевых вентиляторов. Данная конструкция позволяет получить на выходе щепу определенных размеров.

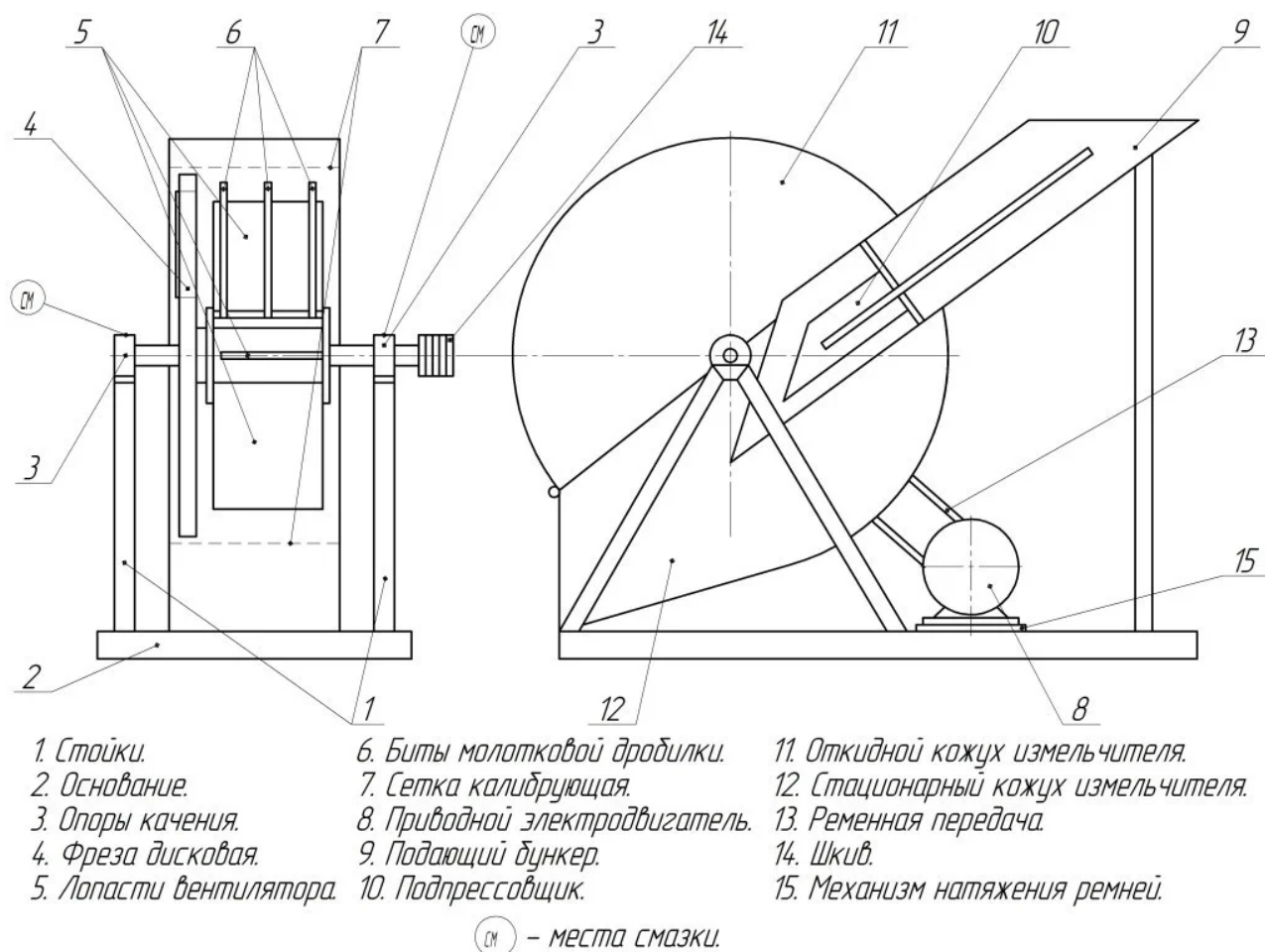


Рис. 1.2. Схема измельчителя древесины

Размер частиц щепы играет решающую роль: использование смеси щепы разного размера позволяет достичь более эффективного уплотнения, поскольку мелкая щепа заполняет пустоты между крупными частицами, увеличивая объем заполнителя и повышая плотность материала [24]. Оптимальный размер щепы для арболита согласно ГОСТ 54854–2011 и рекомендациям составляет: длина 20–30 мм, ширина 5–10 мм, толщина до 5 мм. Щепа должна быть игольчатой, плоской, без высокого содержания коры (не более 10%) и хвои (не более 5%), что обеспечивает качественное сцепление (армирование) цемента. Однако чрезмерное количество мелкой щепы может привести к снижению прочности и ухудшению других эксплуатационных характеристик [24, 31]. С другой стороны, использование преимущественно крупной щепы способствует образованию большего количества внутренних полостей и пор, что улучшает тепло- и звукоизоляционные качества, но одновременно значительно снижает прочность на сжатие [25, 27]. Таким образом, гранулометрический состав щепы является одним из ключевых управляемых факторов при проектировании состава смеси.



Рис. 1.3. Правильные формы щепы для изготовления арболита

После измельчения щепа может подвергаться обработке с целью нейтрализации древесных сахаров и улучшения адгезии между древесиной и цементным камнем, что оказывает влияние на механическую прочность и долговечность арболита [136, 167]. Одним из распространенных методов является предварительное замачивание щепы в растворах солей, например, в хлориде кальция (CaCl_2), сульфате алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) или жидком стекле (водный щелочной раствор силикатов натрия $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ и (или) калия $\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$) [20, 168].

В качестве минерального вяжущего для производства арболита основным компонентом является портландцемент или шлакопортландцемент [5, 102]. Выбор

конкретного типа цемента может влиять на скорость твердения, прочность и долговечность материала [6, 145]. Помимо вяжущего, в состав смеси часто вводится кварцевый песок. Соотношение "щепа/цемент" является одним из наиболее влияющих факторов, определяющих механические свойства композита [24, 126]. Снижение доли вяжущего приводит к формированию менее связной структуры, где частицы древесины не полностью обволакиваются цементным тестом, что создает зоны ослабления и снижает общую прочность на сжатие [31].

Вода, помимо своей стандартной роли в процессе гидратации цемента, также смачивает древесину, что необходимо для обеспечения адгезии между органической и минеральной фазами [102].

Совокупность компонентов (вяжущее, наполнитель и вода) формирует сложную многофазную и гетерогенную структуру, где цементный камень, образующийся в результате гидратации, обволакивает частицы древесины и связывает их воедино, создавая единую монолитную структуру [5, 6]. Ниже представлена таблица 1.5, обобщающая основные компоненты, используемые в технологии производства арболита, их функциональное назначение и ключевые характеристики [5, 102].

Таблица 1.5. - Основные компоненты, используемые в технологии производства арболита

Компонент	Функциональное назначение	Ключевые характеристики и требования
Древесная щепа	Основной легкий заполнитель, снижающий плотность, улучшающий тепло- и звукоизоляцию, формирующий трехмерную сетку.	Порода дерева (хвойные/лиственные), размер частиц, гранулометрический состав, влажность
Цемент (портландцемент, шлакопортландцемент)	Минеральное вяжущее, связывающее все компоненты в единое целое путем гидратации.	Марка (прочность), активность, время схватывания, расход в смеси.
Кварцевый песок	Заполнитель для уплотнения структуры, снижение усадки, экономия цемента.	Фракционный состав, чистота (отсутствие глинистых примесей).
Вода	Растворитель для образования цементного теста, реагент для	Количество (водоцементное отношение W/C), чистота.

	гидратации цемента, смачиватель древесной щепы для улучшения адгезии.	
Модифицирующие добавки	Улучшение адгезии, долговечности, снижение коробления, изменение кинетики твердения.	Жидкое стекло, хлорид кальция, сульфат алюминия, наночастицы.

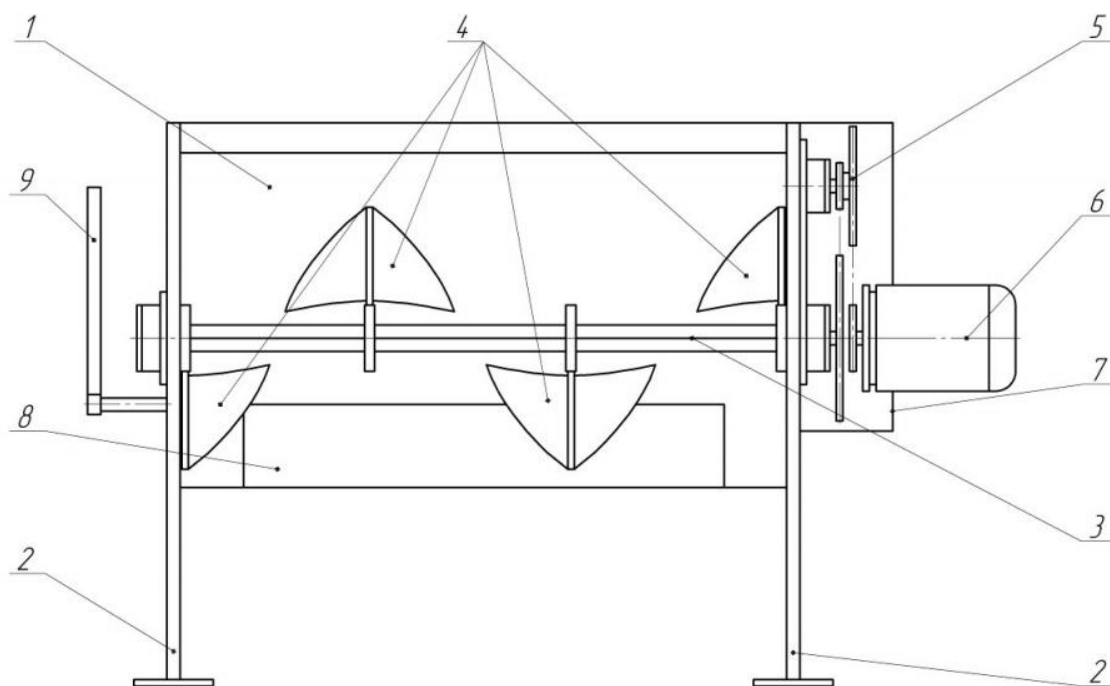
Подготовка сырья завершается дозированием компонентов в соответствии с заданной рецептурой. Точность дозирования сыпучих материалов и воды необходима для соблюдения требований технических условий и получения изделий с заданными свойствами. Оборудование для дозирования включает весовые дозаторы для цемента, песка и щепы, а также расходомеры для воды. После дозирования все компоненты загружаются в смеситель (рис. 1.4) для приготовления однородной массы.

1.2.2. Дозирование и приготовление бетонной смеси

Компоненты дозируются в соответствии с технологической картой, которая определяет их весовое соотношение для получения арболита заданной марки по плотности и прочности [5, 102]. Для дозирования сыпучих материалов, таких как цемент, песок и щепа, применяются автоматические весовые дозаторы. Для дозирования воды используются расходомеры, часто работающие в паре с насосами. Точность дозирования регламентируется нормативными документами и напрямую влияет на водоцементное отношение, которое, в свою очередь, определяет степень насыщенности пор цементного камня и его конечную прочность [6, 145]. Любые отклонения от рецептуры могут привести к снижению качества продукции.

После дозировки все компоненты загружаются в бункеры смесителя. В контексте производства арболита в научной литературе упоминается использование барабанных смесителей [102]. Барабанный смеситель представляет собой горизонтальный или наклонный вращающийся барабан, внутри которого имеются лопатки или ребра, перебрасывающие и перемешивающие смесь.

Для приготовления арболитных смесей, содержащих крупную и абразивную древесную щепу, оптимально подходят лопастные смесители принудительного действия (см. рис. 1.4) [3]. Вращение лопастей в неподвижной чаше обеспечивает высокую интенсивность процесса, что критически важно для равномерного обволакивания щепы цементным тестом и достижения однородности массы [149].



- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Емкость смесителя. | 6. Приводной электродвигатель. |
| 2. Стойки смесителя. | 7. Защитный кожух. |
| 3. Квадратный вал. | 8. Выгрузной шлюз. |
| 4. Лопасты смесителя (активаторы). | 9. Ручка управления механизма шлюза. |
| 5. Двухступенчатый цепной редуктор. | |

Рис. 1.4. Схема смесителя

Важным параметром является продолжительность смешивания. Она должна быть достаточной для полного смачивания заполнителя, но исключать преждевременное схватывание цемента и чрезмерный износ оборудования. Время цикла подбирают эмпирически для каждой рецептуры, контролируя процесс визуально: готовая смесь должна иметь однородный цвет без сухих частиц щепы и комков цемента.

На современных производствах процессы дозирования и перемешивания автоматизируют, что минимизирует влияние человеческого фактора и

гарантирует стабильность состава от замеса к замесу. Автоматизированные системы могут в реальном времени контролировать вес компонентов, время смешивания и другие параметры, обеспечивая соответствие выпускаемой продукции установленным стандартам.

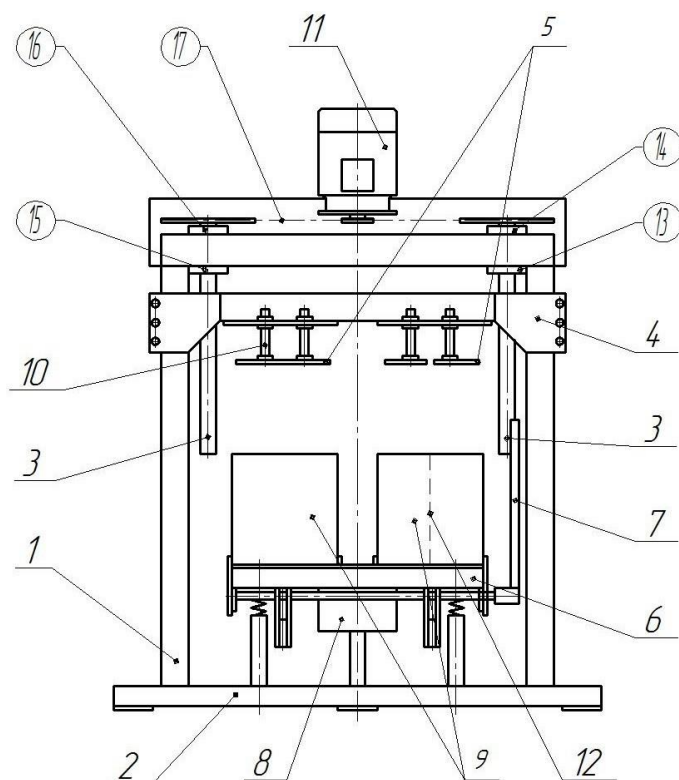
Этап подготовки смеси является определяющим: именно здесь формируется гомогенная структура композита, от которой напрямую зависят прочность и долговечность готовых изделий [5, 6].

1.2.3. Формование изделий и их уплотнение

На этапе формования сыпучая или пластичная смесь приобретает окончательную форму, геометрические размеры и заданную плотность [5, 102]. От правильного выбора метода формования и соблюдения технологических режимов зависят не только внешний вид и точность размеров блоков, но и их внутренняя структура, а следовательно, и механические свойства [24, 104]. Процесс формования включает в себя загрузку смеси в металлические формы (пуансоны) и ее последующее уплотнение. Существует несколько основных методов формования, наиболее распространенными из которых являются вибропрессование и автоклавная обработка [5, 92].

Вибропрессование - один из основных методов формования арболитовых изделий [5, 102]. Этот процесс предполагает одновременное воздействие на смесь в металлической форме вибрации и высокого давления [92, 93]. Вибрация вызывает колебания частиц смеси, что приводит к уменьшению сил трения между ними и способствует их самоподчинению. При этом высокое давление, создаваемое прессующим столом, дополнительно уплотняет смесь, выдавливая из нее воздух и лишнюю воду, и придает изделию высокую плотность и точные геометрические размеры [92]. Оборудование для этого процесса представлено вибропрессовыми машинами (см. рис. 1.5). Эти машины представляют собой сложные станки, состоящие из рамы, устройства для вибрации (вибратора) и прессующего механизма. Вибропрессование позволяет получать блоки с высокой

прочностью и низкой пористостью, что делает этот метод предпочтительным для производства стеновых блоков [5, 24]. Режимы работы вибропресса (частота и амплитуда вибрации, величина давления, время уплотнения) являются ключевыми технологическими параметрами, которые должны строго контролироваться.



- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1. Рама | 7. Механизм фиксации форм |
| 2. Основание | 8. Вибратор |
| 3. Винтовой механизм | 9. Формы |
| 4. Поперечная балка | 10. Регулировочные винты |
| 5. Трамбовочные плиты | 11. Электродвигатель |
| 6. Стол на упругой подвеске | 12. Перегородочная пластина |

⑬ - Места смазки

Рис. 1.5. Вибропресс

Существуют и другие, менее распространенные методы формования. Например, вибропрокат используется для производства плитных изделий. Смесь укладывается на конвейер и проходит через систему вибрирующих валов, которые уплотняют и формируют полотно заданной толщины [92]. Также существует бездобавочный способ производства, который основан на самоуплотнении смеси. Его особенностью является то, что в смесь не вводятся песок и вода в обычном

понимании. Вместо этого используется пористая щепа, которая поглощает воду из цементного теста. Из-за разницы концентраций вяжущего в частицах щепы и в окружающем растворе возникает осмотическое давление, которое само по себе уплотняет смесь [5, 102]. Этот метод прост, но дает меньшую прочность изделий.

Выбор конкретного метода формования зависит от требуемых характеристик конечного продукта, объемов производства и доступных инвестиций в оборудование. Вибропрессование и автоклавная обработка являются наиболее технологичными и широко применяемыми подходами для производства высококачественных арболитовых изделий [5, 24].

Выбор конкретного метода формования зависит от требуемых характеристик конечного продукта, объемов производства и доступных инвестиций в оборудование. Вибропрессование и автоклавная обработка являются наиболее технологичными и широко применяемыми подходами для производства высококачественных арболитовых изделий.

1.2.4. Твердение и набор прочности композита

Этап твердения является завершающим и наиболее длительным в изготовлении арболитового изделия, начиная с момента его извлечения из формы [5, 6]. На этом этапе происходит физико-химическая эволюция материала, в результате которой он набирает прочность и приобретает свои эксплуатационные свойства. Основным процессом, лежащим в основе твердения, является гидратация цементного вяжущего: химическое взаимодействие цемента с водой с образованием кристаллических и аморфных продуктов, которые создают трехмерную сетку, скрепляющую частицы древесной щепы воедино [6, 143]. Этот процесс сопровождается уменьшением общей массы системы и испарением части воды, что приводит к возникновению усадочных деформаций [57, 164]. Качество и скорость твердения напрямую влияют на конечную прочность, плотность и долговечность арболита [5, 174].

Существует два основных подхода к твердению: естественное и искусственное (ускоренное).

Естественное твердение заключается в выдерживании изделий в условиях, способствующих набору прочности [5, 102]. Обычно это открытые площадки под навесами, где изделия находятся в контакте с окружающей средой. Этот процесс занимает длительное время (несколько недель) и сильно зависит от климатических условий, в первую очередь от температуры и относительной влажности воздуха [11, 78]. При низких температурах и сухом воздухе процесс гидратации замедляется, а интенсивное испарение влаги с поверхности может привести к растрескиванию изделий и увеличению их итоговой усадки [57, 164]. Естественное твердение является самым простым и экономичным способом, но он малоэффективен с точки зрения скорости производства.

Искусственное твердение, или тепловая обработка, применяется для ускорения процесса гидратации и получения изделий с высокими прочностными характеристиками в короткие сроки [92, 93]. Тепловая обработка может проводиться различными способами:

Термовлажная обработка в сушильных камерах: изделия выдерживаются в специальных камерах, где поддерживаются повышенная температура (до 60...80°C) и высокая влажность воздуха. Это ускоряет реакцию гидратации без риска быстрой потери влаги с поверхности [115, 119].

Помимо термической обработки, процесс твердения можно модифицировать химически, например, введением в смесь диоксида серы (SO₂) [38, 39]. Во влажной среде он образует сернистую кислоту, реагирующую с компонентами цемента и древесины. Вместо стандартных силикатов и алюминатов кальция формируются специфические серосиликатные и сульфатные минералы. Это уплотняет микроструктуру, значительно повышая водостойкость, прочность и биостойкость арболита, а также снижая его усадку [172].

На практике применяют две основные схемы формования: с твердением в формах (фиксированное формование) и с мгновенной распалубкой [102]. Первый метод технологически предпочтительнее, так как жесткая опалубка удерживает геометрию изделия на начальном этапе структурообразования. Это предотвращает деформации, вызванные релаксацией и гигроскопическим расширением

древесного заполнителя. В результате блоки получаются более точными по размерам, имеют стабильную плотность и проектную прочность, что минимизирует производственный брак.

Таким образом, режим твердения и использование химических добавок напрямую формируют эксплуатационные характеристики арболита. В рамках данного диссертационного исследования параметры этого этапа (конечная влажность, температура и фазовый состав) рассматриваются как базовые граничные условия для последующего математического моделирования процессов сушки [82, 162].

1.3. Нормативно-техническая регламентация и исходные параметры для моделирования сушки

Производство изделий из арболита строго регламентируется действующими нормативными документами, главным из которых является ГОСТ 19222 «Бетон арболитовый и изделия из него. Технические условия» (Приложение 1). Этот стандарт устанавливает общие требования к сырью, составу смеси, способам формования, а также к эксплуатационным характеристикам и методам испытаний готовой продукции [5, 102]. Соблюдение требований данного стандарта является обязательным условием для производства качественного и безопасного строительного материала. Процесс производства, согласно ГОСТу, обычно включает три основных этапа: приготовление смеси, формование и последующее твердение [5, 102].

Контроль качества арболита регламентируется ГОСТ 19222 и ГОСТ Р 54854 (см. приложение 1). Нормативы устанавливают требования к основным физико-механическим свойствам: плотности, прочности на сжатие, водопоглощению и морозостойкости (не ниже марки F25) [34, 174]. Строгое соблюдение этих стандартов гарантирует стабильность характеристик выпускаемой продукции.

Корректное математическое моделирование нестационарных процессов тепломассопереноса (в частности, сушки) требует точного задания начальных

условий. Анализ технологической цепочки позволяет определить исходные параметры изделия непосредственно после распалубки и на этапе твердения:

1. Состав и структура. Арболит представляет собой гетерогенную композитную систему, включающую три базовых компонента: минеральное вяжущее (портландцемент), древесный наполнитель (щепа) и воду [5, 102]. Внутренняя структура материала характеризуется наличием сложной поровой системы: капиллярных пор в самой древесине и межчастичных пор между частицами щепы и цементным камнем [73, 103]. Качество связи (адгезии) между древесиной и цементным камнем, известное как зона перехода фаз, играет решающую роль в определении механической прочности и долговечности арболита [136, 167].

2. Начальная влажность. Это один из самых важных параметров для моделирования сушки. После замешивания арболитовая смесь имеет очень высокую влажность, так как вода необходима как для гидратации цемента, так и для смачивания древесной щепы [5, 102]. Вода находится в двух состояниях: в порах цементного камня и в порах самой древесины [82, 85]. Хотя точное процентное содержание воды в источниках не всегда указано, сам факт наличия значительного количества свободной и связанной влаги является ключевым. Высокое водопоглощение изготовленного композита, особенно за счет древесного наполнителя, является одним из факторов, снижающих морозостойкость материала [174, 175].

3. Начальная температура. Температура арболитового изделия после формования определяется несколькими факторами: температурой окружающей среды, температурой компонентов смеси и экзотермическими процессами, протекающими в цементном камне в первые часы твердения [6, 143]. В начальный период наблюдается заметный рост температуры из-за выделения тепла при гидратации цемента. Этот параметр влияет на скорость последующих процессов, включая испарение влаги.

4. Геометрия и начальные деформации. Изделия после формования имеют заданные геометрические размеры, однако они подвержены двум основным видам

деформаций. Первый - усадка самого цементного камня, которая возникает в результате испарения свободной воды и протекания процессов гидратации, сопровождающихся уменьшением общего объема системы [57, 164]. Второй, не менее значимый, источник - изменение геометрии самой древесины при изменении ее влажности [15, 140]. Поскольку частицы древесины жестко связаны с цементной матрицей, эти внутренние деформации вызывают напряжения в окружающем камне, что в конечном итоге приводит к деформациям и растрескиванию готовых изделий (короблению) [15, 174].

5. Химический состав. Помимо базового состава (цемент, щепа, песок, вода), в смесь могут вводиться различные модифицирующие добавки. Их наличие изменяет химический состав и микроструктуру материала, что напрямую влияет на его поведение во время сушки [35, 167].

Ниже представлена сводная таблица исходных параметров, характеризующих арболитовое изделие на выходе из производственной цепочки, которые являются основой для построения математической модели сушки [82,162].

Таблица 1.6. - Исходных параметры для цифровой модели ТВО

Параметр	Характеристика	Влияние на процесс твердения и сушки
Структура	Многофазная, гетерогенная система: минеральная матрица, органический наполнитель, многоуровневая пористость (в древесине, цементном камне и их границах).	Определяет сложную кинетику испарения влаги, наличие различных типов пор (связанная и свободная вода).
Начальная влажность	Высокая. Содержит свободную воду для гидратации и связанную воду в порах древесины и цементного камня.	Является начальным запасом влаги, определяющим продолжительность процесса сушки.
Начальная температура	Зависит от температуры окружающей среды и экзотермии гидратации цемента.	Определяет начальный температурный градиент и скорость испарения влаги.

Параметр	Характеристика	Влияние на процесс твердения и сушки
Геометрия	Заданные размеры, но с потенциалом для усадки и значительного коробления из-за гигроскопичности древесины.	Неоднородность влажности и температуры приводит к возникновению внутренних напряжений и рискам растрескивания.
Химический состав	Основной состав (цемент, щепа, песок, вода) и/или модификаторы (силикаты, SO ₂ , наночастицы).	Модификаторы изменяют структуру пор и свойства цементного камня, влияя на коэффициенты диффузии и капиллярности.

Таким образом, базовая технологическая цепочка производства арболита, регламентированная ГОСТ 19222, формирует сложный композитный материал с исходными параметрами. Эти параметры, включающие сложную многофазную структуру, высокую начальную влажность, температурные поля и потенциал для значительных деформаций, создают сложную и нестационарную задачу для моделирования процессов теплопереноса, являясь отправной точкой для дальнейших исследований [61,82].

1.4. Научно-методические предпосылки исследования теплопереноса при сушке арболитовых изделий

Проблема оптимизации процессов сушки арболитовых изделий и управления теплопереносом в них находится на стыке нескольких научных направлений: технологии древесно-цементных композитов, теплофизики строительных материалов и математического моделирования нестационарных процессов [162, 82, 100]. Анализ диссертационных исследований последних десятилетий (см. таблицу 1.7) позволяет выделить несколько ключевых векторов, значимых для работы [49, 173, 104].

1. **Фундаментальные исследования теплофизических свойств и структурообразования.** Работы Кобулиева З.В. (2006) заложили основы понимания взаимосвязи между составом, структурой и теплофизическими

характеристиками материалов на основе минерального и растительного сырья [49]. В этих исследованиях экспериментально обоснованы методы регулирования теплопроводности (0,08...0,17 Вт/м·К) и влагопереноса через управление пористостью и фазовым составом матрицы, что напрямую коррелирует с процессами сушки, где градиенты температуры и влажности являются движущими силами [82, 85, 47].

2. Модификация древесного заполнителя как фактор управления тепломассопереносом. Ряд диссертаций посвящён методам предварительной обработки древесного наполнителя [168, 2, 20]. Термическое модифицирование при температурах 180...250 °С позволяет снизить гигроскопичность древесины на 15...30 %, уменьшить содержание экстрактивных веществ, ингибирующих твердение цемента, и стабилизировать влажностные деформации [167, 35, 97]. Эти исследования имеют прямое отношение к сушке: модифицированный заполнитель формирует более однородную капиллярно-пористую структуру композита, что влияет на кинетику удаления влаги и снижает риск трещинообразования при неравномерном высыхании [21, 170, 102].

3. Разработка составов арболита с заданными эксплуатационными характеристиками. В диссертационных исследованиях Эгамова И., Джумабаева М.Д., Хеирбекова Р.А., Соломоновой Е.Б. и Сары Галебуй рассмотрены различные способы модификации материала: применение шлакощелочных, силикатных и цементозольношламовых вяжущих, искусственная поризация и использование местных органических отходов [173, 22, 169, 137, 130]. При этом теплофизические характеристики (теплопроводность 0,085...0,164 Вт/м·К, температуропроводность, сорбционная влажность 40...85 %) выступают основными критериями при оптимизации рецептур, что формирует необходимую базу для дальнейшего моделирования процессов сушки [31, 32, 126, 138].

4. Анизотропия и структурная неоднородность. В работе Одина А.И. [104] показано, что ориентация древесных частиц существенно влияет на механические свойства материала: прочность при сжатии варьируется от 0,5 до 3,5 МПа в зависимости от направления формования. В процессе сушки такая

анизотропия провоцирует неравномерное распределение внутренних напряжений из-за разницы коэффициентов влагоусадки в различных направлениях, что требует обязательного учета при разработке математических моделей [82, 100, 14].

5. Технологические аспекты сушки и интенсификации процессов. Диссертация Сеничева В.П. (2017) по интенсификации технологических процессов производства древесно-цементных композитов методом ультразвукового воздействия затрагивает вопросы экстрагирования редуцирующих веществ, что влияет на начальную влажность (снижение на 10...20 %) и структуру материала перед сушкой [132, 3, 101]. Разработанная автором математическая модель тепло-массообмена при УЗ-обработке может служить методологической основой для адаптации к задачам описания нестационарного теплопереноса при сушке [162, 100, 82].

Несмотря на обширный массив работ по составу и свойствам арболита, систематических исследований именно нестационарного неизотермического теплопереноса при сушке изделий из арболита в доступных авторефератах не выявлено. Это подчёркивает научную новизну и актуальность диссертационной темы. Большинство работ фокусируется на конечных свойствах затвердевшего материала, тогда как процессы, протекающие на стадии формования и сушки, остаются менее изученными с позиций математического описания и управления [157, 158, 119, 115].

Таблица 1.7. – Анализ диссертационных исследований в области технологии и теплофизики древесно-цементных композитов

№	Автор, год, научная специальность	Название диссертации	Ключевые результаты, релевантные теме	Конкретные численные значения из выводов
1	Исакулов Б.Р., 2015, 05.23.05	Получение высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих	Закономерности изменения механизма формирования прочности и разрушения серосодержащего арболита и	Предел прочности при сжатии 1,9...2,5 МПа, водоудерживающая способность 98...99%, адгезионная прочность

№	Автор, год, научная специальность	Название диссертации	Ключевые результаты, релевантные теме	Конкретные численные значения из выводов
			оптимизированы составы	45,7...59,7 МПа, водопоглощение по массе 5,9...9,2 %.
2	Кобулиев З.В., 2006, 01.04.14	Физико-химические основы структурообразования и теплофизические свойства материалов на основе минерального и растительного сырья	Закономерности влияния состава на теплопроводность и влагоперенос	Теплопроводность: 0,08...0,17 Вт/м·К; Плотность: 400...800 кг/м ³ ; Прочность при сжатии: 0,5...3,5 МПа
3	Эгамов И., 2009, 05.23.05	Физико-химические и технологические основы разработки арболитовых материалов	Составы арболитов с заданными теплофизическими характеристиками	Прочность при сжатии: до 2,5 МПа; Теплопроводность: 0,11...0,14 Вт/м·К; Водопоглощение: 43...47 %
4	Хасаншин Р.Р., 2019, 05.21.05	Термическое модифицирование древесного наполнителя в производстве композиционных материалов	Режимы термомодификации древесины 180–250 °С	Снижение гигроскопичности: на 15...30 %; Уменьшение равновесной влажности: с 18 % до 12...14 %
5	Аминов Л.И., 2011, 05.21.05	Совершенствование технологии производства композиционных материалов на основе древесных наполнителей и минеральных вяжущих	Ультразвуковая и плазменная обработка наполнителя	Снижение содержания экстрактивных веществ: на 25...40 %; Увеличение прочности сцепления: на 15...20 %
6	Горностаева Е.Ю., 2012, 05.23.05	Повышение эффективности древесно-цементных композиций комплексными добавками	Управление реологией и пористой структурой добавками	Прочность при сжатии: увеличение с 1,2 до 2,8 МПа; Теплопроводность: 0,09...0,13 Вт/м·К
7	Джумабаев М.Д., 2017, 05.23.05	Легкий арболитобетон на основе композиционных цементозольношламовых вяжущих	Составы с использованием местных отходов	Плотность: 645...650 кг/м ³ ; Прочность при сжатии: 3,45...3,50 МПа; Теплопроводность: 0,115 Вт/м·К; Водопоглощение: 43...45 %

№	Автор, год, научная специальность	Название диссертации	Ключевые результаты, релевантные теме	Конкретные численные значения из выводов
8	Хеирбеков Р.А., 2023, 2.1.5	Высокоэффективный поризованный арболит на основе шлакосиликатных вяжущих веществ	Поризованный арболит плотностью D600–D700	Плотность: 600...700 кг/м ³ ; Прочность при сжатии: 2,5...4,2 МПа; Теплопроводность: 0,12...0,15 Вт/м·К
9	Соломонова Е.Б., 2004, 05.23.05	Лигнополимерсиликатный арболит	Модификация силикатного вяжущего лигнином	Теплопроводность: снижение на 10...15 % (до 0,09...0,11 Вт/м·К); Водопоглощение: снижение на 20...25 %
10	Сара Галебуй, 2013, 05.23.05	Теплоизоляционный материал на основе отходов хлопчатника Центральной Африки	Арболит на основе хлопковых отходов	Плотность: 350...500 кг/м ³ ; Теплопроводность: 0,07...0,09 Вт/м·К; Прочность при сжатии: 0,8...1,5 МПа
11	Селезнева О.И., 2014, 05.23.05	Композиционный материал на основе опаловых пород и отходов деревообработки	Технология использования диатомитов	Плотность: 500...650 кг/м ³ ; Теплопроводность: 0,10...0,14 Вт/м·К; Водопоглощение: 38–52 %
12	Один А.И., 2009, 05.21.05	Влияние анизотропии строения арболита на прочность стеновых конструкций	Зависимость прочности от ориентации слоёв	Прочность при сжатии: 0,5...3,5 МПа (в зависимости от угла 0...90°); Коэффициент анизотропии прочности: 1,8...2,4
13	Сеничев В.П., 2017, 05.21.05	Интенсификация технологических процессов производства древесно-цементных композитов методом ультразвукового воздействия	Математическая модель тепло-массообмена при УЗ-обработке	Снижение начальной влажности: на 10...20 %; Увеличение прочности: на 15...25 %; Оптимальная частота УЗ: 22±2 кГц
14	Хайруллина Э.Р., 2022,	Переработка древесины мягколиственных пород в композиционные	Влияние модификации на	Паропроницаемость : 0,12...0,18 мг/(м·ч·Па);

№	Автор, год, научная специальность	Название диссертации	Ключевые результаты, релевантные теме	Конкретные численные значения из выводов
	05.21.03; 05.21.05	материалы для стеновых панелей	паропроницаемость	Теплопроводность: 0,09...0,13 Вт/м·К
15	Сальникова А.С., 2023, 2.1.5	Высокопрочные бетоны для мелкоштучных многопустотных стеновых изделий	Реологические и теплофизические характеристики	Прочность при сжатии: 15...25 МПа; Плотность: 1800...2200 кг/м ³ ; Теплопроводность: 0,8...1,2 Вт/м·К
16	Пичугин А.П., 2000, 05.23.05	Коррозионностойкие материалы для полов и ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий	Механизмы влагопереноса в композитах	Коэффициент влагопереноса: $(1,2...2,5) \cdot 10^{-7}$ кг/(м·с·Па); Стойкость к циклам увлажнения-высушивания: ≥ 50 циклов

1.5. Тепломассоперенос в капиллярно-пористой структуре арболита: физические основы сушки и влияние режимов на структуру

1.5.1. Механизмы переноса энергии (теплопроводность, конвекция и излучение)

Процессы ТВО при твердении арболитового композита базируются на сопряженных механизмах тепломассопереноса [82, 87, 162]. Формирование температурного поля в материале осуществляется посредством теплопроводности, конвекции и теплового излучения. Вклад каждого из этих механизмов зависит от параметров камеры ТВО (температуры, влажности, скорости движения), а также от геометрических характеристик изделия [11, 84, 115]. Совокупное действие указанных факторов создает необходимый градиент температуры и давления, который служит движущей силой для миграции влаги из пористой структуры материала [82, 158].

Теплопроводность является наиболее характерным механизмом передачи тепла в твердых материалах. Она представляет собой процесс передачи внутренней энергии от более горячих участков к более холодным путем колебательных, вращательных и поступательных движений частиц (молекул,

атомов, ионов) без перемещения самой макроскопической частицы вещества [82, 83, 87]. В контексте капиллярно-пористых материалов, таких как арболит, этот процесс происходит через твердую матрицу (цементный камень, частицы древесины) и через заполняющие поровое пространство жидкости (вода) и газы (воздух) [49, 102, 126]. Эффективный коэффициент теплопроводности такого композита является сложной функцией отдельных коэффициентов теплопроводности его компонентов и их объемного соотношения [14, 16, 25]. При этом следует учитывать, что теплопроводность воды примерно в четыре раза выше, чем у воздуха, поэтому даже небольшие изменения влажности материала могут существенно влиять на его теплопроводные свойства [85, 112]. В процессе сушки, когда влага испаряется из пор, заменяясь воздухом, эффективная теплопроводность арболита постепенно снижается [25, 133]. Этот эффект важен, поскольку он изменяет тепловой режим внутри самого изделия, замедляя дальнейший прогрев глубинных слоев по мере приближения к сухому состоянию [11, 115]. Моделирование теплопроводности в таких сложных средах часто требует использования теорий смешения, учитывающих морфологию пористой структуры [20, 126].

Конвекция - это процесс переноса тепла в результате перемещения макроскопических объемов жидкости или газа [82, 86]. В задачах о сушке конвекция играет двойную роль. Во-первых, это внешний теплообмен между поверхностью изделия и сушильным агентом (например, горячим воздухом или инертным газом в сушильной камере). Этот процесс определяет скорость, с которой тепловая энергия подводится к внешней границе материала. Коэффициент теплоотдачи при конвекции зависит от скорости движения сушильного агента, его теплофизических свойств и геометрии изделия [85, 115]. Во-вторых, конвекция может играть роль и внутри самого пористого тела, особенно если имеется значительная разница давлений на разных его поверхностях. Внутри крупных пор и каналов возможно возникновение микроконвективных потоков, которые способствуют переносу тепла быстрее, чем чистая теплопроводность [63, 100]. Однако для большинства строительных

материалов, включая арболит, с их мелкопористой структурой, основной вклад в перенос тепла внутри осуществляют теплопроводность и, в меньшей степени, теплопроводность газов в порах [25, 87]. Тем не менее, при высоких скоростях сушки или использовании технологий с принудительной циркуляцией воздуха, конвективный перенос на границе становится доминирующим фактором, определяющим весь процесс [11, 115].

Тепловое излучение, представляет собой перенос энергии в виде электромагнитных волн [84, 85]. В отличие от теплопроводности и конвекции, она не требует наличия материальной среды для распространения. Любое тело с температурой выше абсолютного нуля излучает энергию, причем интенсивность излучения возрастает пропорционально четвертой степени его абсолютной температуры (закон Стефана-Больцмана) [84]. В процессе сушки излучение начинает играть заметную роль при повышенных температурах. Например, при использовании инфракрасных (ИК) излучателей, которые являются высокоэффективным способом передачи тепла, именно излучение является основным механизмом [23]. Даже при обычной конвективной сушке на открытом воздухе или в печи радиационный вклад не пренебрегаем, так как поверхность горячего изделия излучает энергию в окружающее пространство, а также поглощает излучение от более горячих стен сушильной камеры [11, 84]. Исследования показывают, что вклад излучения в общий теплоперенос возрастает с увеличением разницы температур между поверхностью и окружающей средой, а также с уменьшением плотности материала [11, 15]. Для легких арболитовых изделий, характеризующихся низкой плотностью и высокой пористостью, этот эффект может быть более выражен по сравнению с плотными бетонами [16, 25]. Таким образом, при моделировании процессов сушки, особенно при высокотемпературных режимах, нельзя пренебрегать радиационным теплообменом, который вносит свой вклад в общее тепловое поле внутри материала [84, 85].

В совокупности эти три механизма формируют сложное нестационарное поле температур в сушащемся арболите [82, 158]. Начальный скачок температуры на

поверхности, вызванный конвективным теплообменом с горячим сушильным агентом, создает градиент температур, который приводит к теплопроводному потоку тепла внутрь материала [83, 87]. Этот поток, в свою очередь, обеспечивает энергию для испарения влаги, находящейся в поверхностных слоях [115, 162]. Эффект излучения может изменить распределение температуры, делая его более равномерным или, наоборот, усиливая перегрев поверхности [11, 84]. Понимание относительной роли каждого из этих механизмов является необходимо для создания адекватной математической модели процесса сушки, которая позволит прогнозировать динамику и кинетику как температуры, так и влажности в изделии [82, 157, 158].

1.5.2. Механизмы переноса вещества (диффузия пара и жидкости)

Удаление влаги из капиллярно-пористого материала, такого как арболит, невозможно без рассмотрения механизмов массопереноса [82, 112]. В отличие от теплопередачи, где преобладают теплопроводность и конвекция, перенос влаги осуществляется преимущественно за счет диффузионных процессов, которые можно разделить на два основных типа: диффузия паровой фазы и диффузия жидкой фазы [112, 113]. Эти механизмы работают параллельно и их относительный вклад меняется в ходе процесса сушки, завися от начальной влажности материала и условий окружающей среды [82, 115].

Диффузия паровой фазы, представляет собой направленное движение молекул водяного пара под действием градиента парциального давления (или, что эквивалентно, градиента относительной влажности) [42, 69, 113]. Внутри пор арболита, заполненных воздухом и водяным паром, молекулы пара постоянно совершают хаотичное тепловое движение [82, 87]. Если в материале существует область с более высоким парциальным давлением пара (например, в глубоких, еще не высохших слоях) и область с более низким давлением (на поверхности, контактирующей с сухим сушильным агентом), то возникает чистый поток пара из зоны высокого давления в зону низкого [112, 113]. Этот процесс описывается законом Фика и является одним из двух ключевых путей для выхода влаги из

глубины материала [42, 69, 113]. Скорость паровой диффузии напрямую зависит от температуры: с повышением температуры давление насыщенного пара резко возрастает, что увеличивает градиент и, соответственно, скорость диффузии [82, 85]. Именно поэтому повышение температуры сушки значительно ускоряет процесс в целом [115, 119]. Паровая диффузия особенно важна когда поверхностные слои уже стали достаточно сухими, и испарение с них затруднено [82, 112]. Тогда движущей силой для удаления влаги изнутри выступает именно паровый поток [113, 157].

Диффузия жидкой фазы, или фильтрационный поток, представляет собой движение капиллярной или свободной воды под действием градиента гидростатического давления [112, 113]. В порах, полностью заполненных водой, ее движение будет аналогично течению жидкости через пористую среду, описываемое уравнением Дарси [82, 87]. Однако в процессе сушки картина усложняется из-за наличия двух фаз - воды и воздуха [112]. Жидкая вода находится в порах и капиллярах, а воздух занимает другую часть объема пор. Перемещение воды в такой двухфазной системе является результатом сложного взаимодействия капиллярных сил, сил поверхностного натяжения и градиента давления [27, 66, 112]. На ранних стадиях сушки, когда материал практически полностью насыщен водой, фильтрационный поток может играть заметную роль [82, 112]. По мере высыхания количество свободной воды уменьшается, и этот механизм переходит в состояние подавления [112, 113]. Более важным процессом становится движение воды за счет капиллярного поднятия (при увлажнении) или, наоборот, капиллярного отсоса, который препятствует быстрому удалению влаги [27, 66, 112]. Кроме того, в порах диаметром менее 100 нанометров может проявляться эффект Кнудсена, когда длина свободного пробега молекул сравнима с размерами канала, что также влияет на диффузионные свойства [54, 112].

Помимо диффузионных механизмов, в процессе сушки важную роль играет движение влаги, вызванное капиллярными силами [27, 29, 112]. Капиллярные силы возникают из-за кривизны мениска между водой и воздухом в порах [87, 112]. Из-за этого мениск создает разницу давлений (давление на выпуклой стороне

больше, чем на вогнутой), которая стремится переместить воду [27, 112]. Этот процесс является основным механизмом переноса влаги в порах среднего и мелкого размера [27, 29, 112].

Таким образом, перенос влаги из арболита является комплексным явлением, в котором участвуют несколько механизмов [82]. На начальном этапе, когда материал сильно увлажнен, впереди могут идти как фильтрационные потоки, так и капиллярный подсос [113]. По мере снижения влажности доля капиллярного переноса остается высокой, пока есть связная водная фаза [27, 112]. На завершающей стадии, когда остается лишь адсорбционная влага, связанная с поверхностью твердой матрицы, основным механизмом становится диффузия водяного пара через поры, заполненные воздухом [42]. Понимание этих механизмов и их взаимного перехода позволяет объяснить характер кривой сушки, которая обычно состоит из периода постоянной скорости (когда испарение с поверхности ограничивает весь процесс) и периода падающей скорости (когда перенос влаги изнутри становится медленнее, чем испарение с поверхности) [82, 112, 115].

1.5.3. Сопряженные процессы тепломассопереноса

Наиболее сложным и фундаментальным аспектом нестационарного тепломассопереноса является его сопряженный характер [82, 162]. Это означает, что процессы теплопередачи и массопереноса не могут рассматриваться как независимые; они взаимно связаны и влияют друг на друга через общую движущую силу - градиент температуры и влажности, а также через физические явления на межфазных границах, в первую очередь, через фазовые превращения [82, 87, 162]. Центральное место в этой взаимосвязи занимает испарение влаги на границе раздела фаз «твердое тело – поровое пространство» [82, 115]. Для того чтобы молекулы воды из жидкой фазы перешли в газообразную (пар), им необходимо сообщить дополнительную энергию, известную как скрытая теплота испарения [82, 85]. Эта энергия забирается из самого материала, что приводит к локальному понижению температуры вблизи зоны испарения [47, 115]. Этот эффект, известный как испарительное охлаждение, является мощным регулятором

температурного режима [39, 115]. Чем активнее происходит испарение (что зависит от температуры, влажности и скорости сушильного агента), тем сильнее охлаждается поверхность материала [11, 115]. Это, в свою очередь, уменьшает градиент температур и замедляет теплопроводный поток тепла внутрь изделия, создавая обратную связь [82, 162]. Таким образом, процесс массопереноса (испарение) напрямую управляет локальным тепловым режимом [82, 115]. Аналогичный процесс происходит и в обратном направлении - при конденсации водяного пара внутри пор материала [45, 47]. Процесс конденсации сопровождается выделением скрытой теплоты, которая нагревает окружающую среду [82, 85]. Если в сушащемся материале образуется так называемый «холодный узел», куда из окружающей среды попадает влажный воздух, то в этом узле может происходить конденсация, выделение тепла и локальный перегрев [45, 47, 115].

Эта тесная связь формализуется в уравнениях, описывающих сопряженный тепломассоперенос [82, 162]. Общепринятая модель, основанная на работах Лыкова, предполагает наличие в уравнении теплового баланса дополнительного члена, представляющего собой работу, совершаемую силами капиллярного давления при перемещении влаги [61, 81, 162]. Этот член и является мерой сопряжения. Он прямо пропорционален скорости испарения/конденсации и скрытой теплоте фазового перехода [61, 81, 162]. Уравнение для переноса влаги (массового баланса) также может содержать член, учитывающий перенос массы вместе с тепловым потоком (эффект Дюфура) [82, 113]. Хотя этот эффект обычно меньше, чем сопряжение по испарению, он также вносит свой вклад в общую картину [82, 113]. Таким образом, система уравнений для нестационарного тепломассопереноса представляет собой систему двух взаимосвязанных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, в которых искомыми функциями являются температура $t(x,y,z,\tau)$ и влажность (или концентрация водяного пара) $u(x,y,z,\tau)$ [82, 157, 158]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_q \nabla^2 t + \epsilon r \frac{c_m}{c_q} \frac{\partial u}{\partial \tau}; \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta_T \nabla^2 t; \quad (1.2)$$

где u – влажность; t – температура; τ – время; a_q, a_m – коэффициенты тепло- и массопроводности; δ_T – термоградиентный коэффициент, отнесенный к разности влагосодержаний; r – удельная теплота фазового перехода; ε – критерий фазового перехода; c_q – удельная теплоемкость; c_m – удельная массоемкость.

Сложность задачи усугубляется тем, что коэффициенты, входящие в эти уравнения - коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, коэффициенты диффузии - сами являются функциями от температуры и влажности [14, 25, 112]. Например, коэффициент теплопроводности меняется по мере замены воды в порах воздухом [14, 25]. Коэффициент диффузии влаги экспоненциально растет с температурой [82, 113]. Капиллярная проводимость для жидкой воды сильно зависит от степени насыщения пор влагой [6, 8, 112]. Эта зависимость является многозначной и характеризуется кривой влажностного гистерезиса (кривой сорбции и десорбции), что добавляет еще один уровень нелинейности в задачу [6, 8, 112]. Таким образом, мы имеем дело с системой уравнений, где не только переменные, но и коэффициенты этой системы зависят от самих же переменных [82, 158]. Такие задачи решаются только численными методами, например, методом конечных элементов, после дискретизации области по пространству и времени [38, 76, 158].

В конечном счете, сопряженность процессов означает, что для управления процессом сушки недостаточно просто задать температуру и влажность сушильного агента [115, 119]. Необходимо понимать, как эти параметры будут взаимодействовать с материалом, как будет формироваться внутреннее поле температур и влажности, и каковы будут последствия этого для структуры и свойств изделия [82, 162]. Прямое следствие этого - возможность возникновения внутренних напряжений, трещинообразования и других дефектов, если темпы испарения на поверхности окажутся слишком высокими по сравнению с темпами массопереноса из глубины материала [11, 57, 115]. Поэтому любая научная работа, посвященная сушке, должна базироваться на принципах сопряженного

теплопереноса, признавая единство тепловых и массовых явлений в пористой среде [82, 87, 162].

1.5.4. Нестационарность, неизотермичность и структурная зависимость коэффициентов переноса

Анализ нестационарного теплопереноса в капиллярно-пористых материалах, таких как арболит, выявляет ряд основных характеристик, которые определяют сложность и уникальность данного класса задач [82, 87, 162]. К ним относятся нестационарность, неизотермичность, а также сильная зависимость коэффициентов переноса от структуры и текущего состояния самого материала [14, 25, 112]. Понимание этих характеристик является ключом к правильной постановке задачи и выбору метода ее решения [82, 158].

Нестационарность процесса означает, что все ключевые параметры - температура, влажность, концентрация компонентов - являются функциями не только пространственных координат, но и времени [82, 83]. В случае сушки арболита это проявляется в том, что поля температуры и влажности внутри изделия непрерывно изменяются на протяжении всего процесса [115, 157]. В начальный момент времени, сразу после помещения изделия в сушильную камеру, на его поверхности устанавливается температура и влажность сушильного агента [82, 115]. Однако в глубине материала параметры остаются близкими к начальным (например, к температуре формования и естественной влажности) [11, 115]. Со временем тепловая и влажностная волны проникают внутрь, и поля постепенно выравниваются [82, 158]. Характерный временной масштаб этого процесса определяется коэффициентом температуропроводности и коэффициентом диффузии влаги [82, 83]. Для толстых арболитовых изделий этот масштаб может составлять часы или даже дни [115, 119]. Нестационарный характер означает, что для описания процесса необходимо использовать параболические дифференциальные уравнения в частных производных (уравнения теплопроводности и диффузии), а не алгебраические соотношения, которые справедливы для стационарных (установившихся) режимов [82, 83, 156]. Решение

таких уравнений требует знания начальных условий и граничных условий (характер взаимодействия с границей с окружающей средой) [82, 156].

Неизотермичность, или неравномерность температурного поля, является прямым следствием нестационарности и является одной из причин сложности задачи [11, 82]. В процессе сушки никогда не достигается мгновенное тепловое равновесие по всему объему изделия [82, 115]. Как правило, поверхностные слои нагреваются до температуры сушильного агента быстрее, чем внутренние [11, 115]. Разница температур между поверхностью и сердцевиной может быть весьма значительной, особенно при высоких температурах сушки или использовании интенсивных методов подвода тепла (например, ИК-излучение) [23, 84]. Эта температурная неоднородность создает градиенты, которые, в свою очередь, влияют на движение влаги [82, 112]. С одной стороны, более высокая температура на поверхности увеличивает скорость испарения [85, 115]. С другой стороны, она снижает эффективную теплопроводность материала, замедляя приток тепла к глубинным слоям [14, 25]. Более того, как было отмечено ранее, испарение само по себе является процессом охлаждающим, что может привести к формированию сложных, неинтуитивных температурных профилей, где в самом активном месте испарения температура оказывается ниже, чем в соседних областях [39, 115]. Эти неизотермические эффекты усиливают нелинейность задачи и требуют учета в математическом моделировании [82, 158].

Ключевой особенностью пористых материалов является их структурная зависимость, проявляющаяся в том, что все коэффициенты переноса (теплопроводности, теплоемкости, диффузии) не являются константами, а зависят от текущего состояния материала, в первую очередь от его влажности и температуры [14, 25, 112]. Эта зависимость является нелинейной и многообразной [6, 8, 112].

Как уже упоминалось, замена воды ($\lambda \approx 0,6$ Вт/(м·К)) на воздух ($\lambda \approx 0,026$ Вт/(м·К)) в порах кардинально меняет теплопроводность [14, 16, 25]. Аналогично, коэффициент диффузии водяного пара в порах сильно зависит от того, заполнены ли они водой или воздухом [42, 112, 113]. В сухом материале диффузия

происходит только в газовой фазе, а в увлажненном - дополнительно возможен капиллярный перенос [82, 112]. Коэффициент капиллярной проводимости для жидкой воды является функцией от степени насыщения пор, часто описываемой кривой влажностного гистерезиса [6, 8, 112].

Большинство коэффициентов переноса имеют сильную температурную зависимость [82, 85]. Коэффициент диффузии, как правило, растет экспоненциально с температурой [113]. Теплопроводность также увеличивается, хотя зависимость здесь менее выражена [85]. Самым важным является тот факт, что скрытая теплота испарения, являющаяся коэффициентом сопряжения, слабо зависит от температуры в широком диапазоне, что позволяет иногда считать ее постоянной величиной в упрощенных моделях [82, 85].

Арболит, благодаря своей технологии производства, часто обладает анизотропной структурой [24, 72, 104]. Частицы древесины имеют определенную ориентацию, что приводит к различию свойств вдоль и поперек этой ориентации [24, 104]. Это означает, что коэффициенты теплопроводности и диффузии влаги становятся тензорами второго ранга, а не скалярами [82, 100]. В анизотропном материале тепловые и влажностные потоки будут распространяться с разной скоростью в разных направлениях [24, 72]. Это имеет критическое значение для процесса сушки, так как может приводить к неравномерному удалению влаги с различных поверхностей изделия и, как следствие, к возникновению значительных внутренних напряжений и трещинообразованию [24, 57, 104].

Таким образом, задача тепломассопереноса в арболите - это не просто решение уравнений в частных производных, а сложная нелинейная проблема, в которой коэффициенты этих уравнений являются функциями искомых переменных и зависят от микроструктуры материала [14, 25, 112]. Учет всех этих факторов - нестационарности, неизотермичности и структурной зависимости - является обязательным условием для создания точной математической модели, способной адекватно описывать реальный процесс сушки и служить основой для его оптимизации [82, 157, 158, 162].

1.5.5. Взаимосвязь тепломассопереноса со структурообразованием и механическими свойствами строительного материала

Процесс сушки арболитового изделия - это не только удаление влаги, но и сложный процесс структурообразования, который напрямую влияет на его конечные механические и эксплуатационные свойства [49, 173]. Нестационарный тепломассоперенос является движущей силой этих структурных изменений [82, 115]. Неправильно выбранный режим сушки может привести не только к увеличению продолжительности процесса и расходу энергии, но и к формированию внутренних дефектов, таким как трещины, и ухудшению долговечности конструкции [11, 57, 115].

Основным физическим явлением, связывающим тепломассоперенос со структурой, является усадка материала [52, 174]. Усадка - это уменьшение линейных размеров и объема материала при высыхании [52, 174]. Она возникает из-за того, что в процессе испарения влаги из пор происходит уменьшение межмолекулярных расстояний в твердой фазе [112, 174]. В арболите усадка складывается из нескольких компонент: усадки цементного камня, усадки древесины и усадки, связанной с изменением капиллярных сил в порах [49, 102, 174]. Интенсивность и характер усадки зависят от многих факторов, включая начальную влажность, состав, а также, что самое главное, от скорости удаления влаги [11, 57, 174]. Если влага испаряется с поверхности очень быстро, а поступление влаги из глубины не успевает за этим, то в поверхностном слое образуется напряженное состояние [11, 57]. Чтобы компенсировать это, слой начинает сжиматься, в то время как внутренняя, более влажная часть еще не испытывает таких деформаций [52, 57]. Возникает градиент усадочных деформаций, который порождает значительные внутренние напряжения [52, 57, 174].

Если величина этих внутренних напряжений превышает прочность материала на растяжение, в нем начинают зарождаться и расти микротрещины [11, 57]. Поскольку прочность арболита на растяжение значительно ниже, чем на сжатие, он очень чувствителен к этому виду нагрузок [31, 104]. Трещинообразование

может происходить на самых ранних стадиях сушки, еще до достижения полной сухости, и часто является необратимым повреждением, которое снижает прочность, водопроницаемость и морозостойкость готового изделия [11, 57, 174]. Исследования показывают, что риск образования трещин возрастает при быстрой сушке с высокой температурой, так как это увеличивает градиенты влажности и температуры внутри материала [11, 57, 115].

Таким образом, процесс сушки должен рассматриваться как процесс управления внутренним напряженно-деформированным состоянием (НДС) изделия [11, 115]. Оптимальный режим сушки - это такой режим, который позволяет удалить необходимое количество влаги с минимально возможными градиентами влажности и температуры, а значит, и с минимальными внутренними напряжениями [115, 119]. Это достигается за счет постепенного изменения параметров сушильного агента (температуры, относительной влажности, скорости движения) во времени [115, 161]. Например, вместо того чтобы сразу задавать высокую температуру, можно начать с более мягкого режима, постепенно его усиливая [115, 119].

Помимо механических свойств, режим сушки влияет и на другие характеристики арболита [25, 115]. Например, быстрое испарение воды приводит к образованию более крупных и соединенных между собой пор, что увеличивает общую пористость и, как следствие, снижает плотность и теплопроводность материала [16, 25]. Однако это же может привести к снижению его долговечности, так как открытая пористая структура более восприимчива к воздействию агрессивных сред и циклам замораживания-оттаивания [38, 119]. Медленная, контролируемая сушка способствует формированию более мелкозернистой и замкнутопористой структуры, что благоприятно сказывается на долговечности материала [38, 119].

Таким образом, исследование тепломассопереноса при сушке арболита не сводится лишь к расчету полей температуры и влажности [82, 158]. Оно также требует прогнозирования и предотвращения структурных дефектов, таких как усадка и трещинообразование [11, 57, 115]. Для этого математические модели

переноса влаги и тепла необходимо сопрягать с уравнениями механики деформируемого твердого тела, описывающими развитие усадочных напряжений [82, 162]. Только связанный учет этих процессов позволяет обосновать режимы сушки, гарантирующие целостность и долговечность готовых изделий [158, 162].

1.5.6. Влияние термовлажностного режима на кинетику формирования свойств композита

Для иллюстрации влияния термовлажностного режима в процессах, связанных с формированием структуры и свойств строительных композитов, можно привлечь аналогию с процессом твердения и набора прочности бетона [6, 42, 95]. Хотя арболит и бетон имеют разную природу (арболит - это композит с органическим наполнителем, а бетон - с минеральным), принципиальная зависимость кинетики их структурообразования от температуры и влажности является универсальной для любого цементного композита [6, 42, 95].

График, демонстрирующий зависимость набора прочности бетона от времени и температуры, наглядно показывает, что именно условия сушки (термовлажностный режим) являются катализатором химических реакций гидратации цемента (см. рис. 1.6) [7, 35, 95]. На графике видно, что при более высокой температуре бетон достигает проектной прочности значительно быстрее [7, 95]. Это происходит потому, что повышение температуры увеличивает скорость химических реакций, ускоряя процесс роста кристаллической решетки цементного камня [7, 35, 95].

Применительно к арболиту, аналогия с графиком набора прочности бетона может быть интерпретирована следующим образом. Высокотемпературная сушка, подобно интенсивному прогреву бетона, может ускорить начальные этапы процесса [115, 119]. Однако, в отличие от бетона, где ускорение твердения в основном полезно, в арболите быстрое испарение влаги ведет к совершенно иным, как правило, негативным последствиям [11, 57, 115]. Быстрое испарение не позволяет структуре материала "спокойно" адаптироваться к уменьшению объема

влаги [52, 174]. Вместо медленного, равномерного смещения частиц и формирования плотной структуры, происходит резкий перерасход воды, что приводит к: формированию крупнопористой структуры (быстро испаряющаяся вода оставляет за собой большие поры, соединенные между собой)[16, 25]; увеличению усадочных напряжений и риску трещинообразования [11, 57]; неравномерному твердению цементной матрицы (в поверхностных слоях, где испарение происходит быстрее, цементная матрица может затвердеть раньше, чем в глубине, что создает жесткую, хрупкую корку, которая не сможет выдержать усадочные напряжения в нижележащих слоях) [11, 57].

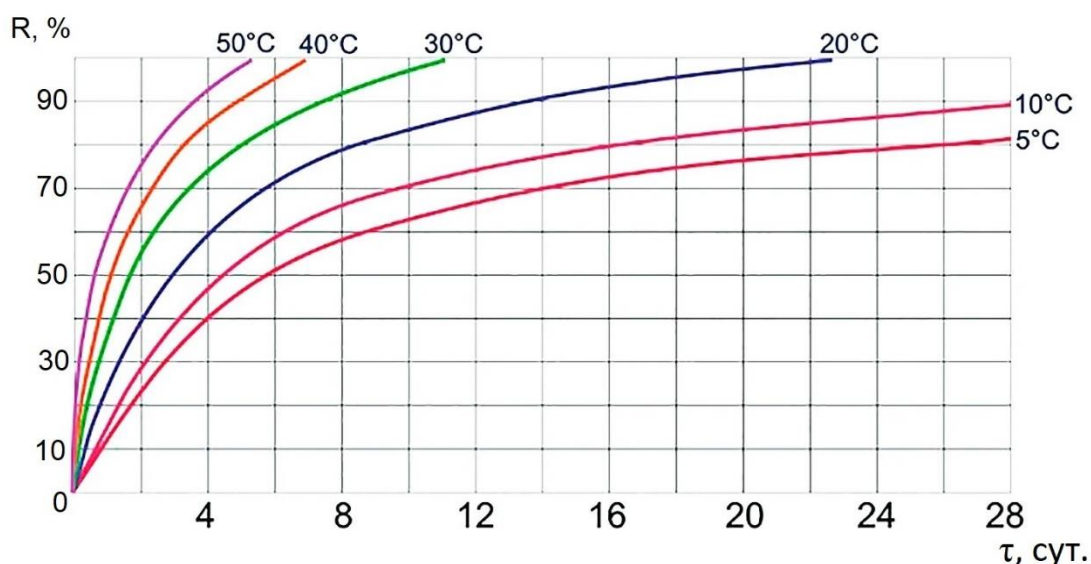


Рис. 1.6. График твердения бетона: зависимость набора прочности от времени и температуры.

Хотя график набора прочности бетона иллюстрирует положительный эффект ускорения процесса при повышении температуры, для арболита существует рациональный режим сушки [115, 119]. Он должен быть достаточно интенсивным, чтобы обеспечить экономически выгодную продолжительность процесса, но в то же время достаточно мягким, чтобы не вызвать разрушительных структурных изменений [115, 119, 161]. Именно научное исследование нестационарного теплопереноса позволяет найти компромисс, разработав технологию, которая, подобно оптимальному режиму твердения бетона, обеспечивает максимальное качество продукта при минимальных затратах ресурсов.

1.6. Выводы по главе 1. Постановка задач исследования

Проведённый обзор научно-технической литературы и диссертационных исследований показывает, что в настоящее время накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал по разработке составов, методам модификации древесного заполнителя, а также по определению теплофизических и механических характеристик арболита в равновесном состоянии [49,173]. Вместе с тем вопросы управления нестационарными процессами неизотермического теплопереноса на этапе 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 и риск трещинообразования в процессе сушки не получили системного математического описания и экспериментальной верификации [82]. Выявленный пробел обуславливает научную новизну и практическую значимость настоящего исследования, направленного на разработку математической модели сопряжённого теплопереноса, экспериментальное определение зависимостей коэффициентов тепло- и массопроводности арболита от текущей влажности и температуры, а также на оптимизацию режимов сушки с целью минимизации энергозатрат и дефектообразования. Решение данной задачи позволит создать научно обоснованную базу для совершенствования технологии производства арболитовых изделий и перехода к управляемым, ресурсо- и энергосберегающим режимам их термовлажностной обработки.

Анализ фундаментальных явлений теплопереноса показывает, что процесс сушки арболита - это сложная, нестационарная, неизотермическая и сопряженная задача [82, 87]. Она определяется совокупностью механизмов теплопроводности, конвекции, радиации и диффузии паровой и жидкой фаз, связанных между собой через фазовые превращения и зависящих от структуры материала [112, 162]. Управление этим процессом является ключом к получению качественного арболитового изделия и сводится к контролю внутренних напряжений и формированию оптимальной поровой структуры [11].

При выполнении теоретических и экспериментальных исследований была выдвинута и сформулирована научная гипотеза, что управление кинетикой структурообразования, твердения и сушки арболитовых изделий на основе предиктивного математического моделирования сопряженных нестационарных процессов тепло-массопереноса 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.

Цель диссертационного исследования является разработка адаптивных технологий производства строительных изделий из арболита на основе математического моделирования сопряженных процессов нестационарного тепло-массопереноса 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 влагопроводности 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.

В соответствии с поставленными задачами, **во второй главе** представлены материалы, методы и математический аппарат исследований. Обоснован выбор сырьевых компонентов и описана технология изготовления лабораторных образцов арболита в стальной опалубке. Детально рассмотрены экспериментальные методики и аппаратное оформление для непрерывного мониторинга нестационарных полей температуры и влажности в теле блока с использованием термоэлектрических

преобразователей и игольчатого влагомера. Сформирована математическая постановка задачи взаимосвязанного нестационарного тепломассопереноса с учетом физико-химических факторов структурообразования. Обосновано применение численно-аналитического метода микропроцессов для решения нелинейных краевых задач с переменными коэффициентами переноса.

В третьей главе приведены результаты натуральных экспериментов по идентификации нестационарных параметров тепломассопереноса и кинетики структурообразования арболита при термовлажностной обработке. На основе длительного мониторинга установлены пространственно-временные закономерности распределения температуры и влажности по толщине блока-сырца, выявлена существенная асимметрия профилей, обусловленная паронепроницаемостью стальной опалубки. Выполнена количественная идентификация коэффициентов переноса (температуро- и массопроводности, теплопроводности, удельной теплоемкости) и получены их функциональные зависимости от текущего влагосодержания композита. Впервые для арболита рассчитаны мощности внутренних физико-химических источников и стоков: экзотермического тепловыделения при гидратации портландцементных минералов и поглощения влаги, что сформировало необходимую информационно-параметрическую базу для последующего цифрового моделирования.

В четвертой главе выполнено цифровое моделирование сопряженных процессов тепломассопереноса и разработаны адаптивные режимы термовлажностной обработки. Сформулированы и аналитически решены краевые задачи нестационарного тепло- и влагопереноса как для этапа твердения в металлической опалубке, так и для различных технологических схем сушки после распалубки (на проницаемых, непроницаемых и частично проницаемых основаниях). Проведена верификация разработанной цифровой модели по критерию согласия Пирсона, подтвердившая ее высокую адекватность независимым экспериментальным данным. На основе полученных решений предложен циклический алгоритм адаптивного цифрового управления режимами ТВО на базе концепции «цифрового двойника».

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АРБОЛИТА

2.1. Материалы и технология изготовления образцов

В настоящем разделе подробно описаны материалы и технологические регламенты, применяемые при изготовлении экспериментальных образцов арболита, предназначенных для комплексного исследования процессов тепло- и влагопереноса. Особое внимание уделено обоснованию выбора каждого компонента композиционной смеси, который соответствует требованиям действующих ГОСТ и ТУ, что обеспечивает стабильность физико-механических и эксплуатационных характеристик получаемого материала. Последовательно рассмотрены основные составляющие арболитовой смеси: портландцемент в качестве минерального вяжущего, древесный наполнитель из вторичного сырья деревообработки, вода затворения, а также химические добавки-минерализаторы, нейтрализующие тормозящее влияние экстрактивных веществ древесины на гидратацию цементного камня. Завершает раздел детальное описание технологического цикла изготовления образцов, включающего точное дозирование компонентов, формование в стальной опалубке, контролируемый тепловой режим начального твердения и последующую воздушно-сухую выдержку, что гарантирует формирование однородной капиллярно-пористой структуры, необходимой для проведения достоверных экспериментальных исследований.

2.1.1. Вяжущее вещество

При изготовлении арболита в качестве основного вяжущего компонента применен портландцемент ЦЕМ I 42,5Н не содержащий минеральных добавок, полностью соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020 (приложение 1) изготовленный ООО «Серебрянский цементный завод» (Рязанская область, Михайловский район, поселок Октябрьский). Химический состав

портландцемента, установленный паспортом качества, представлен в таблице 2.1. Минералогический состав портландцемента приведен в таблице 2.2.

Физико-химические и механические свойства исходного портландцемента установлены по методикам ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема» и ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии» (приложение 1). Результаты испытаний, выполненных заводом-изготовителем, приведены в таблицах 2.3 и 2.4. Применяемый для изготовления образцов торкрет-бетона портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н удовлетворяет требованиям ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» и ГОСТ 30515-2013 «Цементы. Общие технические условия» (приложение 1).

Таблица 2.1 - Химический состав клинкера, %

Оксиды						Хлор-ионы
Кремния	Алюминия	Железа(III)	Кальция	Магния	Серы(VI)	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻
20,27	5,71	4,37	66,03	1,55	0,68	0,015

Таблица 2.2 – Минералогический состав клинкера, %

Наименование химического соединения	Химическая формула	Содержание в клинкере
Трёхкальциевый силикат (алит)	3CaO·SiO ₂ (C ₃ S)	70,09
Двухкальциевый силикат (белит)	2CaO·SiO ₂ (C ₂ S)	5,15
Трёхкальциевый алюминат	3CaO·Al ₂ O ₃ (C ₃ A)	7,71
Четырёхкальциевый гидроферрит (целит)	4CaO·Fe ₂ O ₃ (C ₄ AF)	13,29

Таблица 2.3 - Физические свойства портландцемента

Тонкость помола, % по остатку на сите		Удельная поверхность, м ² /кг	Сроки схватывания, мин.		Нормальная густота, %	Равномерность изменения объема (расширение), мм
№008	№0045		начало	конец		
0,2	4,0	357	151	210	28,49	0,4

Таблица 2.4 - Пределы прочности портландцемента, МПа

При сжатии в возрасте, сут.		При сжатии, после ТВО (1 группа)
2	28	
26,2	54,9	

2.1.2. Древесный наполнитель

Заполнители готовились из органического древесного вторичного технологического сырья, преимущественно горбыля и обрезков путем дробления и отсева. Технологическое древесное сырье поставляется на предприятие как отдельно по породам, так и в смешанном виде в различных соотношениях. Основная древесная порода вторичного сырья - сосна. Вторичное технологическое сырье из древесины выдерживаются под навесом не менее месяца при положительной температуре, а затем измельчается в дробленку. Необходимые размеры дробленки достигались на измельчителе ИД-600 ТУ 4851-002-17534020-2014 (см. рис. 2.1), который был разработан специально для переработки горбыля, обрезки и других отходов деревообработки в щепу.

При дроблении и отсева применялась древесина равновесной относительной влажности не более 30%, так как при влажности выше этого предела нарушается нормальная работа дробилок, сит и грохотов.

Состав дробленки получаемой дробленки на измельчителе приведен в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Технические характеристики древесного заполнителя для изготовления образцов арболита

Наименование показателя	Значение
Массовая доля коры, %	9,5
Массовая доля гнили, %	4,0
Массовая доля минеральных примесей, %	Менее 1,0
Массовая доля остатков на ситах с отверстиями диаметром:	
20 мм, %	4
10 мм, %	41
5 мм	99
2,5 мм, %	1,0
на поддоне, %	
Обугленные частицы и металлические включения	отсутствуют



Рис. 2.1. Измельчитель ИД-600

2.1.3. Вода для приготовления бетонной смеси

Вода, использованная для приготовления арболита, соответствовала требованиям ГОСТ 23732 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия» (приложение 1), в ней не содержится пленок от нефтепродуктов, жиров или масел. Водородный показатель – рН = 5,5. Перед

приготовлением бетонной смеси вода была исследована на содержание примесей. Сведения о количестве содержащихся в воде, используемой для приготовления образцов торкрет-бетона, примесей приведены в таблице 2.6. В используемой для приготовления образцов воде не содержится примесей в количествах, которые нарушали бы сроки схватывания и твердения цементного камня, снижали бы его прочность и морозостойкость.

Таблица 2.6. - Содержание примесей в воде для приготовления бетона

Наименование примеси	Максимальное содержание, мг/дм³	Метод испытания
Сахар	100	ГОСТ 23732
Анионов SO_4^{2-}	2700	ГОСТ 4389
Анионов Cl^-	1200	ГОСТ 4245
Фосфаты в расчете на P_2O_5	100	ГОСТ 18309
Нитраты (в расчете на NO_3^-)	500	ГОСТ 18826
Сульфиды (в расчете на S^{2-})	100	ГОСТ 23732
Свинец (в расчете на Pb^{2+})	100	ГОСТ 18293
Цинк (в расчете на Zn^{2+})	100	ГОСТ 18293
Общее содержание растворимых солей	5000	ГОСТ 18164
Взвешенных частиц	200	ГОСТ 23732

2.1.4. Минерализатор сахаров древесного заполнителя

При реакции раствора с сахарами древесной щепы образуются вещества замедляющие схватывание смеси [102]. Чтобы избежать этого и получить прочный, твердеющий в срок арболит, используется минерализатор – сульфат алюминия первого сорта по ГОСТ 12966-85 «Межгосударственный стандарт. Алюминия сульфат технический очищенный. Технические условия». Физико-химические показатели сульфата алюминия первого сорта указаны в табл.2.7.

Очищенный технический сульфат алюминия предназначается для очистки воды хозяйственно-питьевого и промышленного назначения и для использования в бумажной, текстильной, кожевенной и других отраслях промышленности.

В воздушной среде и сточных водах в присутствии других веществ или факторов сульфат алюминия токсичных веществ не образует. Производственные и лабораторные помещения, в которых проводится работа с сульфатом алюминия, должны быть оснащены приточно-вытяжной вентиляцией, обеспечивающей состояние воздуха рабочей зоны.

Таблица 2.6. - Физико-химические свойства сульфата алюминия первого сорта

Наименование показателя	Значение
1. Внешний вид	Неслеживающиеся пластинки, брикеты, куски неопределенной формы и разного размера белого цвета
2. Массовая доля оксида алюминия, %, не менее	16
3. Массовая доля нерастворимого в воде остатка, %, не более	0,3
4. Массовая доля железа в пересчете на оксид железа (III), %, не более	0,02
5. Массовая доля свободной серной кислоты (H ₂ SO ₄), %	0,01
6. Массовая доля мышьяка в пересчете на оксид мышьяка (III), %, не более	0,001
Химическая формула	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·nH ₂ O.

2.1.5. Технология изготовления образцов арболита для исследования тепло- и влагопереноса

Изготовление композиционных материалов с проектным сочетанием физико-механических и химических свойств является основной целью современных научных исследований в области строительного материаловедения. Достижение такой цели осуществляется в результате всестороннего исследования сингулярности формирования макро- и микроструктуры бетонного композита. Управление сочетанием физико-механических и химических параметров бетона должно базироваться на выявленных законах формирования капиллярно-пористой структуры бетонного композита коррелирующими с его свойствами.

Исследования тепло и влагопереноса проводились на образцах, изготовленных из портландцемента с нормированным составом древесных заполнителей и минерализатора смеси, использованной в производственном процессе компании Арбоград (ИП Сосновиков И.И.). Перед начало исследований были проанализированы рецептуры основных производителей арболита, установлено, что между ними отсутствуют принципиальные отличия, выбранное массовое соотношение исходных компонентов для изготовления арболитовой смеси приведено в таблице 2.7.

Таблица 2.7. - 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

Формование образцов выполнялось в стальной опалубке по размер блока 500×300×200 (рис. 2.2). В этой же форме изготовленные образцы твердели и набирали прочность последующие 12 часов. Твердение образцов в течении 12 часов после формования проходило в сушильных камерах с постепенным подъемом температуры воздуха до +40°C. После приобретения арболитом прочности при сжатии не менее 0,5 МПа, конструкции распалубливаются - образцы извлекались из стальной формы. Дальнейшая их сушка проводилась на деревянных поддонах (рис. 2.3) в цехе при температуре 20 °С.



Рис. 2.2. Стальная форма для изготовления образцов арболита



Рис. 2.3. Сушка блоков арболита на поддонах, после извлечения из стальной опалубки

2.2. Краткое описание применяемых экспериментальных методик исследования нестационарного тепломассопереноса при термовлажностной обработке строительных изделий из арболита

Проведение экспериментальных исследований процессов переноса теплоты и влаги в блоках арболита при сушке основано на стандартных методиках определения теплофизических характеристик материалов в соответствии с ГОСТ, применении современных приборов и оборудования. Свойства и структура исследуемых в работе образцов арболита, проведены с применением методов физико-механического и химического анализа (см. таблицу 2.8) методики определения плотности и прочности (при сжатии) арболита, температуры и влажности в процессе твердения и сушки образцов.

Таблица 2.8. - Перечень измеряемых параметров при исследовании физико-механических свойств арболита

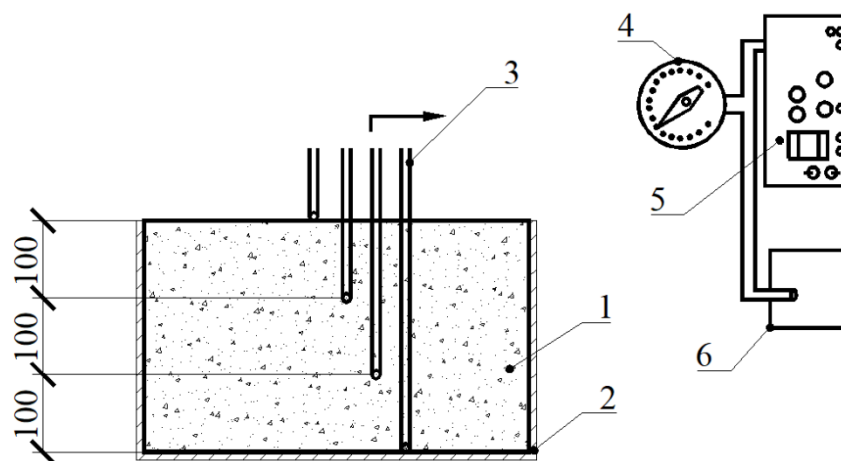
№ п/п	Наименование измеряемых величин	Ссылка на описание методики измерения
1	Предел прочности при сжатии	ГОСТ 28840; ГОСТ 10180; ГОСТ 28570; EN 12390
3	Масса образцов	ГОСТ 12730.1; ГОСТ Р 53228; ГОСТ 31383
4	Плотность	ГОСТ 12730.1;
5	Влажность	ГОСТ 12730.2
6	Температурное поле	п. 2.2.1 диссертации
7	Распределение влажности по толщине образца	п. 2.2.2 диссертации

2.2.1. Методика измерения температурного поля по толщине арболитового блока

Для экспериментального исследования нестационарного температурного поля в процессе сушки арболитовых блоков применялся метод дискретных измерений температуры по толщине образца с использованием термоэлектрических преобразователей (термопар).

Конструктивная схема установки для измерения температуры представлена на рисунке 2.4. Образец арболита (1) предварительно отформованный и уплотненный в стальной опалубке (2), обеспечивающую геометрическую стабильность и защиту от механических повреждений в процессе твердения и сушки.

Измерение температуры осуществлялось в четырех контрольных точках по толщине блока: на открытой поверхности образца; на глубине 100 мм от поверхности; на глубине 200 мм от поверхности; на глубине 300 мм от поверхности.



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

Рис. 2.4. Принципиальная схема измерения температурного поля по толщине образца

Термоэлектрические преобразователи (3) по ГОСТ 3044 с проводами из сплавов хромель, копель и алюмель по ГОСТ 1799 (термопары) типа ТХК (хромель-копель) устанавливались в предварительно подготовленные каналы таким образом, чтобы горячий спай находился в заданной точке измерения. Выбор

типа термопар обусловлен их метрологическими характеристиками: диапазон измерений от -40 до $+300$ °С, класс точности 1 по ГОСТ 6616, что обеспечивает погрешность измерений не более $\pm 1,5$ °С в исследуемом диапазоне температур [85].

Сигналы с термопар поступали на потенциометр ПП-63 (4) через переключатель ПНТ (5), что позволяло последовательно регистрировать температуру во всех контрольных точках. Потенциометр ПП-63 обеспечивал высокую точность измерения термо-ЭДС и, соответственно, температуры. Термостат (6) поддерживал заданный температурный режим в рабочей зоне сушильной камеры.

Измерения проводились с дискретностью 30 минут на протяжении всего цикла сушки. Такая периодичность позволяла зафиксировать динамику изменения температурного поля при постепенном повышении температуры сушильного агента с 20 до 40 °С в течение первых двух часов и последующей изотермической сушке при температуре 40 °С.

Полученные экспериментальные данные о пространственно-временном распределении температуры по толщине блока использовались для: анализа кинетики прогрева материала; определения градиентов температуры, являющихся движущей силой теплопереноса; верификации математической модели нестационарной теплопроводности; расчета коэффициента температуропроводности арболита; оценки влияния экзотермических эффектов гидратации цементного вяжущего на температурное поле образца [115, 119].

Схема размещения термопар по толщине образца с шагом 100 мм выбрана исходя из типичных размеров стеновых арболитовых блоков и необходимости детального изучения распределения температуры в характерных сечениях, что соответствует аналогичным исследованиям тепломассопереноса в капиллярно-пористых строительных материалах [82, 87, 162].

2.2.2. Измерение влажности арболита игольчатым влагомером

Электрический метод определения влажности с помощью игольчатого влагомера основан на изменении электропроводимости материала в зависимости

от его влажности [112, 113]. При увеличении влагосодержания уменьшается электрическое сопротивление материала, что позволяет по измеренному значению электропроводности судить о влажности [61, 69].

Для измерения влажности арболитовых образцов в процессе сушки применялся портативный цифровой игольчатый влагомер AQ-M20SO1 (рис. 2.5). Данный прибор предназначен для оперативного контроля влажности строительных материалов, в том числе цементосодержащих композитов [119].

Принцип действия влагомера AQ-M20SO1 основан на измерении электрической проводимости материала между двумя иглами-электродами, вводимыми в исследуемый образец. Прибор оснащен функцией автоматической температурной компенсации, что позволяет минимизировать влияние температуры материала на точность измерений [82, 85].

Конструктивно влагомер состоит из: цифрового ЖК-дисплея с подсветкой для отображения результатов измерений; измерительного блока с двумя иглами-электродами; гибкого кабеля длиной 1 м, соединяющего измерительный блок с основным прибором; блока управления с кнопками выбора функций, обнуления, подсветки и включения/выключения; отсека для элементов питания.

ОПИСАНИЯ ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ

- 1-1 ЗУММЕР
- 1-2 ЗНАЧОК %
- 1-3 НИЗКИЙ ЗАРЯД БАТАРЕИ
- 1-4 ЖК ДИСПЛЕЙ
- 1-5 ЗНАЧОК ИЗМЕРЕНИЯ
- 1-6 ЗНАЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
- 1-7 СИГНАЛЬНАЯ ЛАМПА
- 1-8 КНОПКА ВЫБОРА ФУНКЦИЙ
- 1-9 КНОПКА ОБНУЛЕНИЯ/УВЕЛИЧЕНИЯ
- 1-10 КНОПКА ПОДСВЕТКИ
- 1-11 КРЫШКА БАТАРЕЙНОГО ОТСЕКА
- 1-12 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК
- 1-13 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ЩУП
- 1-14 КНОПКА УДЕРЖАНИЯ/УМЕНЬШЕНИЯ
- 1-15 КНОПКА ВКЛЮЧЕНИЯ

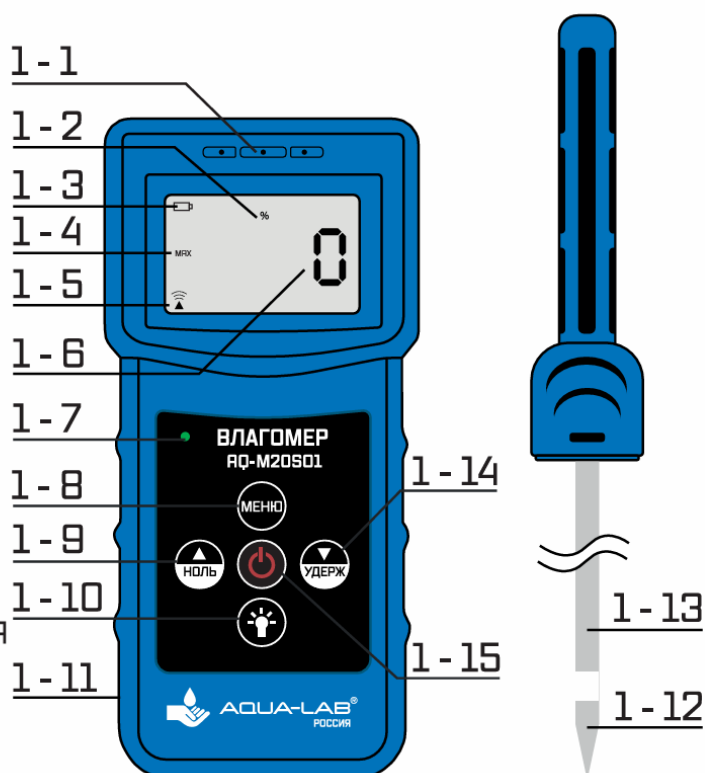


Таблица 2.9. - Технические характеристики влагомера AQ-M20SO1

Параметр	Значение
Диапазон измерений	0...50 %
Разрешение	0,1 %
Погрешность измерения	$\pm(0,5\% \cdot N + 2) \%*$
Рабочая температура	0...60 °С
Влажность окружающей среды	<85 %
Питание	4 элемента типа ААА (1,5 В)
Длина измерительного щупа	300 мм
Глубина проникновения игл	25 мм
Масса прибора (без батарей)	225 г

Прибор имеет следующие функциональные возможности: автоматическое отключение питания через 5 минут после последней операции для экономии заряда батарей; функцию удержания показаний (HOLD) для фиксации результатов измерений; индикацию низкого заряда батареи; подсветку дисплея для работы в условиях недостаточного освещения.

Измерение влажности арболитовых образцов выполнялось в следующей последовательности [115, 119]:

1. Подготовка прибора. Перед началом измерений производилось обнуление прибора. Для этого датчик не должен контактировать с материалом. Нажималась кнопка обнуления до появления на дисплее значения «0,0». Перед обнулением переднюю часть датчика рядом с изолирующим кольцом (примерно на 2 см выше основания) очищали чистой тканью. Обнуление позволяет снизить влияние температуры и влажности воздуха на результаты измерений.

2. Установка электродов. Прибор удерживался в руке, измерительный щуп вводился в исследуемый образец перпендикулярно поверхности на глубину, соответствующую положению контрольных точек (100, 200 и 3000 мм от поверхности). Иглы-электроды должны быть полностью погружены в материал для обеспечения надежного электрического контакта. Влажность на поверхности измерялась не иглой, а поверхностным датчиком прибора.

3. Проведение измерений. После введения электродов нажималась кнопка измерения. Показания влажности отображались на цифровом дисплее. Для получения стабильного значения влажности в одной точке измерения проводились 2–3 раза, при этом щуп вводился на одинаковую глубину. За результат измерения принималось среднее арифметическое значение.

4. Фиксация результатов. При необходимости результаты измерений фиксировались с помощью функции HOLD (удержание показаний). Данные заносились в журнал измерений с указанием времени, температуры образца и координат точки измерения.

5. Завершение измерений. После окончания измерений прибор отключался нажатием кнопки питания. При длительном неиспользовании (более 5 минут) прибор автоматически отключался для экономии заряда батарей.

При измерении влажности арболита игольчатым влагомером необходимо учитывать особенности измерений и влияющие факторы [61, 112]:

1. Влияние глубины погружения электродов. Глубина погружения напрямую влияет на значение измерения. Чем глубже вводятся иглы, тем больше значение влажности, так как в глубине образца влажность обычно выше. Поэтому при повторных измерениях в одной и той же точке необходимо соблюдать одинаковую глубину погружения.

2. Температурная коррекция. Хотя прибор оснащен функцией автоматической температурной компенсации, при измерениях на температуре 40 °С требуется дополнительная коррекция показаний.

3. Неоднородность материала. Поскольку арболит является композитным материалом с неоднородной структурой (содержит древесную щепу и цементное

вяжущее), показания влажности в разных точках образца могут отличаться. Для получения репрезентативных данных измерения проводились в нескольких точках на поверхности.

4. Влияние минеральных компонентов. Наличие в арболите цементного вяжущего, содержащего минеральные соли, может незначительно влиять на показания прибора, так как ионы солей увеличивают электропроводность материала. Это следует учитывать при интерпретации результатов.

5. Диапазон измерений. Прибор AQ-M20SO1 имеет диапазон измерений от 0 до 50 %, что полностью перекрывает типичные значения влажности арболита в процессе сушки (от начальной влажности 40...50 % до равновесной 8...12 %).

Суммарная погрешность определения влажности складывается из: основной погрешности прибора $\pm(0,5\% \cdot N + 2)$ %; погрешности, связанной с неоднородностью материала ($\pm 1-2$ %); погрешности температурной коррекции ($\pm 0,5$ %). Общая погрешность измерений не превышала $\pm 3-4$ %, что является приемлемым для контроля процесса сушки арболитовых изделий [115, 119].

По сравнению с другими методами определения влажности (весовым, диэлектрическим) применение игольчатого влагомера AQ-M20SO1 имеет следующие преимущества: оперативность получения результатов (время измерения 2–3 с); возможность проведения измерений непосредственно в процессе сушки без отбора проб; портативность и простота эксплуатации; возможность измерения влажности в различных точках образца; отсутствие необходимости в сложной подготовке образцов.

Таким образом, применение игольчатого влагомера AQ-M20SO1 позволило эффективно контролировать изменение влажности арболитовых образцов по толщине в процессе нестационарной сушки, что было необходимо для экспериментального исследования закономерностей тепломассопереноса и верификации математической модели процесса [82, 115, 158].

2.3. Математическое моделирование нестационарного тепломассопереноса и структурообразования арболита при термовлажностной обработке

2.3.1. Физико-химические факторы, определяющие кинетику сушки и структурообразование

В литературе отмечается, что технология сушки арболита мало изучена, а комплексное моделирование тепломассопереноса и структурообразования в таких композитах почти не разработано [157, 158]. При этом применение классических уравнений тепломассопереноса и методов, учитывающих изменяющиеся свойства материала, позволяет глубже понять механизм сушки [82, 85]. Соответственно, одним из важных направлений является разработка математической модели, описывающей нестационарный перенос влаги и тепла в блоке арболита при учете реальных граничных условий [115, 119, 158].

Помимо сложности математического описания указанных выше явлений, необходимо учесть и специфические особенности арболита [24, 104]. Так, древесный наполнитель при увлажнении и высушивании проявляет сильные объемные деформации и давление набухания, а также выраженную анизотропию и высокую упругость [24, 104, 166]. Эти свойства, по данным, существенно влияют на структурообразование арболита: при сжатии смесь «запоминает» начальную форму волокон, что может приводить к появлению напряжений и снижению прочности [57, 102]. Кроме того, гидратация цемента в арболите имеет экзотермический характер: при взаимодействии с водой цемент выделяет тепло (примерно до 0,5 кДж/г), что может приводить к локальному разогреву блока [45, 115]. Напротив, испарение воды – эндотермический процесс (удельная теплота испарения воды при 100 °С около 2260 кДж/кг), требующий значительной затраты теплоты [82, 86]. Таким образом, в модели необходимо учесть взаимное влияние массо- и теплообмена и химических эффектов гидратации [14, 158].

Экзо- и эндотермические эффекты играют ключевую роль в структурообразовании арболита, потому как определяют температурный режим внутри блока, скорость фазовых превращений, динамику усадки и напряженно-деформированное состояние материала [115, 119]. Учитывая что арболит - это

многофазный композит, включающий минеральную и органическую части, любое изменение теплового баланса в процессе твердения влияет на микроструктуру и конечные свойства [58, 59]. Рассмотрим влияние процессов переноса тепла и влаги на структурообразование арболита [162].

Повышение температуры в объеме блока при сушке приводит к локальному ускорению гидратации → ускоренное формирование цементного камня, формируется гетерогенное поле прочности: ядро блока твердеет быстрее, чем его поверхность [40, 95]. Увеличение скорости структурообразования гидросиликатов кальция способствует раннее замыкание» поровой структуры, особенно вблизи экзотермического пика (24–36 ч) [73, 103].

При неравномерном распределении тепла возникают температурные градиенты, вызывающие внутренние напряжения и микротрещины, особенно в переходной зоне между щепой и цементом [57, 115]. При резком нагреве – расширение воды в порах, вызывающее дополнительное давление и деструкцию слабосвязанных участков [46, 84].

При температурах более 60 °С возможен частичный термогидролиз гемицеллюлозы (при использовании в качестве заполнителя соломы, подсолнечной лузги, шелухи семян хлопчатника, кукурузы) или деформация волокон щепы, что ухудшает сцепление древесного наполнителя с цементной матрицей [15, 167, 168].

Испарение влаги с поверхности вызывает охлаждение наружных слоёв, тогда как внутренние, остаются теплыми, это создает обратный температурный градиент, ведущий к замедлению твердения на поверхности [39, 115]. В зоне активного испарения (где температура падает) реакции гидратации цемента замедляются, что приводит к усадочным напряжениям [57, 61]. По мере удаления воды из капилляров возникает капиллярное давление (~10...50 кПа), также вызывающее усадку цементного камня [82, 112].

Поля распределений влаги т.е. неравномерность влажности в объеме блока вызывает микроразрывы структуры и расслаивание щепы-матрица [27, 115].

2.3.2. Математическая постановка задачи взаимосвязанного

нестационарного теплопереноса

Описанные выше особенности структурообразования под действием эндо- и экзотермических эффектов в процессах сушки блоков арболита-сырца показывают необходимость теоретического моделирования процессов теплопереноса в блоке с учетом возможных фазовых переходов. Для этого рационально использовать систему нелинейных дифференциальных уравнений диффузионного тепло- и влагопереноса (1.1) и (1.2) с соответствующими граничными условиями [82, 87, 158]. Система уравнений (1.1) и (1.2) предложена академиком АН СССР А.В. Лыковым, она базируется на системе нелинейных уравнений теплопроводности и диффузии влаги, с учетом источников тепла и фазовых переходов [82, 83, 87].

Уравнение нестационарной теплопроводности записано с источником тепла, учитывающим энтальпию испарения и экзотермию гидратации цемента [115, 162]. Система таких уравнений была впервые получена и использована А.В. Лыковым и соавторами при описании процессов сушки капиллярно-пористых тел [82, 85, 86]. Лыковым показано, что при низких тепловых потоках (температура ниже 50...70 °С) уравнения адекватно описывают «мягкую» сушку, а при интенсивной сушке следует учитывать лавинообразное нарастание теплового потока [83, 87]. В настоящей работе эта система (классические уравнения Лыкова) используется в допущении нестационарности по времени и нелинейности коэффициентов [14, 158]. Основная сложность решения состоит в сильной зависимости коэффициентов массопроводности и теплопроводности от текущей влажности и температуры [25, 112].

2.3.3. Решение нелинейных задач теплопереноса методом микропроцессов

В силу нелинейности уравнений аналитическая формулировка решения затруднена. Для их численного решения применён метод микропроцессов [157, 158]. Суть метода заключается в разбиении всего процесса сушки на серию микропроцессов короткой продолжительности [162]. На каждом шаге полагается, что физические свойства материала блока (массопроводность, теплопроводность,

теплоемкость и т.д.) и внешние параметры (температура среды, коэффициенты тепло- и массоотдачи) остаются неизменными и равными средним по данному шагу значениям [157, 158]. Для каждого микропроцесса решаются линейные уравнения переноса, после чего обновляются поля распределений тепла и влаги, а также и физические параметры материала [115, 119]. Такой подход позволяет имитировать быстрое изменение условий с минимальными погрешностями, так как фактически расчетная модель «подстраивается» под реальную кинетику сушки [158, 162]. Академик РААСН С.В. Федосов показал, что при малоизменяющихся значениях температур и влажностей аналитические решения хуже сходятся, и методы зонального деления и микропроцессов оказываются более эффективными [115, 119]. В частности, для микропроцесса можно использовать экспериментальную кинетическую кривую высыхания, что повышает точность расчета [57, 115]. Результаты расчётов, выполненные с использованием метода микропроцессов, демонстрируют, что структурное состояние и физико-механические свойства арболита напрямую зависят от выбора схемы теплообмена, а также от скорости изменения температурно-влажностных градиентов в объёме изделия [161, 173]. Правильно подобранный режим сушки способствует равномерному отверждению цементного камня, снижению усадочных напряжений и минимизации деформаций органической фракции.

Отметим, что дополнительно могут быть привлечены методы сетевого моделирования, позволяющие имитировать геометрию порового пространства и моделировать процессы влаго- и теплопереноса [7, 13, 76]. В ряде работ использовались методы термогравиметрического анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии и микроструктурного анализа для оценки степени гидратации цементного камня и взаимодействия его с органическими компонентами [41, 44, 73].

2.3.4. Критический анализ современных методов моделирования сушки капиллярно-пористых материалов

Блок I. Аналитические основы: решения уравнений переноса для капиллярно-пористых тел

Приближенный способ аналитического описания нестационарных процессов тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых телах предложен в работе Liu J.Y. и Cheng S. [227]. Авторами предложен метод, сводящий связанную систему двух дифференциальных уравнений в частных производных - уравнения теплопроводности и уравнения диффузии влаги - к одному уравнению четвертого порядка посредством введения потенциальной функции. Полученные замкнутые аналитические выражения описывают пространственно-временное распределение температуры и влагосодержания в теле при произвольных начальных и граничных условиях и позволяют проводить параметрический анализ влияния определяющих критериев подобия на кинетику сушки.

Критический анализ данной работы обнаруживает ряд существенных ограничений. Модель сформулирована в линейном приближении: коэффициенты тепло- и массопроводности полагаются постоянными по всему объёму тела и на протяжении всего процесса, что принципиально расходится с экспериментально установленной нелинейной зависимостью этих коэффициентов от влагосодержания и температуры в реальных капиллярно-пористых материалах. Помимо этого, уравнения не содержат источниковых членов, отражающих фазовые превращения и тепловыделение при химических реакциях, - эффекты, неустранимые при описании сушки реакционно-активных систем. Верификация полученных решений в работе ограничена сравнением с численными расчётами; экспериментальная проверка на образцах реальных строительных материалов не выполнялась.

Несмотря на указанные ограничения, аналитический аппарат [227] образует математическую основу, на которой строятся все последующие расчётные схемы нестационарного тепло-массопереноса, в том числе применительно к арболиту как двухфазной капиллярно-пористой системе, - именно это делает данную работу обязательным элементом теоретической базы настоящей диссертации.

Блок II. Численные методы моделирования нестационарной сушки пористых строительных материалов

Сложность реальных задач тепломассопереноса - нелинейность коэффициентов переноса, переменные граничные условия, неоднородность структуры - обусловила переход от аналитических решений к численным методам. Четыре работы, рассматриваемые в данном блоке, последовательно расширяют вычислительный инструментарий в данной области.

Принципиально новый вычислительный подход к решению нелинейных задач тепломассопереноса в пористых строительных материалах разработан в исследовании Gasparin S. и соавт. [204]. Отличительная черта предложенного алгоритма состоит в том, что дискретизация осуществляется по временной переменной, а не по пространственной, как в стандартном методе прямых; это трансформирует задачу Коши в серию краевых задач, решаемых адаптивным коллокационным методом четвёртого порядка точности. Достоверность алгоритма подтверждена на трёх тестовых задачах, включая сравнение расчётных и экспериментальных данных для однородных образцов при нелинейных граничных условиях.

С критической точки зрения необходимо констатировать, что все расчётные примеры выполнены для однофазных гомогенных пористых материалов. Специфика двухфазных органоминеральных систем, в которых органический и минеральный компоненты обладают принципиально различными коэффициентами переноса и взаимодействуют как через поровый раствор, так и химически, в постановке задачи не отражена. Эндо- и экзотермические источниковые члены уравнения теплопроводности, характерные для сушки арболита, также отсутствуют. Предложенный алгоритм представляет методологический интерес для настоящей диссертации именно как вычислительная схема, потенциально пригодная для адаптации к нелинейным задачам неизотермического тепломассопереноса при условии модификации математической постановки в части учёта двухфазной природы арболита.

Развивая идею применения безразмерных критериев подобия к задачам сушки строительных блоков Г.Н. Колесников и Т.Б. Гаврилов [223] предложили математическую модель сушки капиллярно-пористого материала в тонком слое

применительно к тонкостенным строительным блокам. В качестве количественной меры интенсивности влагопереноса использован критерий Кирпичёва; исследовано влияние начального профиля влажности на динамику высыхания и вероятность образования усадочных дефектов при различных условиях конвективной сушки. Показано, что неравномерность начального распределения влагосодержания существенно влияет на характер нестационарных профилей влажности и определяет зоны концентрации напряжений.

Однако в работе принято изотермическое допущение: уравнение теплопроводности из рассмотрения исключено, а температура сушильного агента и самого материала полагается однородной на всём протяжении процесса. Для арболита это допущение принципиально неправомерно: совокупное действие эндотермического испарения влаги и экзотермической гидратации цемента порождает существенные внутренние температурные градиенты, определяющие не только поле влажности, но и напряжённо-деформированное состояние изделия. Использование критериев подобия Фурье и Кирпичёва в качестве аналитических инструментов для характеристики нестационарных режимов сушки строительных блоков тем не менее представляет прямой методологический интерес для настоящей диссертации.

В том же году сетевую (network) модель нестационарного тепломассопереноса в капиллярно-пористых строительных материалах разработали Vasok В.І. и соавт. [183]. Пористое пространство материала представлялось системой линейных микроканалов, ориентированных по осям трёхмерной системы координат; для каждой ячейки сети формулировались уравнения баланса тепловых и массовых потоков с учётом явлений сорбции и десорбции водяного пара. Такой подход позволил воспроизвести нестационарные температурно-влажностные поля минуя процедуру усреднения по объёму.

Существенным ограничением предложенной модели является ее изначальная параметризация для однородных сред с регулярной геометрией пор. В то же время реальная структура арболита обладает выраженной бимодальностью: крупные поры сосредоточены в зонах контакта с древесным

заполнителем, а цементный камень содержит субмикронные гелевые поры. Прямой перенос параметров сетевой модели на столь гетерогенную и анизотропную систему без экспериментального определения эффективных коэффициентов для каждой фазы некорректен.

Вместе с тем, сетевой подход создает теоретическую базу для учета анизотропии, вызванной ориентацией частиц щепы при формовании. Решение этой задачи выходит за рамки настоящего диссертационного исследования, однако является перспективным направлением для дальнейшего моделирования.

Замыкает данный блок работа Gauvas V.I. и соавт. [205], посвящённая постановке и решению задачи с подвижной границей фазового перехода — задачи Стефана - применительно к сушке цилиндрических деревянных брусьев в квазиосреднённой формулировке. Коэффициенты теплопроводности в модели выражались через пористость материала и плотности его компонентов; граничное уравнение баланса энергии на фронте фазового перехода замыкало постановку задачи. Применение интегральных преобразований позволило получить аналитическое решение, определяющее временное положение фронта сушки и кинетику влагообмена в зависимости от параметров сушильного агента.

Принципиальное ограничение работы состоит в том, что объектом исследования служит химически инертная чистая древесина без минерального вяжущего. Цементная матрица, кардинально изменяющая кинетику тепломассопереноса за счёт наличия химически связанной воды и экзотермии гидратации, в модели отсутствует. Помимо этого, задача Стефана в классической постановке предполагает наличие выраженного и локализованного фронта фазового перехода, тогда как в арболите переход от свободной к связанной влаге носит распределённый характер. Методологическая ценность работы для настоящей диссертации состоит в аппарате квазиосреднённой постановки, который может быть адаптирован к описанию нестационарного влагопереноса в двухкомпонентной структуре арболита при надлежащей модификации исходных допущений.

Блок III. Теплоперенос в цементных композитах и материалах на древесной основе

Представленные в данном блоке работы непосредственно связаны с материальными системами, близкими по составу к арболиту, что придаёт им особое значение для предметного обоснования исследования.

Klemczak В. и соавт. [221] провели систематический обзор математических подходов к описанию теплопереноса в цементных материалах на стадии раннего твердения. Авторами классифицированы конечно-элементные, конечно-разностные и аналитические методы решения нестационарных задач; подробно рассмотрены модели тепловыделения при гидратации цемента, диффузии влаги через гидратирующуюся матрицу и совместного неизотермического тепло- и массопереноса. Обоснован вывод о том, что пренебрежение связанностью уравнений теплопроводности и влагопроводности приводит к систематическим погрешностям при прогнозировании полей напряжений и риска трещинообразования в цементных изделиях.

Вместе с тем область применения обзора строго ограничена чистыми цементными системами без органического заполнителя. Ни взаимодействие деревянной щепы с цементной матрицей - биохимическое торможение гидратации сахарами и лигнинами, поглощение воды органическим компонентом, его набухание при увлажнении, - ни специфические тепловые эффекты, обусловленные двухфазной природой арболита, в рассмотрение не включены. Таким образом, идентифицированные в обзоре численные подходы применимы к цементной составляющей арболита, однако не описывают поведение двухфазного органоминерального композита в целом, что указывает на необходимость специализированной модели, разрабатываемой в настоящей диссертационной работе.

Единственным зарубежным экспериментальным исследованием, прямо рассматривающим арболит как самостоятельный предмет изучения и использующим данный термин в международной научной литературе, является работа Yagubkin А. и соавт. [175]. Авторами исследовалось влияние химических

добавок - хлорида кальция и сульфата калия - на прочность и долговечность арболита; методом дифференциальной сканирующей калориметрии зафиксированы тепловые эффекты процессов гидратации и испарения влаги. Установлено, что хлорид кальция, ускоряя гидратацию, повышает остаточную влажность материала вследствие образования кристаллогидратов; сульфат калия, напротив, обеспечивает теплопроводность на 20,8% ниже по сравнению с образцами, содержащими CaCl_2 .

Анализ научной литературы охватывает период с 1991 по 2024 год и позволяет проследить три уровня развития знаний в исследуемой области [227, 204, 223, 183, 205, 221, 175]. Первый уровень формируют аналитические решения уравнений Лыкова в линейном приближении. Второй уровень представлен численными методами: адаптивными схемами, критериальными моделями, сетевым моделированием и постановками с подвижной границей. Третий уровень ориентирован на конкретные материальные системы: цементные матрицы и арболит как объект физико-химического исследования.

Систематический критический анализ обнаруживает устойчивый дефицит знаний [115, 157, 158]. Ни одна из проанализированных работ не формулирует и не решает полную нестационарную неизотермическую задачу сопряжённого теплопереноса при сушке арболита как двухфазного органоминерального композита с одновременным учётом экзотермического тепловыделения при гидратации, эндотермического поглощения тепла при испарении, нелинейной зависимости коэффициентов переноса от текущих параметров и реальных технологических граничных условий. Имеющиеся подходы либо основаны на изотермическом допущении, либо параметризованы для гомогенных сред, неприменимых к бимодальной структуре арболита без принципиальной модификации.

Принципиальное ограничение работы применительно к теме диссертации состоит в том, что теплоперенос рассматривается в ней не как самостоятельный предмет, а лишь как сопутствующий эффект в контексте прочностного анализа. Нестационарные процессы сушки - временная динамика

полей влажности и температуры в объеме блока, граничные условия массообмена, кинетика высыхания - ни моделировались, ни измерялись. Тем не менее полученные термохимические данные (тепловые эффекты гидратации и испарения, сорбционные характеристики арболита) представляют непосредственную ценность для параметризации нестационарной модели тепломассопереноса при сушке арболита, разрабатываемой в настоящей диссертации.

Выявленные пробелы обосновывают необходимость разработки авторской математической модели, реализованной методом микропроцессов, что позволит прогнозировать пространственно-временные поля температуры и влажности, оптимизировать режимы сушки и минимизировать дефектообразование в арболитовых изделиях.

2.4. Выводы по главе 2

1. Сформирована и регламентирована материально-технологическая база исследований. На основании анализа нормативной документации и технологических особенностей производства обоснован выбор компонентов арболитовой смеси: портландцемента ЦЕМ I 42,5Н без минеральных добавок, древесного заполнителя из хвойных пород с контролируемой влажностью, воды затворения, соответствующей ГОСТ 23732, и сульфата алюминия в качестве минерализатора сахаров. Описан технологический цикл изготовления образцов (дозирование, формование в стальной опалубке, тепловая обработка при +40 °С в течение 12 ч, последующая воздушно-сухая выдержка при 20 °С), обеспечивающий стабильность физико-механических характеристик и воспроизводимость экспериментальных данных.

2. Разработана экспериментальная установка и апробированы методики мониторинга нестационарного температурно-влажностного поля. Применение термоэлектрических преобразователей типа ТХК с дискретным расположением горячих спаев по толщине блока (0, 100, 200, 300 мм) и потенциометра ПП-63 позволило зафиксировать динамику прогрева материала с погрешностью не более

$\pm 1,5$ °C. Использование игольчатого влагомера AQ-M20SO1 с функцией температурной компенсации обеспечило оперативный контроль влагосодержания в процессе сушки (диапазон 0–50 %) без разрушения образцов, что важно для изучения кинетики тепломассопереноса в реальном времени.

3. Обоснована математическая постановка задачи взаимосвязанного тепломассопереноса. В качестве теоретической базы принята система нелинейных дифференциальных уравнений диффузионного тепло- и влагопереноса А.В. Лыкова, дополненная источниковыми членами, учитывающими экзотермию гидратации цемента и эндотермию испарения влаги. Для численного решения нелинейной задачи с коэффициентами переноса, зависящими от текущей температуры и влажности, обосновано применение метода микропроцессов, позволяющего поэтапно адаптировать расчётную модель к фактической кинетике высухания и минимизировать погрешности при изменении граничных условий.

4. Проведён критический анализ современных методов моделирования сушки капиллярно-пористых материалов. Выявлено, что существующие аналитические, численные и сетевые подходы обладают существенными ограничениями при описании арболита: либо не учитывают двухфазную органоминеральную природу материала, либо игнорируют химико-тепловые эффекты гидратации, либо базируются на изотермических допущениях. Это подтверждает научную целесообразность разработки специализированной модели, учитывающей взаимное влияние массо- и теплообмена, структурообразование цементной матрицы и поведение древесного заполнителя в нестационарных условиях сушки.

5. Создана методическая основа для последующих этапов исследования. Сочетание стандартизированной технологии изготовления образцов, верифицированных инструментальных методик измерений и адаптированного математического аппарата обеспечивает надёжную базу для проведения натурных экспериментов, калибровки модели нестационарного тепломассопереноса и последующей разработки научно обоснованных режимов сушки арболитовых блоков, минимизирующих риск деформаций и трещинообразования.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И КИНЕТИКИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ АРБОЛИТА ПРИ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ

3.1. Определение зависимости между плотностью и влажностью арболита

Плотность является базовым структурным параметром, определяющим теплофизические, прочностные и массообменные характеристики арболита. Её точное экспериментальное определение необходимо для корректного расчёта коэффициентов тепло- и массопроводности, оценки пористости композита, а также для верификации математической модели нестационарного теплопереноса.

Измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.1 «Бетоны. Методы определения плотности». В качестве испытательных образцов использовались кубы размером 50×50×50 мм, выпиленные из блоков после завершения полного на различных периодах цикла сушки.

Масса образцов определялась на электронных аналитических весах с погрешностью ±0,1 г. Линейные размеры измерялись штангенциркулем (класс точности 1, предельная погрешность ±0,05 мм) в трёх взаимно перпендикулярных направлениях по каждой грани с последующим расчётом среднего арифметического значения. Объём образца определялся геометрическим методом по формуле параллелепипеда. Для измерения плотности при влажности ниже 15% образцы высушивались в лабораторном шкафу при температуре 75±5°C до достижения постоянной массы (критерием окончания сушки считалось изменение массы менее 0,1 % при последующих взвешиваниях с интервалом 2 ч).

Плотность рассчитывалась по выражению:

$$\rho_w = m_w / V, \quad (3.1)$$

где m_w – масса образца, г; V – объём образца, см³.

Для каждого режима сушки испытывалась серия из не менее трёх образцов. Результат принимался как среднее арифметическое значение, относительная погрешность определения плотности не превышала 2 %, что соответствует требованиям нормативной документации для лёгких бетонов.

Проведенная серия экспериментов позволила установить зависимость (рис. 3.1) между плотностью ρ и влажностью W арболита рецептурного состава, приведённого в таблице 2.7 в период сушки, сопровождаемой нагревом изделия до 40°C в течении 12 часов. Для упрощения расчетов, получено выражение для расчета плотности арболита:

$$\rho_w = \rho_0 (1 + W/100) = \rho_0 (1 + u), \quad (3.2)$$

где: ρ_0 – плотность сухого композита, $\text{кг}/\text{м}^3$; u – влажность композита, $\text{кг}_{\text{воды}}/\text{кг}_{\text{сухого}}$.

Установлено, что для арболита $\rho_0 = 602,4 \text{ кг}/\text{м}^3$.

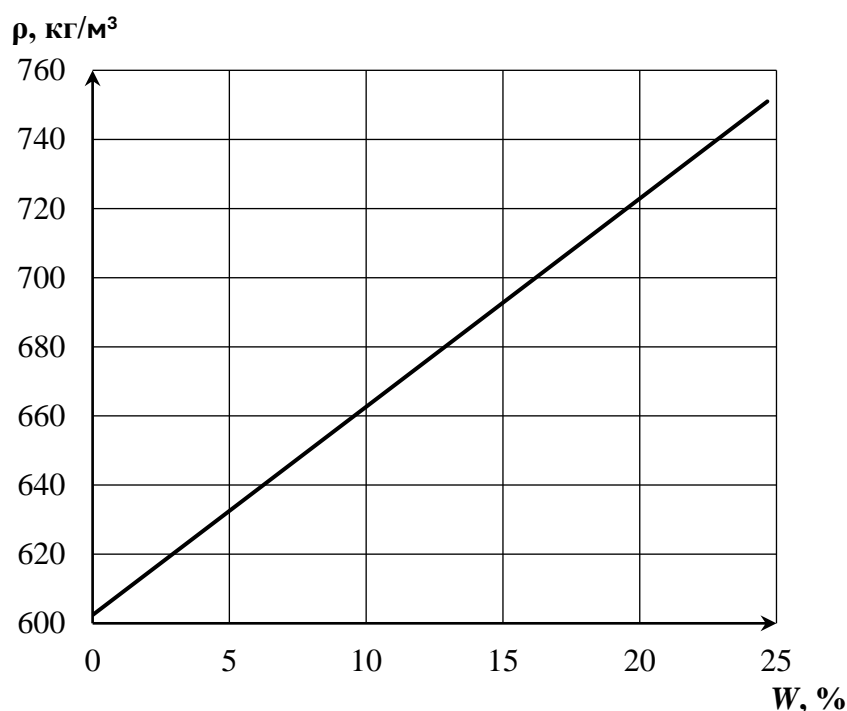


Рис. 3.1. Зависимость плотности ρ исследуемого арболита от влажности W

Средняя плотность арболита при средней естественной влажности по массе 15%...20% по полученным зависимостям составит 693...522 $\text{кг}/\text{м}^3$. Полученные значения плотности использовались в качестве входных параметров при идентификации эффективных коэффициентов тепло- и массопереноса, а также для расчёта объёмной доли древесного заполнителя и цементной матрицы в структуре арболита.

3.2. Результаты экспериментального определения динамики тепло- и влагопереноса при тепловой обработке изделий в стальной опалубке

Экспериментальные исследования нестационарных полей температуры и влажности проводились на образцах арболита-сырца, изготовленных по рецептуре, приведенной в таблице 2.7, которые были отформованы и спрессованы в стальной опалубке размером 500×300×200 мм (см. п. 2.1.5). Контроль температурного поля осуществлялся методом дискретных измерений термоэлектрическими преобразователями типа ТХК (хромель–копель) в четырех характерных сечениях по толщине блока: на открытой поверхности ($x=0$ м) и на глубине 100, 200 и 300 мм от неё (см. рис. 2.4, п. 2.2.1). Измерение влагосодержания выполнялось игольчатым влагомером *AQ-M20SO1* в тех же контрольных точках с использованием функции автоматической температурной компенсации (см. п. 2.2.2).

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. Полученные в результате натурального эксперимента массивы данных (табл. 3.1, 3.2; рис. 3.2, 3.3) отражают пространственно-временную эволюцию потенциалов теплопереноса в арболитовом блоке, находящемся в условиях асимметричного массообмена: открытая поверхность ($x = 0$) контактирует с сушильным агентом, тогда как противоположная грань ($x = 0,3$ м) граничит со стальной опалубкой, практически исключая влажностный поток.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет выявить ряд закономерностей, определяющих физику нестационарного тепло- и массопереноса в арболитовом блоке при тепловой обработке.

Таблица 3.1. – Результаты исследования изменения температурного поля во время сушки

Время нагрева	Температура, °С измеренная в точке с координатой, м			
	0	0,1	0,2	0,3
30 мин	24,2	20	20	25
1 час	28,5	20,4	20,8	30
1,5 часа	33	21,1	21,5	35
2 часа	36	22,3	22,8	40
3 часа	36,2	24	24,5	40
5 часов	36,4	27	27,5	40
7 часов	36,6	28,3	28,9	40
9 часов	36,8	32,3	33	40
12 часов	37	37,2	38	40

Таблица 3.2. – Результаты исследования изменения полей влагосодержания во время сушки

Время нагрева	Влажность, кг _{влаги} /кг _{сухого} измеренная в точке с координатой, м			
	0	0,1	0,2	0,3
30 мин	0,489	0,490	0,490	0,490
1 час	0,483	0,489	0,490	0,490
1,5 часа	0,439	0,485	0,490	0,490
2 часа	0,394	0,468	0,483	0,490
3 часа	0,361	0,448	0,475	0,480
5 часов	0,331	0,428	0,459	0,470
7 часов	0,307	0,408	0,444	0,460
9 часов	0,284	0,388	0,431	0,450
12 часов	0,262	0,368	0,417	0,440

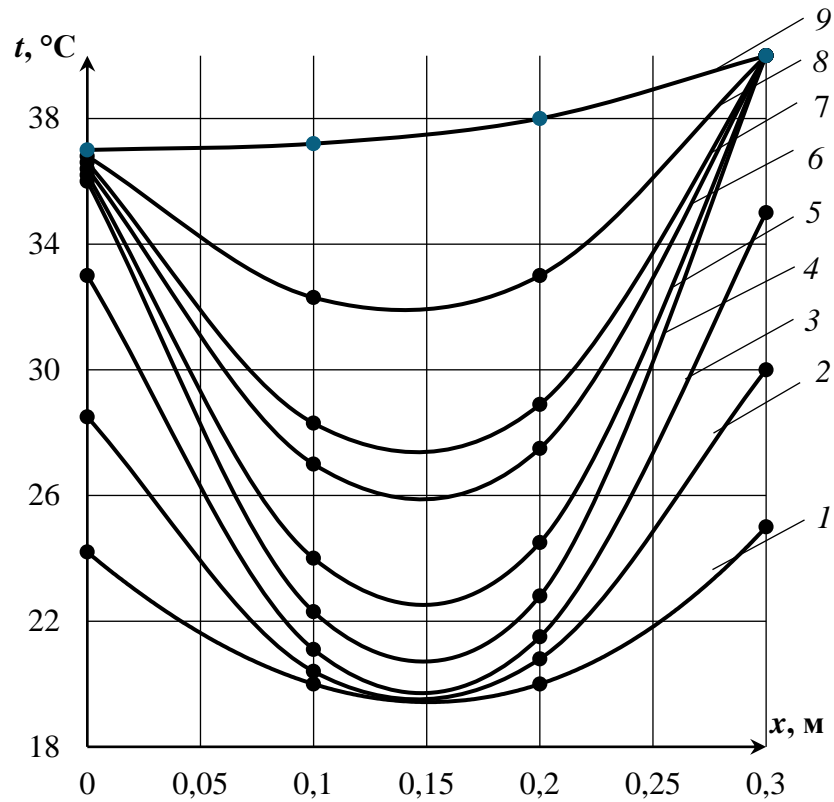


Рис. 3.2. Динамика полей температур при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке
Время нагрева: 1 – 0,5 ч.; 2 – 1 ч.; 3 – 1,5 ч.; 4 – 2 ч.; 5 – 3 ч.; 6 – 5 ч.; 7 – 7 ч.; 8 – ч.; 9 – 12 ч.

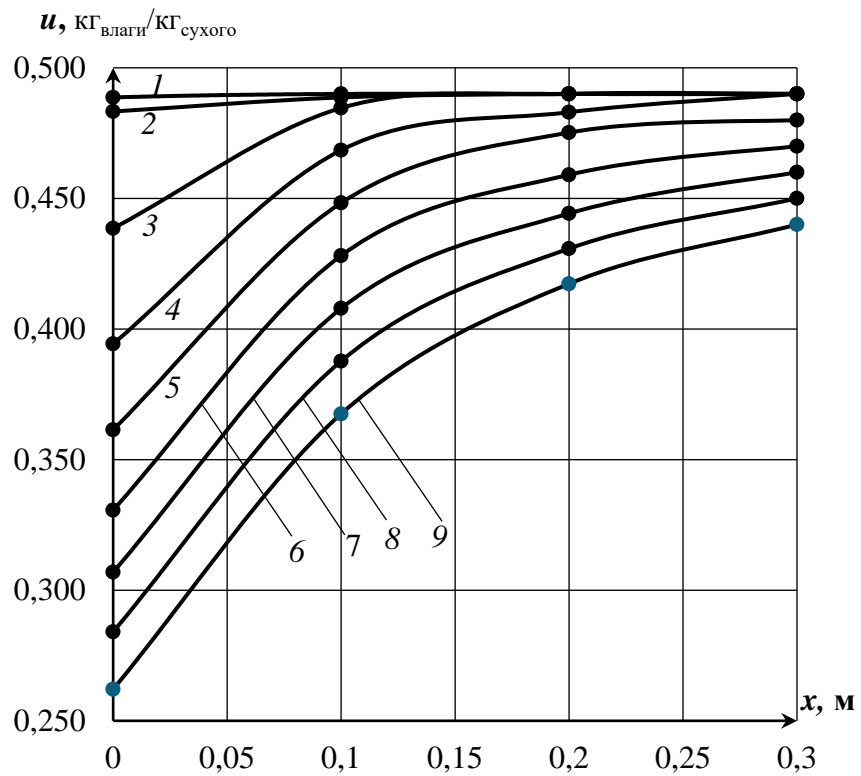


Рис. 3.3. Динамика полей влаги при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке
Время нагрева: 1 – 0,5 ч.; 2 – 1 ч.; 3 – 1,5 ч.; 4 – 2 ч.; 5 – 3 ч.; 6 – 5 ч.; 7 – 7 ч.; 8 – ч.; 9 – 12 ч.

3.2.1. Температурное поле

Как следует из таблицы 3.1 и рисунка 3.2, прогрев блока носит существенно неоднородный характер. На открытой поверхности ($x=0$) температура уже через 2 часа достигает $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в дальнейшем практически стабилизируется на уровне $36,8\dots37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже температуры сушильного агента. Выявленное явление на границе раздела фаз «арболит-сырец – нагретый воздух» является следствием двух факторов: влияние коэффициента теплоотдачи и эндотермического эффекта испарительного охлаждения, описанные в работах А.В. Лыкова [82, 85].

В то же время в придонной зоне ($x=0,3\text{ м}$) температура к 2-му часу достигает $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и удерживается на этом уровне: здесь суммируются два источника теплоты — кондуктивный приток через стальную опалубку и экзотермическое тепловыделение при гидратации портландцементных минералов (преимущественно C_3S и C_3A , см. табл. 2.2).

В центральной зоне ($x=0,1\dots0,2\text{ м}$) наблюдается «запаздывание» прогрева: к 9-му часу температура здесь составляет лишь $32\dots33\text{ }^{\circ}\text{C}$, то есть формируется устойчивый температурный градиент порядка $4\dots5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 100 мм толщины, являющийся движущей силой как теплопроводности, так и термоградиентного массопереноса влаги.

Кинетика изменения температурных градиентов по толщине блока, рассчитанная как разность температур между характерными сечениями (для открытой поверхности $x=0$ и придонной зоны $x=0,3$), представлена на рисунке 3.4. Анализ кривых показывает выраженный нестационарный характер прогрева. В первые $1,5\dots2$ часа, на стадии плавного повышения температуры в тепловой камере с 20 до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, наблюдается резкое нарастание температурного градиента, достигающее своего максимума.

Описываемая динамика обусловлена инерционностью теплопереноса: поверхностные слои быстро реагируют на изменение внешних условий, тогда как прогрев центральной зоны происходит с запаздыванием.

Спустя 2 часа на графиках фиксируется характерный перегиб и последующее монотонное снижение температурного градиента. Это свидетельствует о завершении стадии активного прогрева поверхностных слоев и переходе к режиму выравнивания температурного поля по сечению изделия.

Дальнейшее сглаживание кривых обусловлено сопряженными физико-химическими процессами. Экзотермическая реакция гидратации минералов портландцемента в центре блока генерирует внутреннее тепло. Совокупное действие этих факторов приводит к существенному уменьшению перепада температур между центральной и периферийной зонами изделия к завершающей стадии сушки.

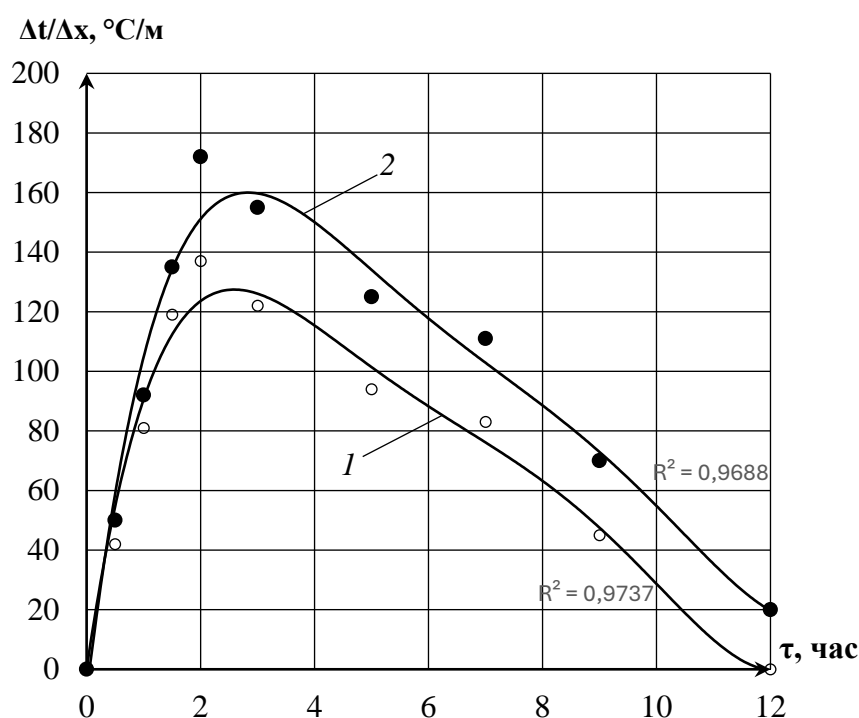


Рис. 3.4. Кинетика изменения градиентов температур при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке
1 – на открытой поверхности ($x=0$); 2 – в придонной зоне ($x=0,3$ м)

3.2.2. Влажностное поле

Динамика влагосодержания (табл. 3.2, рис. 3.3) демонстрирует принципиально иную картину, по сравнению с температурной: если на открытой поверхности влажность за 12 часов снижается с 0,489 до 0,262 кг/кг (то есть на 42 %), то в придонной зоне она практически не изменяется (с 0,490 до 0,440 кг/кг,

снижение всего на 10 %). Это обусловлено тем, что стальная опалубка выполняет роль паронепроницаемого экрана, и влажностный поток возможен только через открытую грань. В результате к концу цикла в блоке формируется резко асимметричный профиль влажности с градиентом до 0,155 кг/кг на 300 мм толщины, что, согласно теоретическим положениям [57,115], неизбежно порождает значительные усадочные напряжения в переходной зоне «древесная щепка – цементная матрица» и повышает риск трещинообразования и коробления изделий.

Полученные пространственно-временные распределения температуры и влажности позволяют определить зависимости феноменологических коэффициентов от текущих температур и влажности (в диапазоне 49...20 %), а также служат экспериментальной базой для верификации разработанной в математической модели (глава 4) и обоснования рациональных режимов тепловой обработки арболитовых изделий.

Динамика формирования влажностного поля характеризуется кинетикой изменения градиента влажности на открытой поверхности ($x=0$), представленной на рисунке 3.5.

Градиент влажности на границе $x=0,3$ (в придонной зоне) в данном разделе намеренно не приводится, что обусловлено физической постановкой задачи массообмена. Блок находится в стальной опалубке, которая выполняет функцию паронепроницаемого экрана. Граничное условие на этой поверхности предполагает нулевой поток влаги в окружающую среду, следовательно, градиент влажности на границе $x=0,3$ не является движущей силой внешнего массообмена и не определяет интенсивность ТВО. Формирующиеся в процессе сушки опасные влажностные градиенты и, как следствие, усадочные напряжения, концентрируются именно на открытой поверхности ($x=0$), контактирующей с сушильным агентом, что и делает ее анализ приоритетным для оценки риска трещинообразования и коробления изделий.

Анализ кинетики изменения градиента влажности на открытой поверхности (рис. 3.5) выявляет два характерных перегиба, каждый из которых отражает смену доминирующего физико-химического механизма массообмена.

Первый перегиб, наблюдаемый на отметке $\tau \approx 1$ час, характеризует завершение начальной стадии тепловой адаптации (инерционного прогрева) блока и переход к первому периоду сушки с максимальной скоростью испарения. В первые 60 минут, на фоне плавного повышения температуры сушильного агента (от 20 до 30 °С), материал преимущественно аккумулирует тепловую энергию. Температура открытой поверхности достигает лишь $\sim 28,5$ °С (см. табл. 3.1), при этом парциальное давление водяного пара на границе «арболит — воздух» остается близким к аналогичному параметру в среде тепловой камеры, что сдерживает интенсивность массообмена. Влажосодержание на поверхности в этот период практически не меняется: 0,483 кг/кг против начальных 0,489 кг/кг (см. табл. 3.2).

При нагреве поверхностного слоя до 28...30 °С давление насыщенного пара существенно возрастает, что инициирует интенсивное испарение влаги. Это приводит к резкому снижению поверхностного влажосодержания (до 0,421 кг/кг к 1,5 ч) и, соответственно, к ускоренному формированию влажностного градиента между открытой гранью и центральной зоной блока.

Перегиб на графике фиксирует смену лимитирующей стадии: от медленного прогрева, ограниченного теплофизической инерцией композита, к кинетическому режиму сушки, определяемому перепадом парциальных давлений водяного пара.

После первого перегиба на графике наблюдается период (до 2...3 часов) с быстрым ростом градиента влажности, что свидетельствует об интенсивном удалении свободной влаги с поверхности и формировании резкой разницы между обезвоженным поверхностным слоем и влажным ядром блока.

Второй перегиб на кривой, после которого скорость роста градиента влажности существенно замедляется, обусловлен переходом процесса сушки из кинетической области в диффузионную. Характерный перегиб на кривой градиента влажности, после которого скорость его роста существенно замедляется (или кривая выходит на плато), обусловлен переходом процесса сушки из

кинетической области в диффузионную. На начальной стадии испарение лимитируется условиями на границе «арболит – воздух» (первая стадия сушки с постоянной скоростью). По мере снижения влажности на поверхности, капиллярные механизмы подтока влаги из глубины ослабевают, и процесс начинает лимитироваться внутренней диффузией (вторая стадия сушки с падающей скоростью). Кроме того, на перегиб влияет нелинейное падение коэффициента массопроводности (подтвержденное далее в п. 3.4) по мере обезвоживания поверхностных пор, что создает возрастающее сопротивление для массопереноса и стабилизирует градиент.

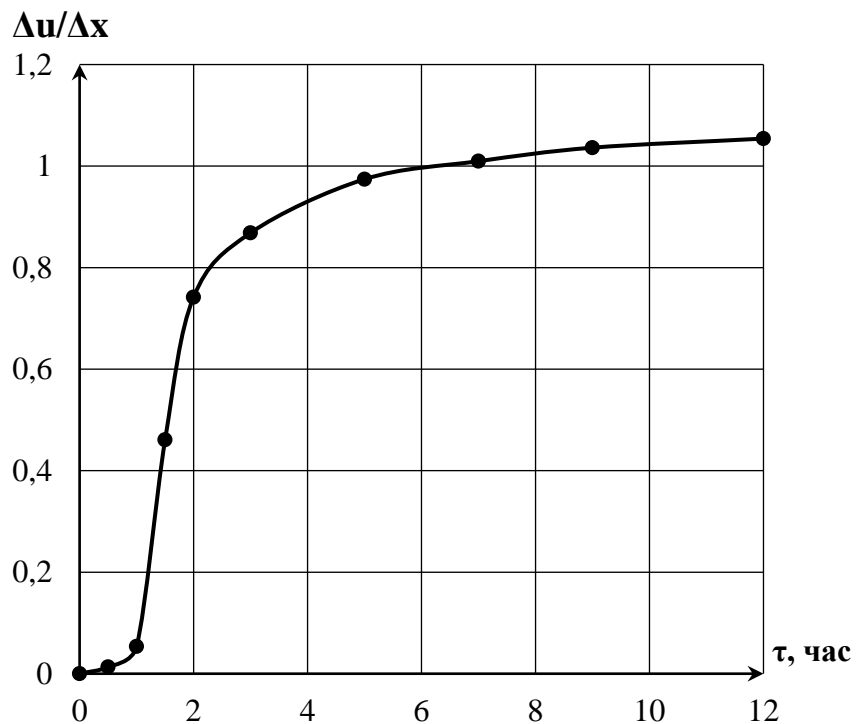


Рис. 3.5. Кинетика изменения градиента влажности на открытой поверхности ($x=0$) при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке

3.3. Определение коэффициента температуропроводности и мощности выделения тепла

Реализация разработанных в гл. 4 математических моделей и обоснования рациональных режимов сушки невозможна лишь по экспериментальным данным о пространственно-временных полях температуры и влажности, полученные в п. 3.2. Необходимым этапом исследования является идентификация эффективных

феноменологических коэффициентов переноса и мощности внутренних источников тепловыделения вследствие гидратации портландцементных минералов. Поскольку арболит представляет собой капиллярно-пористый композит, его теплофизические характеристики существенно зависят от текущей влажности и температуры, а процесс структурообразования сопровождается сложной суперпозицией экзотермии гидратации и эндотермии испарения. В связи с этим, численные значения искомых параметров определяются на основе дифференциального уравнения теплопроводности с использованием экспериментальных профилей температур.

Перенос тепла при сушке капиллярно-пористых строительных материалов лимитируют [84] коэффициент температуропроводности $a(x, \tau)$ и мощность выделения тепла при гидратации портландцементных минералов $q_{vt}(x, \tau)$. При нестационарном развитии теплопереноса данные параметры удобно определить опираясь на основное дифференциальное уравнение теплопроводности, представленное в нелинейном виде:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[a(x, \tau) \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right] + q_{vt}(x, \tau). \quad (3.3)$$

Численные значение коэффициента температуропроводности $a(x, \tau)$ и мощности выделения тепла при гидратации портландцементных минералов $q_{vt}(x, \tau)$ будем находить в каждый момент времени по характерным точкам профилей температур, по формулам, предложенным С.Ф. Федосовым, В.Е. Румянцевой и И.В. Красильниковым [200]:

$$a(x_j, \tau_{i+1}) = \frac{2t(x_j, \tau_i) - t(x_j, \tau_{i-1}) - t(x_j, \tau_{i+1})}{2\Delta\tau(\alpha_{\tau_i} - \alpha_{\tau_{i+1}})}, \quad (3.4)$$

$$q_{vt}(x_j, \tau_{i+1}) = \frac{\alpha_{\tau_i} [t(x_j, \tau_{i+1}) - t(x_j, \tau_i)] + \alpha_{\tau_{i+1}} [t(x_j, \tau_{i-1}) - t(x_j, \tau_i)]}{\Delta\tau(\alpha_{\tau_i} - \alpha_{\tau_{i+1}})}. \quad (3.5)$$

Выражения (3.4) и (3.5), позволяют определять по полученным экспериментальным путем и аппроксимированным уравнением параболы значениям температур, коэффициент температуропроводности и мощность выделения тепла при гидратации портландцементных минералов.

Использовать выражения (3.4) и (3.5) можно только при наличии математического описания зависимости распределений температуры $t(x, \tau_i)$ от координаты в виде параболы (многочлена второй степени):

$$t(x, \tau_i) = \alpha_{\tau_i} x^2 + \beta_{\tau_i} x + \gamma_{\tau_i}. \quad (3.6)$$

Значение коэффициента α_{τ_i} из зависимости распределений температур $t(x, \tau_i)$ и координаты x . Результаты расчетов по толщине исследуемого образца арболит-сырца коэффициента температуропроводности $a(x, \tau)$ и мощность выделения тепла при гидратации портландцементных минералов $q_{\text{вт}}(x, \tau)$ в разные моменты времени представлены в таблицах 3.3 и 3.4, а также на рисунках 3.6. и 3.7.

Анализ результатов расчетов (табл. 3.3, 3.4; рис. 3.6, 3.7) выявляет существенную пространственно-временную неоднородность феноменологических коэффициентов. Коэффициент температуропроводности (табл. 3.3, рис. 3.6) на открытой поверхности ($x = 0$) снижается с $2,21 \cdot 10^{-7}$ до $1,21 \cdot 10^{-7}$ м²/с (почти в 1,8 раза), тогда как в придонной зоне ($x = 0,3$ м) его изменение незначительно (с $2,20 \cdot 10^{-7}$ до $2,16 \cdot 10^{-7}$ м²/с). Физическая причина данного явления заключается в интенсивном высыхании поверхностных слоев: замещение воды в порах воздухом радикально снижает способность материала передавать тепло. В глубинных зонах, где влажность сохраняется высокой, коэффициент остается практически стабильным, что подтверждается монотонной зависимостью, представленной на рис. 3.8.

Мощность внутренних источников тепловыделения (табл. 3.4, рис. 3.7), отражающая экзотермический эффект гидратации портландцементных минералов, также демонстрирует пространственную асимметрию. Во всем объеме блока наблюдается монотонное снижение мощности (с 1,92 до 1,44 кДж/(м³·с)) по мере завершения активных стадий гидратации. Однако к 12-му часу у поверхности ($x = 0$) мощность составляет 1,25 кДж/(м³·с), а у дна опалубки ($x = 0,3$ м) - 1,44 кДж/(м³·с). Это может объясняться тем, что на открытой поверхности протекает эндотермический процесс испарения влаги, который снижает локальную температуру и, как следствие, замедляет кинетику гидратации. В придонной зоне, защищенной стальной опалубкой от массообмена с окружающей средой,

температура выше и сохраняется достаточное количество влаги, что обеспечивает более высокую интенсивность тепловыделения.

Представленная на рисунке 3.8 зависимость коэффициента температуропроводности a от текущего влагосодержания u является критически важной для понимания физики процесса и обоснования математического аппарата исследования. Как видно из графика, в исследованном диапазоне влажности (от 0,145 до 0,25 кг влаги/кг сух.) зависимость носит выраженный линейный характер и может быть аппроксимирована уравнением вида:

$$a = (9,678 u - 0,1032) \cdot 10^{-7}. \quad (3.7)$$

Оценка достоверности полученного уравнения аппроксимации показала, что значение коэффициента детерминации $R^2=0,9007$. Кроме этого нами была рассмотрена возможность аппроксимацией другими уравнения с более высокой сходимостью. Наибольшее достигнутое значение коэффициента детерминации было получено при полиноме второй степени ($R^2=0,9844$):

$$a = (-105,47 u^2 + 52,233 u - 4,2539) \cdot 10^{-7}. \quad (3.8)$$

Фактически обе аппроксимации экспериментальных данных (3.7) и (3.8) демонстрирует высокую степень достоверности, что подтверждает стабильность выявленной закономерности.

Физическая природа данной зависимости обусловлена бимодальной капиллярно-пористой структурой арболита. Коэффициент температуропроводности $a=\lambda/(c \cdot \rho)$ характеризует инерционность температурного поля и напрямую зависит от теплофизических свойств фаз, заполняющих поры материала. Теплопроводность и температуропроводность воды ($\sim 0,6$ Вт/(м·К) и $\sim 0,14 \cdot 10^{-6}$ м²/с соответственно) существенно превышают аналогичные показатели для воздуха ($\sim 0,026$ Вт/(м·К) и $\sim 0,22 \cdot 10^{-6}$ м²/с), который замещает влагу при высыхании.

По мере удаления влаги из пор древесной щепы и цементной матрицы (снижение u с 0,25 до 0,145 кг/кг) коэффициент температуропроводности падает с $2,21 \cdot 10^{-7}$ до $1,21 \cdot 10^{-7}$ м²/с, то есть почти в 1,8 раза. Это означает, что обезвоженные

поверхностные слои блока приобретают свойства «теплового барьера», который существенно замедляет проникновение тепла в центральную зону изделия.

Таблица 3.3. – Результаты определения коэффициента температуропроводности арболита-сырца при его сушке в температуре 40°C

Время испытаний	Коэффициент температуропроводности, $\cdot 10^7$ м ² /с вычисленный в точке с координатой, м			
	0	0,1	0,2	0,3
30 мин	2,212	2,201	2,201	2,201
1 час	2,120	2,212	2,201	2,201
1,5 часа	2,075	2,212	2,201	2,201
2 часа	1,834	2,200	2,201	2,201
3 часа	1,553	2,200	2,200	2,201
5 часов	1,373	2,170	2,180	2,200
7 часов	1,304	2,137	2,160	2,180
9 часов	1,250	1,978	2,150	2,170
12 часов	1,212	1,796	2,000	2,163

Таблица 3.4. – Результаты определения мощности выделения тепла в твердеющем блоке арболита-сырца при его сушке в температуре 40°C

Время испытаний	Мощность выделения тепла, кДж/(м ³ с) вычисленная в точке с координатой, м			
	0	0,1	0,2	0,3
30 мин	1,92	1,92	1,92	1,92
1 час	1,76	1,87	1,88	1,9
1,5 часа	1,7	1,84	1,87	1,88
2 часа	1,67	1,8	1,84	1,86
3 часа	1,61	1,72	1,75	1,78
5 часов	1,55	1,63	1,67	1,7
7 часов	1,48	1,55	1,58	1,62
9 часов	1,35	1,46	1,49	1,53
12 часов	1,25	1,36	1,4	1,44

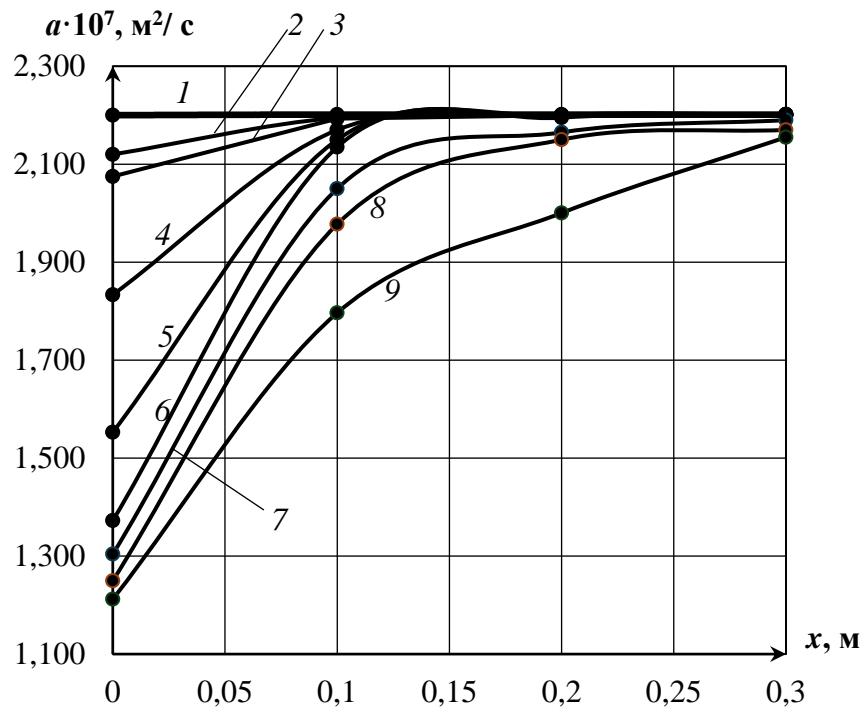


Рис. 3.6. Изменение коэффициента температуропроводности арболита-сырца при его сушке в температуре 40°C

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.

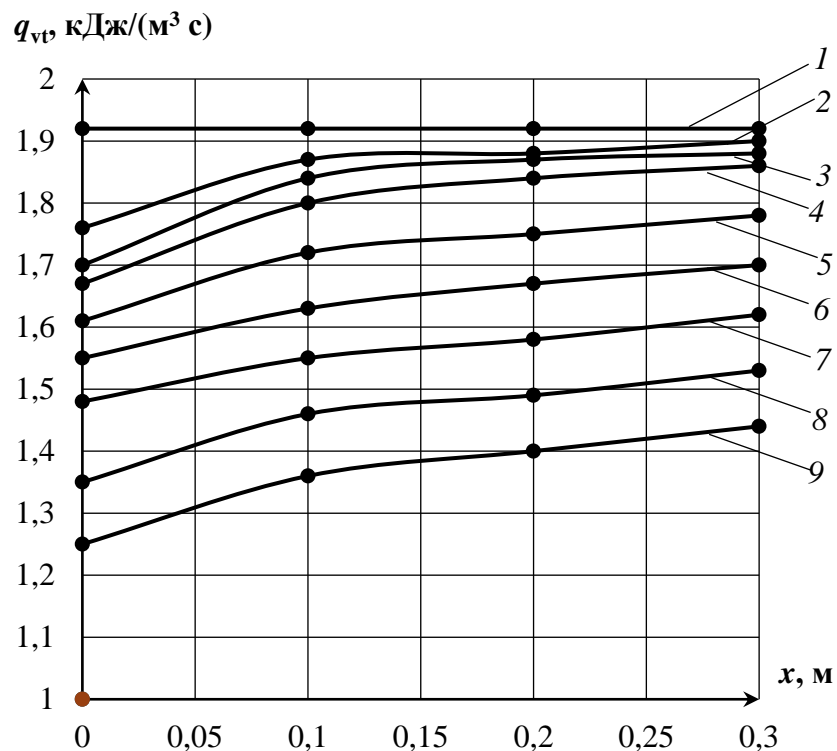


Рис. 3.7. Изменение мощности выделения тепла в твердеющем блоке арболита-сырца при его сушке в температуре 40°C

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.

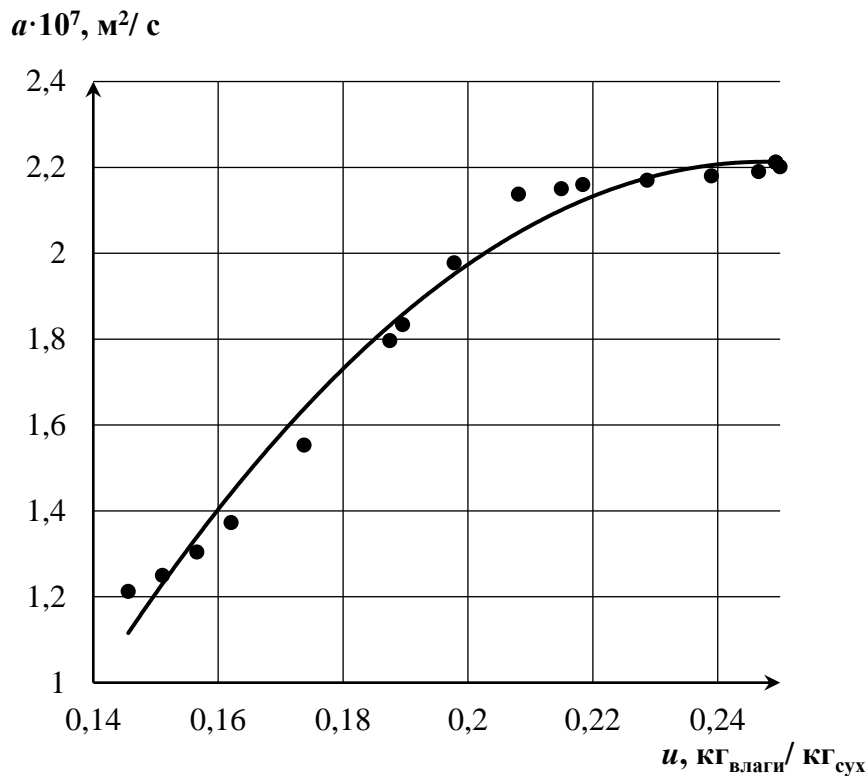


Рис. 3.8. Зависимость коэффициента температуропроводности от влажности арболита-сырца

С математической точки зрения, полученные зависимости (3.7) и (3.8) $a=f(u)$ служат прямым обоснованием нелинейного характера краевой задачи теплопроводности и необходимости применения метода микропроцессов (разработанного в научной школе С.В. Федосова) [160, 201]. Поскольку коэффициент температуропроводности не является константой, а непрерывно меняется по мере высыхания, аналитическое решение уравнения теплопроводности в замкнутом виде невозможно. Метод микропроцессов позволяет разбить процесс сушки на короткие временные интервалы, в пределах которых a принимается постоянным, а его значение ступенчато обновляется на следующем шаге интегрирования в строгом соответствии с текущей влажностью материала (рис. 3.6).

С технологической точки зрения, выявленная закономерность объясняет механизм формирования опасных температурных градиентов. Падение температуропроводности сухих поверхностных слоев при интенсивном подводе тепла от сушильного агента неизбежно ведет к перегреву «корки» и увеличению разницы температур между поверхностью и ядром блока (что было

экспериментально зафиксировано в п. 3.2.1). Этот термический градиент, накладываясь на градиент влажностный, генерирует значительные внутренние напряжения, что диктует необходимость строгого контроля скорости прогрева на начальных стадиях сушки для минимизации риска трещинообразования.

3.4. Определение коэффициента массопроводности и мощности поглощения влаги

Если перенос тепла в процессе сушки арболита лимитируется коэффициентом температуропроводности и мощностью внутренних источников тепловыделения (п. 3.3), то кинетику удаления влаги из капиллярно-пористой структуры композита определяют коэффициент массопроводности $k(x, \tau)$ и интенсивность объёмного поглощения влаги $q_{vm}(x, \tau)$, связанная с химическим связыванием воды при гидратации портландцементных минералов. Поскольку в п. 3.2.2 было экспериментально установлено, что влажностное поле в блоке формируется в условиях асимметричного массообмена (односторонняя сушка через открытую грань при паронепроницаемой стальной опалубке), идентификация эффективных коэффициентов массопереноса требует отдельного рассмотрения. Численные значения искомых параметров определяются на основе дифференциального уравнения массопроводности с использованием экспериментальных профилей влагосодержания, полученных в п. 3.2, по аналогии с методикой, применённой в п. 3.3 для задач теплопроводности.

Внутреннюю диффузию влаги в капиллярно-пористом строительном материале в первую очередь лимитируют [112,199] коэффициент массопроводности $k(x, \tau)$ и интенсивность объёмного поглощения влаги $q_{vm}(x, \tau)$, обусловленная химическим связыванием воды продуктами гидратации портландцементных минералов. При нестационарном развитии массопереноса данные параметры удобно определять, опираясь на основное дифференциальное уравнение массопроводности, представленное в нелинейном виде:

$$\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(x, \tau) \cdot \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \right] - \frac{q_{\text{vm}}(x, \tau)}{\rho_{\text{сух}}}. \quad (3.9)$$

Численные значения коэффициента массопроводности $k(x, \tau)$ и интенсивности объёмного поглощения влаги $q_{\text{vm}}(x, \tau)$ будем находить в каждый момент времени по характерным точкам профилей влагосодержания [19], по формулам, предложенным С.В. Федосовым и И.В. Красильниковым [200]:

$$k(x_j, \tau_{i, i+1}) = \frac{2u(x_j, \tau_i) - u(x_j, \tau_{i-1}) - u(x_j, \tau_{i+1})}{2\Delta\tau(\alpha_{\tau_i} - \alpha_{\tau_{i+1}})}, \quad (3.10)$$

$$q_{\text{vm}}(x_j, \tau_{i, i+1}) = \rho_{\text{сух}} \cdot \frac{\alpha_{\tau_i} [u(x_j, \tau_{i+1}) - u(x_j, \tau_i)] + \alpha_{\tau_{i+1}} [u(x_j, \tau_{i-1}) - u(x_j, \tau_i)]}{\Delta\tau(\alpha_{\tau_i} - \alpha_{\tau_{i+1}})}. \quad (3.11)$$

Выражения (3.10) и (3.11) позволяют определять по полученным экспериментальным путём и аппроксимированным уравнением параболы значениям влагосодержания коэффициент массопроводности и интенсивность объёмного поглощения влаги при гидратации портландцементных минералов.

Использовать выражения (3.10) и (3.11) можно только при наличии математического описания зависимости распределения влагосодержания $u(x, \tau_i)$ от координаты x в виде параболы (многочлена второй степени):

$$u(x, \tau_i) = \alpha_{\tau_i} x^2 + \beta_{\tau_i} x + \gamma_{\tau_i}. \quad (3.12)$$

Значение коэффициента α из зависимости распределения влагосодержания $u(x, \tau_i)$ и координаты x определено исходя из значений распределения влажности в точках x_1, x_2, x_3 в момент времени τ_i . Результаты расчётов по толщине исследуемого образца арболита-сырца коэффициента массопроводности $k(x, \tau)$ и интенсивности объёмного поглощения влаги $q_{\text{vm}}(x, \tau)$ в разные моменты времени представлены в таблицах 3.5 и 3.6, а также на рисунках 3.7 и 3.8.

Как следует из таблицы 3.5 и рисунка 3.9, коэффициент массопроводности демонстрирует выраженную пространственную асимметрию и существенную нелинейность во времени. На открытой поверхности ($x = 0$) его значение снижается с $7,53 \cdot 10^{-9}$ до $1,83 \cdot 10^{-9}$ м²/с, то есть более чем в 4 раза за 12 часов сушки. В то же время в придонной зоне ($x = 0,3$ м), защищённой стальной опалубкой от массообмена с окружающей средой, коэффициент остаётся

практически стабильным, изменяясь незначительно (с $7,59 \cdot 10^{-9}$ до $5,60 \cdot 10^{-9}$ м²/с). Физическая причина данного явления аналогична наблюдаемой для температуропроводности (п. 3.3): интенсивное высыхание поверхностных слоёв приводит к замещению воды в порах воздухом, что радикально снижает способность материала передавать влагу за счёт капиллярных механизмов. В глубинных зонах, где влажность сохраняется на уровне 0,44...0,49 кг/кг, связанная водная фаза не прерывается, и массоперенос продолжается преимущественно по капиллярному механизму с высокой эффективностью.

Мощность объёмного поглощения влаги $q_{vm}(x,t)$ (табл. 3.6, рис. 3.10), отражающая скорость химического связывания воды минералами портландцемента (преимущественно C_3S и C_3A), также подчиняется закономерностям пространственной асимметрии. Во всём объёме блока наблюдается монотонное снижение мощности с $9,50 \cdot 10^{-7}$ до $6,19 \cdot 10^{-7}$ кг/(м³·с) по мере исчерпания реакционноспособных фаз клинкера и снижения доступности свободной воды. Однако к 12-му часу у поверхности ($x = 0$) мощность составляет $6,19 \cdot 10^{-7}$ кг/(м³·с), а у дна опалубки ($x = 0,3$ м) $7,13 \cdot 10^{-7}$ кг/(м³·с), то есть на 15 % выше. Это объясняется тем, что в придонной зоне, защищённой от испарения, сохраняется более высокая влажность и температура, создающая благоприятные условия для протекания реакций гидратации. На открытой поверхности, напротив, часть влаги теряется за счёт испарения, а эндотермический эффект парообразования локально снижает температуру, замедляя кинетику химического связывания воды.

Представленная на рисунке 3.11 зависимость коэффициента массопроводности k от текущего влагосодержания u необходима для успешной верификации математической модели массопереноса и повышения точности расчета градиента массопереноса в процессе сушки блоков из арболита-сырца. В исследованном диапазоне влажности (от 0,285 до 0,49 кг/кг) экспериментальные данные с высокой степенью достоверности аппроксимируются линейной функцией вида:

$$k = (29,251 u - 7,0374) \cdot 10^{-9}. \quad (3.13)$$

Таблица 3.5. – Результаты определения коэффициента массопроводности арболита-сырца при его сушке в температуре 40°C

Время испытаний	Коэффициент массопроводности, $\cdot 10^9 \text{ м}^2/\text{с}$ вычисленный в точке с координатой, м			
	0	0,1	0,2	0,3
30 мин	7,529	7,588	7,588	7,588
1 час	7,298	7,529	7,588	7,588
1,5 часа	4,955	7,355	7,588	7,588
2 часа	3,487	6,685	7,287	7,588
3 часа	2,762	5,903	6,960	7,160
5 часов	2,319	5,181	6,313	6,748
7 часов	2,137	4,521	5,754	6,350
9 часов	1,973	3,922	5,274	5,968
12 часов	1,827	3,384	4,822	5,600

Таблица 3.6. – Результаты определения мощности поглощения влаги для гидратации портландцементных минералов в твердеющем блоке арболита-сырца при его сушке в температуре 40°C

Время испытаний	Мощность поглощения влаги для гидратации портландцементных минералов, $\cdot 10^7, \text{ кг}_{\text{влаги}}/(\text{м}^3 \text{ с})$ вычисленная в точке с координатой, м			
	0	0,1	0,2	0,3
30 мин	9,504	9,504	9,504	9,504
1 час	8,712	9,257	9,356	9,405
1,5 часа	8,415	9,108	9,257	9,306
2 часа	8,267	8,910	9,108	9,207
3 часа	7,970	8,514	8,663	8,811
5 часов	7,673	8,069	8,267	8,415
7 часов	7,326	7,673	7,821	8,019
9 часов	6,683	7,227	7,376	7,574
12 часов	6,188	6,732	6,930	7,128

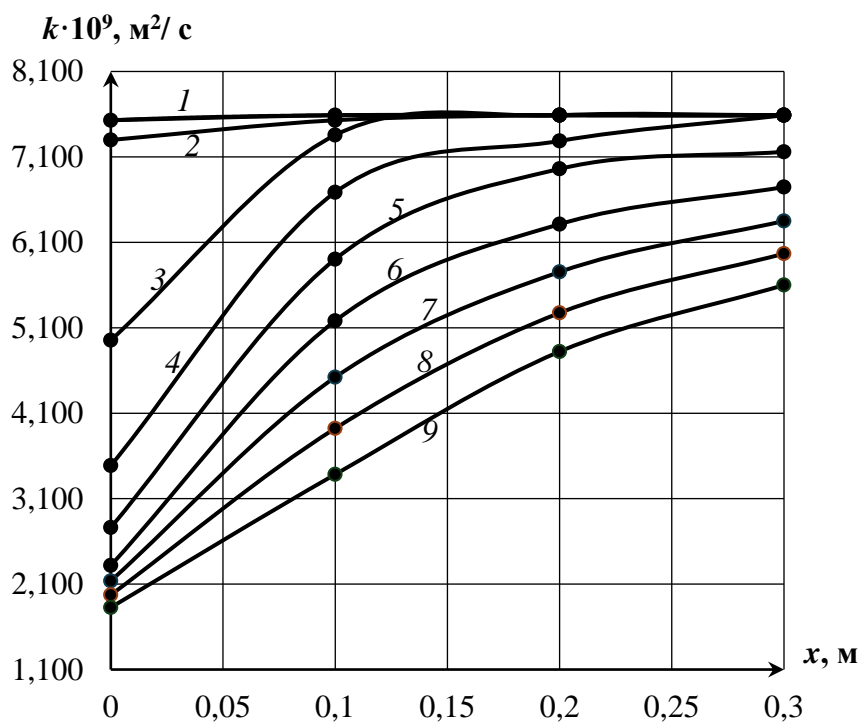


Рис. 3.9. Изменение коэффициента массопроводности арболита-сырца при его сушке в температуре 40°C
 Время нагрева: 1 – 0,5 ч.; 2 – 1 ч.; 3 – 1,5 ч.; 4 – 2 ч.; 5 – 3 ч.; 6 – 5 ч.; 7 – 7 ч.; 8 – ч.; 9 – 12 ч.

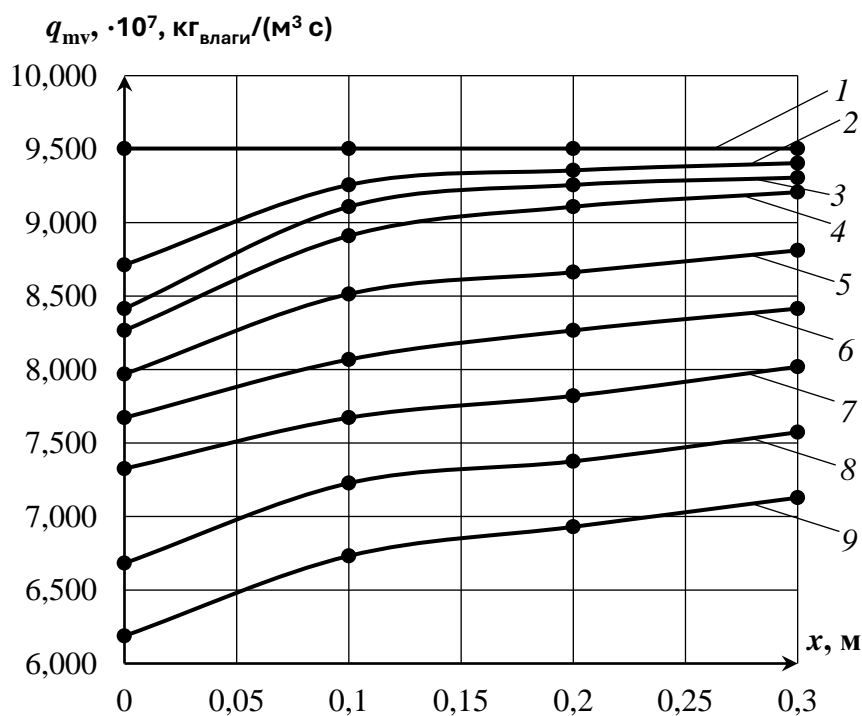


Рис. 3.10. Изменение мощности поглощения влаги для гидратации портландцементных минералов в твердеющем блоке арболита-сырца при его сушке в температуре 40°C
 Время нагрева: 1 – 0,5 ч.; 2 – 1 ч.; 3 – 1,5 ч.; 4 – 2 ч.; 5 – 3 ч.; 6 – 5 ч.; 7 – 7 ч.; 8 – ч.; 9 – 12 ч.

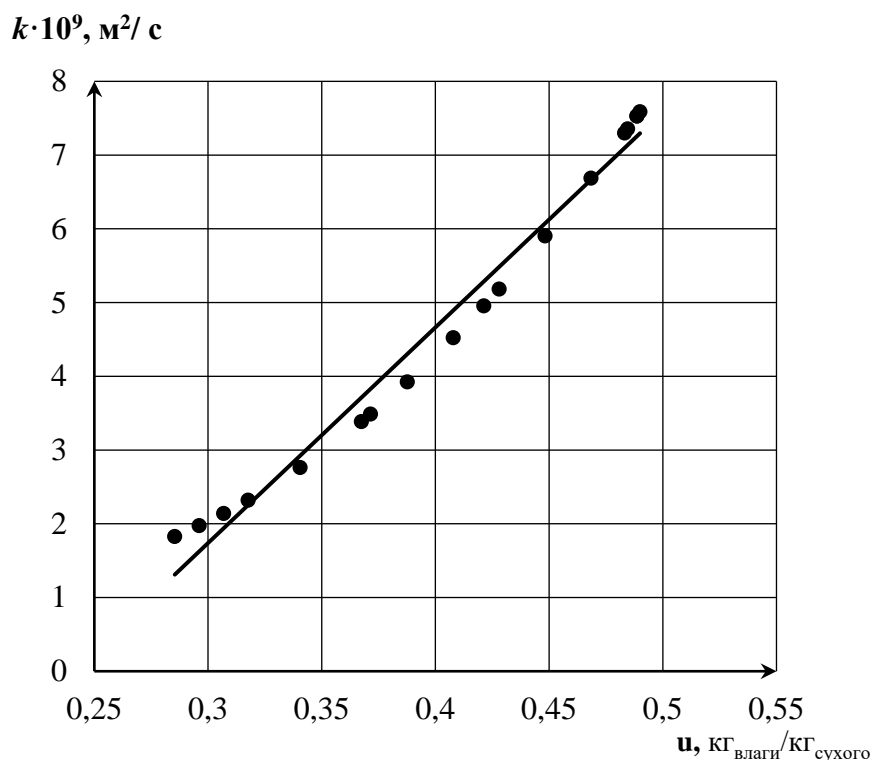


Рис. 3.11. Зависимость коэффициента массопроводности от влажности арболита-сырца

Оценка достоверности аппроксимации показала высокое значение коэффициента детерминации ($R^2=0,9844$).

Физическая интерпретация полученной линейной зависимости опирается на теорию массопереноса в капиллярно-пористых средах [82, 112, 155]. На рассматриваемых стадиях сушки, когда влагосодержание арболита остается достаточно высоким, в порах древесной щепы и цементной матрицы сохраняется связанная водная фаза. Перенос влаги осуществляется преимущественно за счет капиллярных механизмов. Линейный характер падения коэффициента k свидетельствует о том, что по мере обезвоживания эффективное сечение капилляров, заполненных водой, сокращается строго пропорционально уменьшению общего влагосодержания. Переход к механизму паровой диффузии, который обычно характеризуется резким нелинейным (степенным или экспоненциальным) падением k , в данном диапазоне влагосодержания еще не наступает, так как гигроскопическая влажность материала не достигнута.

С математической точки зрения, выявленная линейная зависимость $k=f(u)$ существенно облегчает численную реализацию метода микропроцессов

(разработанного в научной школе С.В. Федосова). Линейная аппроксимация позволяет аналитически интегрировать нелинейное уравнение теплопроводности на отдельных временных шагах, обеспечивая высокую скорость сходимости вычислительного алгоритма и минимизируя накопление погрешности при переходе от одного микропроцесса к другому, когда коэффициент k ступенчато обновляется в строгом соответствии с текущей влажностью.

С технологической точки зрения, установленная закономерность объясняет механизм формирования опасного влажностного градиента, зафиксированного в п. 3.2.2. По мере высыхания открытой поверхности коэффициент теплопроводности в ней линейно падает, создавая возрастающее сопротивление для подтока влаги из глубинных зон. Поскольку стальная опалубка у дна блока ($x = 0,3$ м) исключает отток влаги, а внутренний массоперенос лимитируется линейно падающим коэффициентом k , в блоке неизбежно формируется резкая асимметрия профиля влажности. Это подтверждает технологический вывод о необходимости применения частично проницаемых настилов при сушке арболитовых изделий для выравнивания профиля влажности и снижения риска усадочного трещинообразования.

3.4. Определение коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности потоков тепла и влаги

Определение эффективных значений коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости c , а также плотностей тепловых q_t и массовых q_m потоков является завершающим этапом идентификации феноменологических параметров модели. На каждом микропроцессе в промежуток времени от τ_{i-1} до τ_i данные параметры определяются на основе ранее установленных зависимостей коэффициента температуропроводности $a(x, \tau)$ (п. 3.3), коэффициента теплопроводности $k(x, \tau)$ (п. 3.4) и плотности композита $\rho(u)$ (п. 3.1) с использованием фундаментальных соотношений теории тепломассопереноса [82,85]. Плотности потоков рассчитывались путем дифференцирования экспериментальных профилей температуры и влагосодержания по законам Фурье и Фика соответственно:

$$-\lambda \left. \frac{\partial t(x, \tau_i)}{\partial x} \right|_{x=0} = q_t \quad (3.14)$$

$$-k \left. \frac{\partial u(x, \tau_i)}{\partial x} \right|_{x=0} = q_m \quad (3.15)$$

Результаты расчетов для характерных моментов времени, охватывающих весь цикл сушки, сведены в таблицу 3.7.

Анализ эволюции параметров теплопереноса (табл. 3.7) подтверждает существенно нелинейный и сопряженный характер процессов. Коэффициент теплопроводности λ монотонно снижается с 0,43 до 0,22 Вт/(м·К) (почти в 2 раза), что объясняется замещением воды в порах воздухом по мере высыхания: теплопроводность воды (~0,6 Вт/(м·К)) более чем в 20 раз превышает теплопроводность воздуха (~0,026 Вт/(м·К)), и даже частичное обезвоживание пор радикально меняет эффективный коэффициент [14, 25]. Аналогично, удельная теплоемкость c падает с 3,10 до 2,40 кДж/(кг·К), поскольку вода обладает существенно большей теплоемкостью, чем твердый скелет композита.

Таблица 3.7. – Результаты определения параметров ТВО в твердеющем блоке арболита-сырца при его сушке в температуре 40°C

Наименование параметра ТВО	Ед. изм.	Значение параметра с момента начала ТВО, час.					
		1		5	7	9	12
Коэффициент теплопроводности, λ	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, q_t	Вт/м ²	16,8	11,4	7,5	4,8	2,9	1,8
Плотность потока влаги	$\cdot 10^{10}$ кг/(м ² ·с)	7,11	8,65	10,42	12,15	13,70	15,03

Динамика плотностей потоков демонстрирует разнонаправленные тенденции. Плотность теплового потока q_t снижается с 16,8 до 1,8 Вт/м² - почти на порядок, что свидетельствует о затухании движущей силы теплопереноса по мере выравнивания

температурного поля и начало формирования стационарного температурного поля. Одновременно с этим плотность потока влаги q_m увеличивается с $7,11 \cdot 10^{-10}$ до $15,03 \cdot 10^{-10}$ кг/(м²·с). Данный рост обусловлен сменой механизма массообмена: на поздних стадиях сушки, по мере снижения влажности поверхностных слоев, преобладающим становится парообразный перенос влаги из внутренних зон к испаряющей поверхности, интенсивность которого существенно возрастает с повышением температуры [82, 113].

Кроме того, снижение коэффициента массопроводности материала (см. рис. 3.9) компенсируется резким увеличением градиента влагосодержания. Формирование высокого градиента вызвано асимметрией граничных условий, а именно односторонним характером массообмена через открытую грань при паронепроницаемых боковых поверхностях изделия.

3.5. Выводы по главе 3

1. Установлена структурно-зависимая природа физических свойств. Экспериментально подтверждена функциональная зависимость плотности арболита от текущей влажности по зависимости $\rho_w = \rho_0(1+u)$, что позволяет корректировать плотность арболита на каждом шаге математического моделирования. Полученные данные служат базой для пересчета концентрационных и объемных параметров в алгоритмах цифрового управления.

2. Выявлена пространственная асимметрия полей температуры и влажности. В результате натурного эксперимента установлено, что сушка в стальной опалубке формирует асимметричные профили: если на открытой поверхности влажность падает на 42%, то в придонной зоне - лишь на 10%. Зафиксировано формирование устойчивых градиентов температуры (до 4...5 °С на 100 мм) и влажности (до 0,155 кг/кг на 300 мм), генерирующих опасные усадочные напряжения. Это обосновывает необходимость перехода от эмпирических режимов сушки к адаптивным, учитывающим градиенты потенциалов переноса, инициирующие встречные потоки теплоты и влаги, а также суперпозиция тепловыделения и влагопоглощения вследствие гидратации портландцементных минералов;

3. Проведена идентификация нелинейных феноменологических коэффициентов переноса. Доказано, что коэффициенты тепло- a и массопроводности, а также теплопроводности и теплоемкости не являются константами, а существенно зависят от текущей влажности. Установлено, что в диапазоне сушки коэффициент теплопроводности падает почти в 2 раза (с 0,43 до 0,22 Вт/(м·К)), а коэффициент массопроводности - более чем в 4 раза (с $7,53 \cdot 10^{-9}$ до $1,83 \cdot 10^{-9}$ м²/с). Получены математические зависимости (линейные и полиномиальные) с высокой степенью детерминации ($R^2 > 0,9$), которые формируют базу данных для цифровых моделей тепломассопереноса на основе нелинейных дифференциальных уравнений.

4. Количественно оценены мощности внутренних физико-химических источников и стоков. Впервые для арболита в условиях ТВО рассчитаны мощности экзотермического тепловыделения при гидратации цемента (до 1,92 кДж/(м³·с)) и эндотермического поглощения влаги при испарении. Подтвержден сопряженный характер процессов: испарение на поверхности локально замедляет гидратацию, тогда как в придонной зоне создаются условия для ускоренного структурообразования. Учет этих факторов обязателен для разработки адаптивных алгоритмов, предотвращающих перегрев и наличие больших градиентов тепла и влаги, влекущие к растрескиванию изделий или снижению прочности.

5. Сформирована информационно-параметрическая база для цифровизации технологий. Совокупность полученных пространственно-временных закономерностей, аппроксимирующих уравнений для коэффициентов переноса и данных о внутренних тепловыделениях создает необходимую базу данных для цифровых математических моделей. Разработанные в главе зависимости позволяют перейти к решению задачи синтеза адаптивных технологий производства, где параметры термовлажностной обработки будут автоматически корректироваться в реальном времени (методами цифровизации) в зависимости от текущей стадии структурообразования и фактических градиентов температуры и влажности в теле блока.

ГЛАВА 4. ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ОБОСНОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АРБОЛИТА

Ускорение твердения арболита - важная технологическая задача, особенно в условиях серийного масштабного производства строительных блоков [161,173]. Твердение арболита обусловлено, прежде всего, гидратацией цемента, но его эффективность может снижаться из-за наличия в щепе сахаров, лигнинов и других веществ, снижающих кинетику гидратации [2, 35, 102]. Поэтому ускорение связано как с химическими мерами, так и с термовлажностной обработкой (ТВО) [40, 167].

Для ускорения твердения арболита оптимально сочетать предварительную минерализацию древесного заполнителя, добавление ускоряющих и пластифицирующих добавок и мягкую тепловую обработку (до 60 °С) [20, 101, 168]. Ключевым фактором является баланс между скоростью твердения и сохранением целостности органической фракции [35, 102]. При нарушении теплового режима возможны дефекты (растрескивание, усадка), поэтому выбор метода должен быть научно обоснован и верифицирован по прочностным характеристикам [57, 115].

Процессы твердения арболита сопровождаются высушиванием блока с различной влажностью, что неизбежно влечет сложные взаимосвязанные физико-химические явления: тепло- и влагоперенос в капиллярно-пористом материале, структурообразование (изменение поровой структуры при усушке) и эндо- и экзотермические эффекты (испарение воды и гидратация цемента) [82, 87, 115]. Эти процессы протекают во взаимосвязанном режиме, определяющем конечные свойства материала [49, 158, 162].

Разработка адаптивных технологий производства строительных изделий из арболита, заявленная в теме диссертации, невозможна без создания надежного математического аппарата, способного прогнозировать пространственно-временную эволюцию полей температуры и влажности. В предыдущей главе были

экспериментально идентифицированы феноменологические коэффициенты тепломассопереноса и мощности внутренних физико-химических источников. Настоящая глава посвящена формулировке и решению краевых задач нестационарного сопряженного тепломассопереноса с учетом выявленной нелинейной зависимости коэффициентов переноса от текущей влажности, а также эндо- и экзотермических эффектов гидратации и испарения. Полученные аналитические и численные решения формируют алгоритмическую базу для создания «цифрового двойника» процесса сушки, что позволяет перейти от эмпирического управления к цифровому регулированию режимов термовлажностной обработки в реальном времени.

4.1. Физико-математическая постановка задачи создания цифровой модели сопряженного нестационарного тепломассопереноса при термовлажностной обработке строительных изделий из арболита

Как установлено в главах 1 и 2, арболит представляет собой двухфазный капиллярно-пористый композит, процесс ТВО которого сопровождается сложным комплексом взаимосвязанных физико-химических явлений. В отличие от классических задач сушки инертных материалов, тепломассоперенос в арболите лимитируется не только градиентами потенциала, но и структурной неоднородностью, а также внутренними источниками и стоками теплоты и массы.

Физическая модель процесса базируется на следующих допущениях и фактах, подтвержденных натурным экспериментом (Глава 3):

1. Перенос тепла и влаги описывается системой сопряженных нелинейных дифференциальных уравнений параболического типа.
2. Коэффициенты температуропроводности a и массопроводности k не являются константами, а представляют собой непрерывные функции текущего влагосодержания u (установлены линейные и полиномиальные аппроксимации в п. 3.3 и 3.4).
3. В объеме материала действуют распределенные источники: экзотермическое тепловыделение при гидратации портландцементных

минералов $q_{vt}(u,t)$ и эндотермическое поглощение тепла при фазовом переходе влаги (испарении).

4. Массоперенос протекает в условиях асимметричных граничных условий: открытая поверхность интенсифицирует массообмен с окружающей средой, тогда как дно блока, контактирующее со стальной опалубкой, представляет собой паронепроницаемый экран.
5. Часть свободной влаги необратимо связывается химическим путем продуктами гидратации цемента, что описывается мощностью объемного поглощения $q_{vm}(u,t)$.

С учетом принятых физических представлений, краевая задача нестационарной теплопроводности для одномерной постановки (по толщине блока $x \in [0, H]$) записывается в виде нелинейного дифференциального уравнения в частных производных:

$$\rho(u,t) \cdot c(u,t) \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(u,t) \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \right] + q_{vt}(u,t), \quad \tau > 0, 0 < x < H, \quad (4.1)$$

где $t(x,\tau)$ – температура, °С; τ – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); q_{vt} – мощность внутренних источников тепловыделения, Вт/м³; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); ρ – плотность композита, кг/м³.

Сопряженная краевая задача массопроводности (диффузии влаги) с учетом химического связывания воды имеет вид:

$$\frac{\partial u(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(u,t) \frac{\partial u(x,\tau)}{\partial x} \right] + \frac{q_{vm}(u,t)}{\rho(u,t)}, \quad \tau > 0, 0 < x < H, \quad (4.2)$$

где $u(x,\tau)$ – текущее влагосодержание, кг/кг сух.; $k(u,t)$ – коэффициент массопроводности, м²/с; q_{vm} – мощность объемного поглощения влаги при гидратации, кг/(м³·с).

Анализ уравнений (4.1) и (4.2) показывает, что из-за существенной нелинейности коэффициентов, а также наличия источниковых членов, получение замкнутого аналитического решения классическими методами математической физики (например, методом разделения переменных или интегральным преобразованием Лапласа) в исходном виде невозможно.

Для решения данной нелинейной краевой задачи и последующей ее интеграции в алгоритмы цифрового управления применяется метод микропроцессов, разработанный в научной школе академика РААСН С.В. Федосова. Суть метода заключается в разбиении всего нестационарного процесса ТВО на последовательность коротких временных интервалов - микропроцессов ($\Delta\tau_i$). В пределах каждого i -го микропроцесса физические свойства материала (коэффициенты температуропроводности, массопроводности, теплопроводности, удельная теплоемкость) и мощности источников (тепла и массы) принимаются постоянными, равными их средним значениям, рассчитанным по экспериментальным аппроксимациям (формулы 3.7-3.13) для текущего шага влажности.

Это позволяет на каждом шаге сводить нелинейные задачи (4.1), (4.2) к системе линейных однородных уравнений с постоянными коэффициентами, для которых могут быть получены точные аналитические решения (например, в области изображений по Лапласу, по аналогии с методикой, представленной в [200]). По завершении расчета i -го микропроцесса поля температур и влагосодержаний обновляются, коэффициенты переноса пересчитываются в соответствии с новыми значениями $u(x, \tau_i)$, и алгоритм переходит к следующему шагу.

Такая численно-аналитическая схема обладает высокой вычислительной устойчивостью и минимальной погрешностью накопления. Главное преимущество данного подхода в контексте темы диссертации заключается в том, что он позволяет в реальном времени (в среде цифрового двойника) прогнозировать возникновение критических градиентов температуры и влажности, генерирующих усадочные напряжения, и оперативно корректировать параметры ТВО (температуру и влажность в камере) формируя адаптивный режим термовлажностной обработки, гарантирующий отсутствие брака (трещин и коробления) при минимальных энергозатратах.

4.2. Цифровое моделирование нестационарного теплопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита

4.2.1. Математическая формулировка краевой задачи для метода микропроцессов

В принятой нами методологии расчета нестационарных процессов теплопереноса при термовлажностной обработке арболитовых изделий, в условиях переменных потенциалов и коэффициентов переноса по толщине изделия, в условиях асимметричного массообмена, весь процесс ТВО блока разделяется на небольшие временные интервалы $\Delta\tau_i$, а изделие по толщине на каждом i -м микропроцессе рассматривается как неограниченная пластина толщиной H с постоянными потенциалами и коэффициентами переноса (см. рис. 4.1). На схеме рис. 4.1. изображен поперечный разрез арболитового блока толщиной H , находящегося в процессе термовлажностной обработки. Сверху ($x=0$) - открытая поверхность блока, контактирующая с сушильным агентом (нагретым воздухом с температурой $t_k(\tau)$); через эту границу осуществляется теплообмен с окружающей средой. Снизу ($x=H$) - граница раздела «арболит - стальная опалубка»; через эту границу теплоперенос осуществляется через металлический барьер. Внутри тела блока (заштрихованная область 1) распределены нестационарные поля температуры $t(x,\tau)$, эволюция которых определяется коэффициентом температуропроводности, а также объемным источником: тепловыделением q_{vt} при гидратации портландцементных минералов. Стрелками показано направление теплового потока, формирующихся под действием соответствующих градиентов.

Математически физические явления нестационарного теплопереноса на каждом i -м микропроцессе, при известном распределении температур $(i-1)$ -м микропроцессе, наличии теплового потока и распределённого источника тепловыделения вследствие реакций гидратации портландцементных минералов, описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2} + q_{vt}(x,\tau), \tau > 0, 0 \leq x \leq H, \quad (4.2.1)$$

$$t(x,\tau)|_{\tau=0} = t_0(x), \quad (4.2.2)$$

$$t(H,\tau) = t_k, \quad (4.2.3)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_t \quad (4.2.4)$$

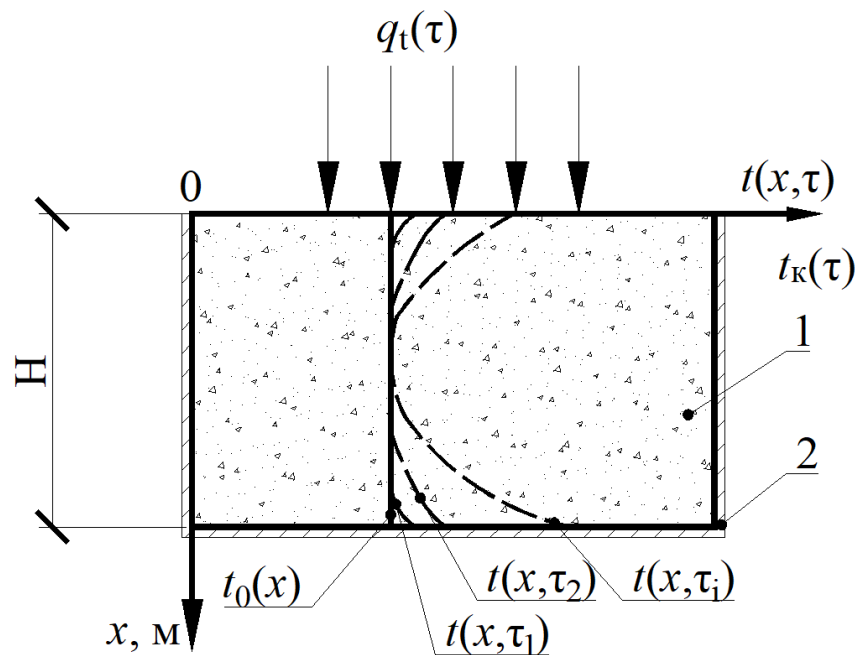


Рис. 4.1. Расчетная схема к моделированию динамики теплопереноса при ТВО изделий из арболита

1 - твердеющий арболитовый блок; 2 - стальная опалубка (паронепроницаемое основание); $q_t(\tau)$ - тепловой поток на открытой поверхности ($x=0$); $t_k(\tau)$ – температура в камере ТВО, °С

Распределение (4.2.2) - начальное условие, описывающее математической функцией распределение температуры по толщине твердеющего изделия в начале i -го микропроцесса. Частными случаями такого распределения могут быть: равномерное либо параболическое. При необходимости численные значения распределений температуры могут быть аппроксимированы [61] некоторыми несложными для анализа математическими функциями. Аналогично, можно выполнить переход от сложной математической записи решений на предшествующем $(i-1)$ -м микропроцессе, получаемых методом интегрального

преобразования Лапласа в форме сумм рядов, к более простым функциям, например полиномами [156].

В соответствии с расчетной схемой, движение тепла спровоцировано на верхней плоскости тепловым потоком от сушильного агента, т.е. при решении линейного дифференциального уравнения (4.2.1) применяем граничное условие второго рода (4.2.4). Граничное условие на нижней плоскости (4.2.3) устанавливает фиксированное значение температуры t_k на i -м микропроцессе.

4.2.2. Решение краевой задачи нестационарного теплопереноса для i -го микропроцесса

Математические модели теплопереноса наибольшую практическую ценность и универсальность приобретают в безразмерных переменных, с критериальными характеристиками процесса, удобными для его качественного анализа и последующей интеграции в алгоритмы цифрового управления режимами ТВО. Значения температуры в системе уравнений (4.2.1)–(4.2.4) приведем в безразмерный вид, а к параметрам процесса применим критерии подобия [162]:

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_k}{t_k}, \bar{x} = \frac{x}{H}, Fo = \frac{a\tau}{H^2}, Ki_{\square}^* = \frac{q_t H}{\lambda t_k}, Po_{\square}^*(\bar{x}) = \frac{q_{vt}(x) \cdot H^2}{\lambda t_k}. \quad (4.2.5)$$

Краевая задача теплопроводности при ТВО изделий из арболита в безразмерном виде запишется так:

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2} + Po_{\square}^*(\bar{x}), Fo > 0, 0 \leq \bar{x} \leq 1. \quad (4.2.6)$$

$$\text{Начальное условие: } T(\bar{x}, 0) = T_0(\bar{x}). \quad (4.2.7)$$

$$\text{Граничные условия: } T(1, Fo) = \frac{t_k - t_k}{t_k} = 0, \quad (4.2.8)$$

$$-\frac{\partial T(0, Fo)}{\partial \bar{x}} = Ki_{\square}^*. \quad (4.2.9)$$

Аналитическое решение краевой задачи теплопроводности на i -м микропроцессе (4.2.6)–(4.2.9) в условиях термовлажностной обработки арболитовых изделий в металлической опалубке позволит прогнозировать

распределение безразмерной температуры по толщине блока. Последующее дифференцирование полученного решения позволит определять значения градиента температуры в любой интересующей координате блока, что необходимо для цифровизации регулирования режимов термовлажностной обработки с целью предотвращения растрескивания изделий или снижению их прочности.

Для системы уравнений, аналогичной (4.2.6)–(4.2.9), но для процессов переноса массы с учетом внутренних источников, решение получено ранее академиком РААСН С.В. Федосовым при моделировании нестационарных процессов тепломассопереноса в капиллярно-пористых средах [162]. Приводим его, адаптировав под принятые нами обозначения переменных:

$$\begin{aligned}
 T(\bar{x}, Fo) = & Ki_{i*}^* (1 - \bar{x}) + 2 \int_0^1 T_0(\xi) d\xi + 2 \int_0^1 Po_{i*}^*(\xi) (\xi) d\xi + \\
 & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \int_0^1 T_0(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi - \\
 & - \frac{8}{\pi^2} Ki_{i*}^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] - \\
 & - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right]}{(2n-1)^2} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \int_0^1 Po_{i*}^*(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi.
 \end{aligned} \tag{4.2.10}$$

Полученное выражение (4.2.10) является решением линейного дифференциального уравнения нестационарного теплопереноса на любом промежуточном i -м микропроцессе (4.2.6) с неравномерным начальным распределением температуры (4.2.7) и граничными условиями (4.2.8) и (4.2.9). Оно дает возможность прогнозировать распределение безразмерной температуры как по координате, так и во времени на i -м микропроцессе, при наличии потока тепла (в безразмерных координатах – модифицированный критерий Кирпичева Ki^*) и объемного источника тепловыделения вследствие экзотермических реакций гидратации портландцементных минералов (в безразмерных координатах – модифицированный критерий Померанцева Po^*).

4.2.3. Численные эксперименты по цифровой модели кинетики и динамики нестационарного теплопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита

Полученное аналитическое решение (4.2.10) позволяет не только прогнозировать пространственно-временное распределение безразмерной температуры $T(\bar{x}, Fo)$ в теле арболитового блока на любом i -м микропроцессе, но и исследовать кинетику формирования температурного поля в зависимости от определяющих критериев подобия. Для целей цифровизации и адаптивного управления режимами ТВО особый практический интерес представляют две интегральные и дифференциальные характеристики: средняя безразмерная температура по толщине изделия и безразмерный градиент температуры. Средняя температура характеризует интегральный нагрев изделия и интенсивность экзотермических реакций гидратации, тогда как температурный градиент обуславливает величину теплового потока. Увеличение градиента температур способствует возникновению внутренних локальных напряжений на границе контакта древесины и цементного камня.

Средняя безразмерная температура по толщине изделия на i -м этапе процесса определяется путем интегрирования решения (4.2.10) по безразмерной координате \bar{x} :

$$\begin{aligned}
 T_{cp}(Fo) = & \int_0^1 T(\bar{x}, Fo) d\bar{x} = -\frac{Ki^*}{2} - 2 \int_0^1 \left(T_0(\xi) + \xi Po^*(\xi) \right) d\xi - \\
 & - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] T_0(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi - \\
 & - \frac{16}{\pi^3} Ki^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^3} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \int_0^1 Po^*(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi - \\
 & - \frac{16}{\pi^3} Ki^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^3} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right].
 \end{aligned} \tag{4.2.11}$$

Выражение (4.2.11) получается почленным интегрированием тригонометрического ряда и экспонент из решения (4.2.10), что дает интегральную оценку аккумуляции энергии блоком тепловой энергии.

Динамика изменения безразмерного градиента температуры по толщине изделия, рассчитывается путем дифференцирования решения (4.2.10) по координате:

$$\begin{aligned} \text{grad}T(\bar{x}, Fo) &= \frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}} = -Ki^* \cdot \\ &- \pi \sum_{n=1}^{\infty} (2n-1) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \int_0^1 T_0(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi + \\ &+ \frac{4}{\pi} Ki^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right]}{2n-1} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + \\ &+ \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right]}{2n-1} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \int_0^1 Po^*(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi. \end{aligned} \quad (4.2.12)$$

Проведем численные эксперименты по прогнозированию динамики температурного поля арболитового блока при начальной температуре арболитовой смеси 20°C, температуре в камере 50 °C, различных значениях модифицированного критерия Кирпичева Ki^* , характеризующего интенсивность теплового потока от сушильного агента на открытой поверхности, и критерия Фурье Fo , отражающего временную стадию процесса ТВО.

Продвижение фронта теплового потока в глубь арболитового блока по времени наглядно демонстрирует рисунок 4.2. Распределение температуры изменяется от открытой поверхности ($\bar{x}=0$) к нижней границе ($\bar{x}=1$). На начальных стадиях (при малых Fo) наблюдается резкий перепад температур в пристеночной зоне. По мере увеличения Fo температурное поле начинает выравниваться. Следует заметить, что в рамках принятого метода микропроцессов при одном и том же физическом времени критерии Фурье для соседних микропроцессов не будут равны в силу нелинейной зависимости коэффициента температуропроводности a от текущей влажности.

Исследуем влияние интенсивности внешнего теплообмена на распределение температур. Для этого выполним расчеты профилей $T(\bar{x}, Fo)$ при фиксированном значении критерия Фурье $Fo=0,1$ и различных значениях модифицированного критерия Кирпичева Ki^* (рисунок 4.3). Увеличение Ki^* моделирует ужесточение режима ТВО (повышение температуры сушильного агента или увеличение

коэффициента теплоотдачи). Как видно из графика, рост Ki^* приводит к существенному увеличению температуры во всем объеме блока, но при этом резко возрастает и температурный градиент на открытой поверхности. С позиций разработки адаптивных технологий это означает, что форсирование режима сушки на начальных этапах, когда влажность арболита максимальна, неизбежно ведет к перегреву поверхностной «корки» и генерации высоких термических напряжений.

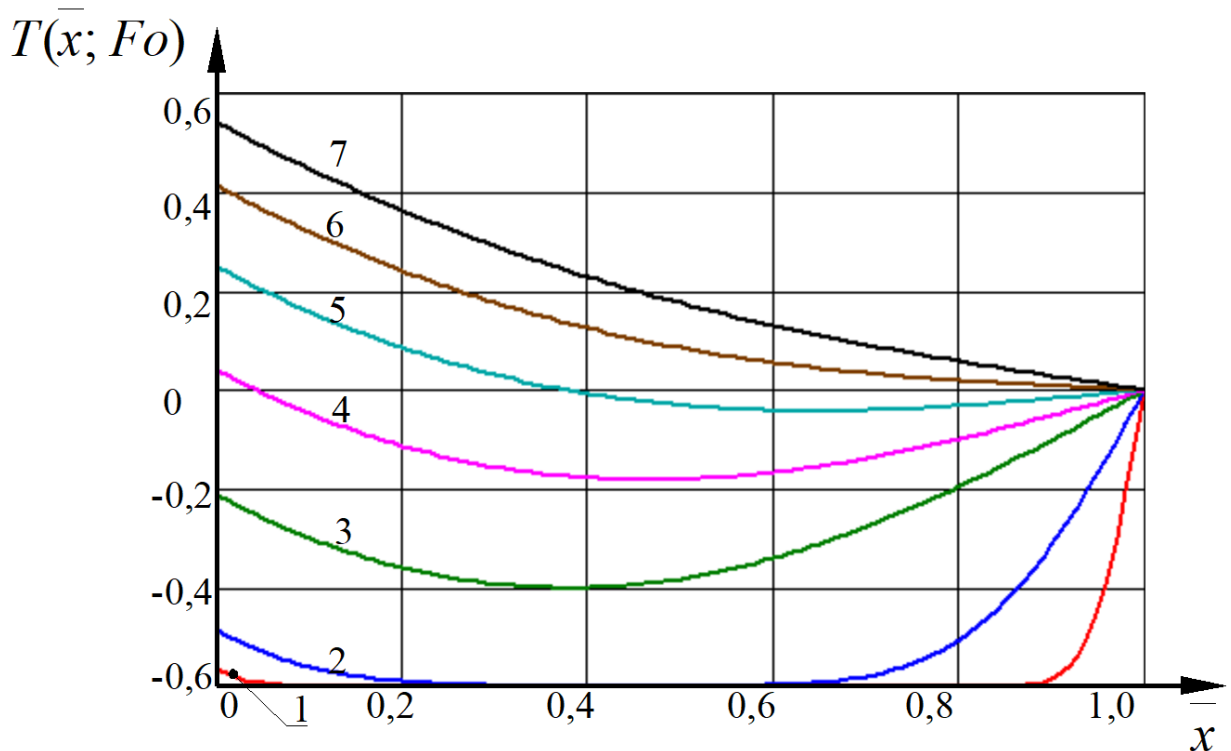


Рис. 4.2. Динамика распределения безразмерных температур по толщине изделия при значениях модифицированного критерия Кирпичева $Ki^*=0,5$ и критерия Фурье: $Fo=1 - 0,01$; 2 - 0,01; 3 - 0,1; 4 - 0,2; 5 - 0,3; 6 - 0,4; 7 - 0,5

Результаты расчетов изменения динамики (рис. 4.4) и кинетики $\text{grad}T(1, Fo)$ (рис.4.5) безразмерного градиента в зависимости от критерия Фурье при различных числах Ki^* представлены в графической форме. Отмечаем, что на отрезке $0 \leq Fo \leq 0,1$ градиент температуры на нижней границе (у опалубки) крайне мал, что свидетельствует о том, что стальная форма в начальный период выступает скорее как теплоаккумулирующая поверхность. Однако по мере прогрева блока градиент нарастает, и температур около опалубки становятся существенными.

Полученные в рамках принятой расчетной схемы решения (4.2.10)-(4.2.12) позволяют прогнозировать кинетику и динамику нестационарного теплопереноса в арболитовом блоке. Результат проведенного численного эксперимента -

модельные прогнозные поля температур для различных соотношений критериев подобия Ki^* и Fo . Полученные результаты хорошо коррелируют с экспериментальными данными, полученными в главе 3, и согласуются с реальными физическими представлениями о сопряженном тепломассопереносе в капиллярно-пористых материалах.

Результаты численного моделирования показывают, что управление режимом ТВО арболита не сводится к поддержанию постоянной температуры сушильного агента. Вследствие нелинейной зависимости температуропроводности от влажности и выделения тепла при гидратации цемента, критические значения температурных градиентов достигаются на различных этапах процесса.

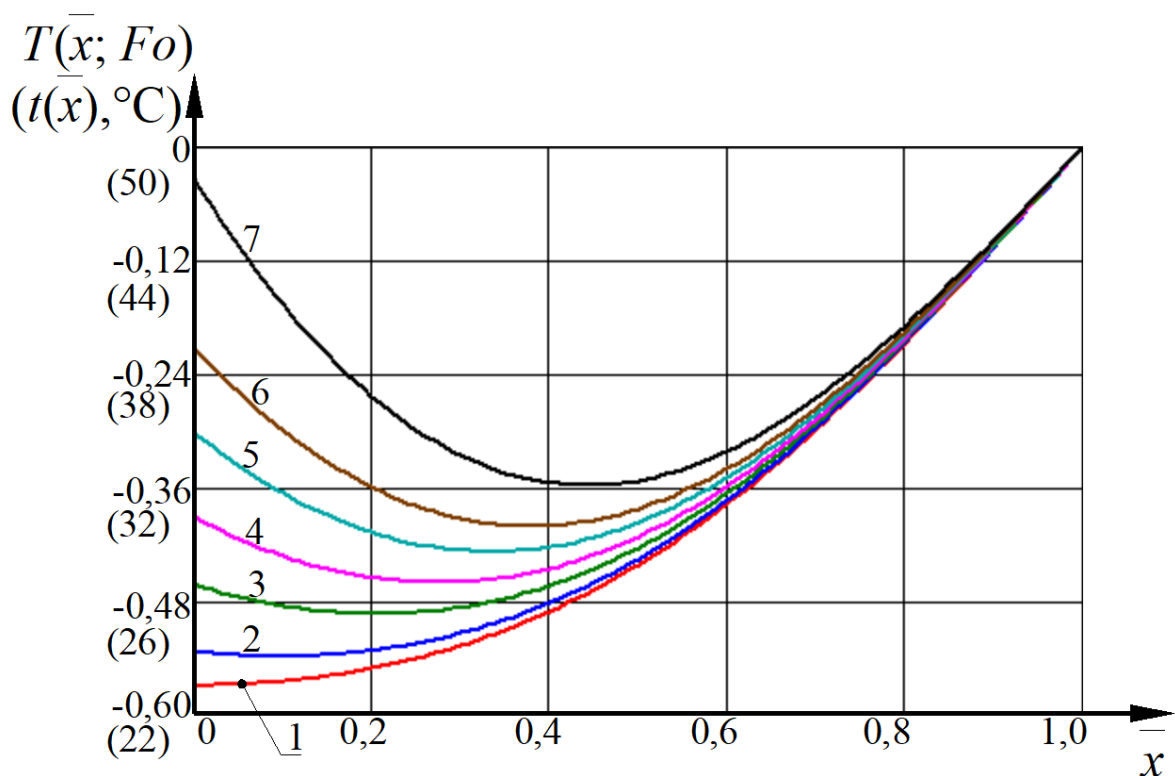


Рис. 4.3. Динамика распределения температур по толщине изделия при значениях критерия Фурье $Fo=0,1$ и модифицированного критерия Кирпичева:
 $Ki^* = 1 - 0; 2 - 0,1; 3 - 0,3; 4 - 0,5; 5 - 0,75; 6 - 1; 7 - 1,5$

Полученные аналитические зависимости (4.2.10)–(4.2.12), выраженные через критерии подобия Fo , Ki^* и Ro^* , составляют математический аппарат для «цифрового двойника» процесса ТВО. Алгоритм адаптивного управления,

рассчитывая эти параметры в реальном времени, позволяет динамически регулировать критерий Ki^* (путем изменения температуры теплоносителя или скорости циркуляции воздуха). Это обеспечивает удержание безразмерного градиента температуры $gradT(1, Fo)$ в допустимых пределах, предотвращая образование термических и усадочных дефектов при минимизации энергозатрат.

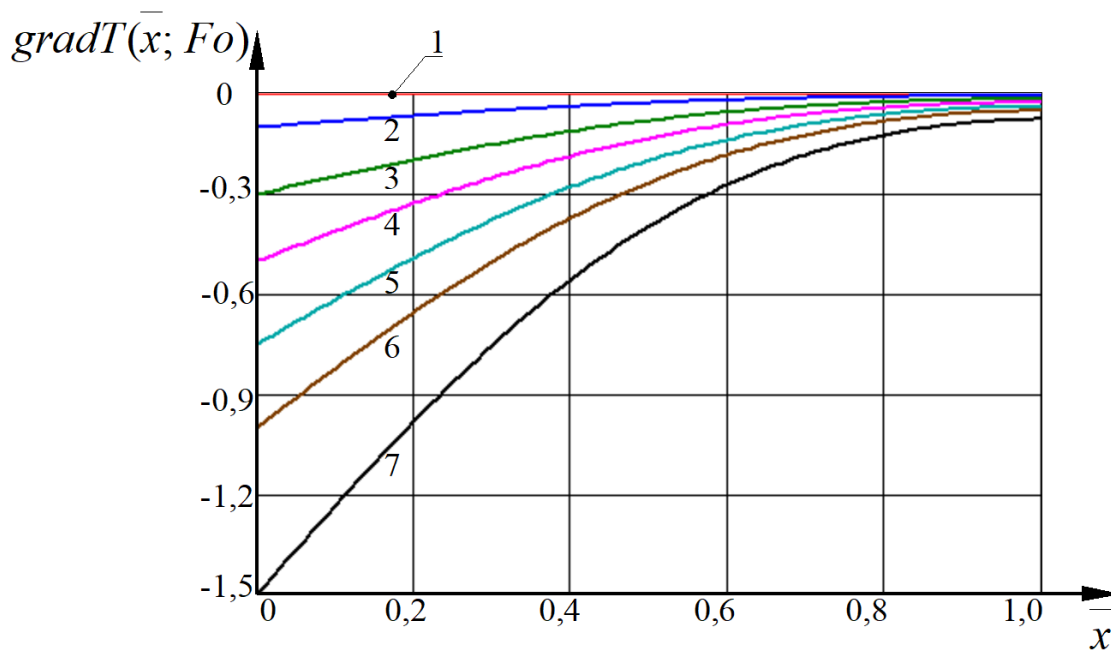


Рис. 4.4.

Динамика распределения безразмерного градиента температур по толщине изделия при значениях критерия Фурье $Fo=0,1$ и модифицированного критерия Кирпичева:

$Ki^* = 1 - 0; 2 - 0,1; 3 - 0,3; 4 - 0,5; 5 - 0,75; 6 - 1; 7 - 1,5$

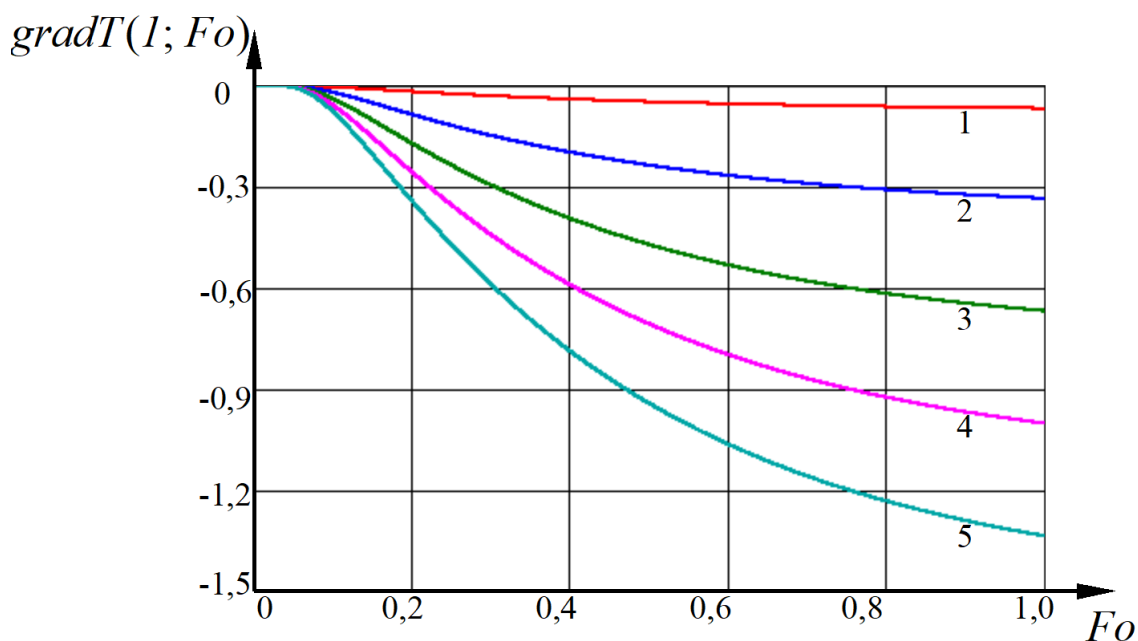


Рис. 4.5. Кинетика изменения безразмерного градиента температур на границе контакта изделия со стальной опалубкой при значениях модифицированного критерия Кирпичева:

$Ki^* = 1 - 0,1; 2 - 0,5; 3 - 1; 4 - 1,5; 5 - 2$

4.3. Цифровое моделирование нестационарного влагопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита

Распределение влажности по объему изделия выступает определяющим фактором развития усадочных деформаций, трещинообразования и коробления изделий. Специфика ТВО арболитовых блоков в металлических формах заключается в резкой асимметрии граничных условий массообмена: интенсивное испарение влаги происходит только с открытой верхней поверхности, тогда как через металлическое основание формы влагоотдача полностью исключена.

В сочетании с внутренним стоком влаги, обусловленным химическим связыванием воды при гидратации портландцементных минералов, это формирует сложную нелинейную задачу массопроводности, требующую специализированного математического аппарата для интеграции в среду «цифрового двойника».

4.3.1. Математическая формулировка краевой задачи для метода микропроцессов

В принятой нами методологии расчета нестационарных массообменных процессов при ТВО арболита, весь цикл сушки разделяется на последовательность микропроцессов $\Delta\tau_i$. На каждом i -м шаге изделие рассматривается как неограниченная пластина толщиной H с условно постоянными коэффициентами переноса. На рисунке 4.6 представлена расчетная схема к моделированию динамики влагопереноса. Верхняя граница ($x=0$) представляет собой открытую поверхность блока, контактирующую с сушильным агентом; через нее осуществляется массообмен с воздухом тепловой камеры, задаваемый плотностью потока влаги $q_m(\tau)$. Нижняя граница ($x=H$) - это зона контакта «арболит – стальная опалубка», которая выполняет роль абсолютного паронепроницаемого экрана (поток массы равен нулю). Внутри тела блока (заштрихованная область) распределен объемный сток влаги q_{vm} , отражающий необратимое химическое связывание свободной воды продуктами гидратации клинкерных минералов.

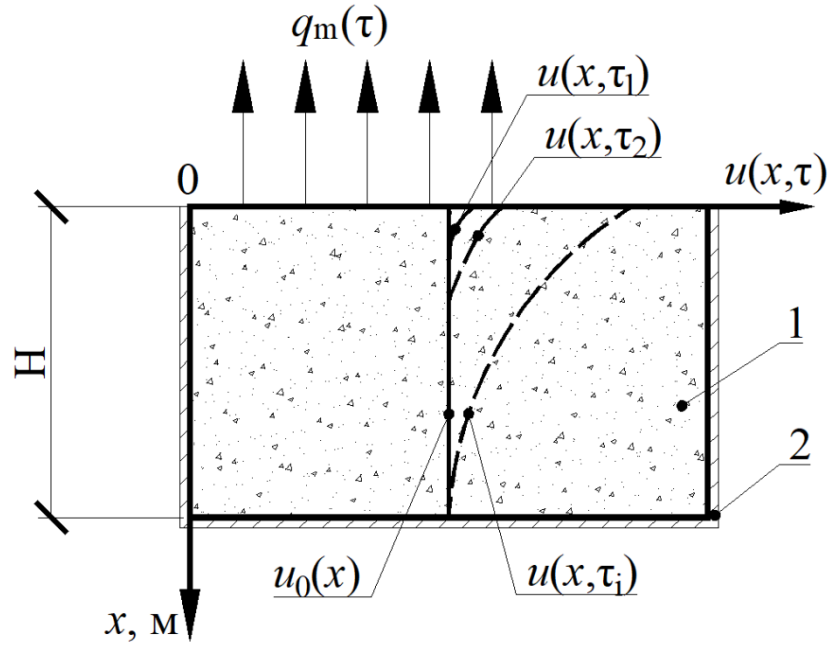


Рис. 4.6. Расчетная схема к моделированию динамики влагопереноса при ТВО изделий из арболита

1 - твердеющий арболитовый блок; 2 - стальная опалубка (паронепроницаемое основание);
 $q_m(\tau)$ - поток влаги на открытой поверхности ($x=0$)

Математически физические явления нестационарного массопереноса на i -м микропроцессе, при наличии потока испарения на открытой поверхности, паронепроницаемого барьера у дна и распределенного стока влаги вследствие гидратации, описываются следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 u(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_{vm}(x, \tau)}{\rho_{сух.}}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq H, \quad (4.3.1)$$

$$u(x, \tau)|_{\tau=0} = u(0, \tau) = u_0(x), \quad (4.3.2)$$

$$\left. \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=H} = 0, \quad (4.3.3)$$

$$\rho_{сух.} k \left. \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = -q_m. \quad (4.3.4)$$

Распределение (4.3.2) – начальное условие, описывающее математической функцией (например, параболой, полученной на предыдущем шаге) распределение влагосодержания $u(x, \tau)$ по толщине блока в начале i -го микропроцесса.

В соответствии с расчетной схемой (рис. 4.6), движение влаги спровоцировано на верхней плоскости потоком массы от сушильного агента, т.е. при решении линейного дифференциального уравнения (4.3.1) применяем граничное условие второго рода (4.3.3). Граничное условие на нижней плоскости (4.3.4) – условие непроницаемости (частный случай граничного условия второго рода с нулевым потоком), математически отражающее паронепроницаемость стальной опалубки. Именно это условие, как было установлено в натурном эксперименте (п. 3.2.2), приводит к накоплению влаги в придонной зоне и формированию опасных градиентов усадочных напряжений.

4.3.2. Решение краевой задачи нестационарного влагопереноса для i -го микропроцесса

Математические модели нестационарного массопереноса наибольшую практическую ценность и универсальность приобретают в безразмерных переменных, с критериальными характеристиками процесса, удобными для его качественного анализа и последующего программирования алгоритмов адаптивного управления [162]. Значения влагосодержания в системе уравнений (4.3.1)–(4.3.4) приведем в безразмерный вид, а к параметрам процесса применим критерии подобия:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = \frac{u(x, \tau) - u_p}{u_p}, \bar{x} = \frac{x}{H}, Fo_m = \frac{k\tau}{H^2}, Ki_m^* = \frac{q_m H}{k u_p \rho_{\text{сух}}}, Po_m^*(\bar{x}) = \frac{q_{\text{vm}}(x) \cdot H^2}{k \rho_{\text{сух}} u_p} \quad (4.3.5)$$

Полученная краевая задача нестационарного влагопереноса на i -м микропроцессе в безразмерных величинах:

$$\frac{\partial U(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2} + Po_m^*(\bar{x}), Fo_m > 0, 0 \leq \bar{x} \leq 1. \quad (4.3.6)$$

$$\text{Начальное условие:} \quad (4.3.7)$$

$$U(\bar{x}, 0) = U_0(\bar{x}).$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial U(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = 0 \quad (4.3.8)$$

$$-\frac{\partial U(0, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = Ki_m^* \quad (4.3.9)$$

Аналитическое решение краевой задачи диффузии влаги на i -м микропроцессе (4.3.6)–(4.3.9) позволит прогнозировать распределение безразмерного влагосодержания $U(\bar{x}, Fo_m)$ и оценивать риск возникновения критических усадочных градиентов.

Поиск в литературных источниках показал, что профессорами С.П. Рудобаштой и Э.М. Карташовым [113] получено фундаментальное решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в неограниченной пластине при наличии распределенного источника (стока) массы и граничных условиях второго рода. Полученное ими решение легко распространить на задачу диффузии влаги в арболите для i -го микропроцесса. Для этого в общем решении необходимо учесть специфику наших граничных условий: на правой границе (у опалубки) массообменный критерий Кирпичева принимается равным нулю ($Ki_{m,H}^* = 0$), что отражает непроницаемость стали, а на левой границе задается интенсивность потока влаги в воздушную среду. После выполнения необходимых преобразований, решение системы уравнений нестационарной теплопроводности на i -м микропроцессе принимает вид:

$$\begin{aligned} U(\bar{x}, Fo_m) = & -\frac{Ki_m^*}{2} \left[(1-\bar{x})^2 - \frac{1}{3} + Fo_m \right] + \int_0^1 U_0(\xi) d\xi + \\ & + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 U_0(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi + \\ & + \frac{2}{\pi^2} Ki_m^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\pi m \bar{x})}{m^2} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) - \\ & - \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\pi m \bar{x})}{m^2} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi + \\ & + \left(Fo_m + \frac{3\bar{x}^2 - 1}{6} \right) \int_0^1 Po_m^*(\xi) d\xi + \frac{1}{2} \int_0^1 Po_m^*(\xi) (1-\xi)^2 d\xi. \end{aligned} \quad (4.3.10)$$

Полученное выражение (4.3.10) является точным аналитическим решением линейного дифференциального уравнения нестационарного массопереноса на i -м микропроцессе с неравномерным начальным распределением влаги, наличием распределённого стока (гидратации) и асимметричными граничными условиями. Оно дает возможность прогнозировать распределение влаги как по координате, так и во времени, что является математическим ядром для алгоритмов цифрового регулирования режимов ТВО.

4.3.3. Численные эксперименты по цифровой модели кинетики и динамики нестационарного влагопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита

Проведем численные эксперименты по прогнозированию влажностных полей на i -м микропроцессе при различных значениях модифицированного массообменного критерия Кирпичева, который характеризует интенсивность испарения на открытой поверхности, и массообменного критерия Фурье, отражающего продолжительность процесса сушки.

Продвижение фронта высыхания в глубь арболитового блока по времени наглядно демонстрирует рисунок 4.7. Распределение влагосодержания изменяется от открытой поверхности ($x^- = 0$) к нижней границе ($x^- = 1$). На начальных стадиях (при малых F_{0m}) наблюдается резкий перепад влажности в пристеночной зоне. По мере увеличения F_{0m} фронт сушки продвигается вглубь, однако из-за наличия внутреннего стока влаги (гидратация) и непроницаемого дна, профиль влажности приобретает резко асимметричный характер. К концу цикла ТВО разница между сухой «коркой» и влажным ядром достигает максимума, что генерирует значительные усадочные напряжения в переходной зоне «древесная щепка – цементная матрица». Следует заметить, что в рамках метода микропроцессов критерии Фурье соседних шагов никогда не будут равны в силу нелинейной зависимости коэффициента массопроводности k от текущей влажности (см. рис. 3.11).

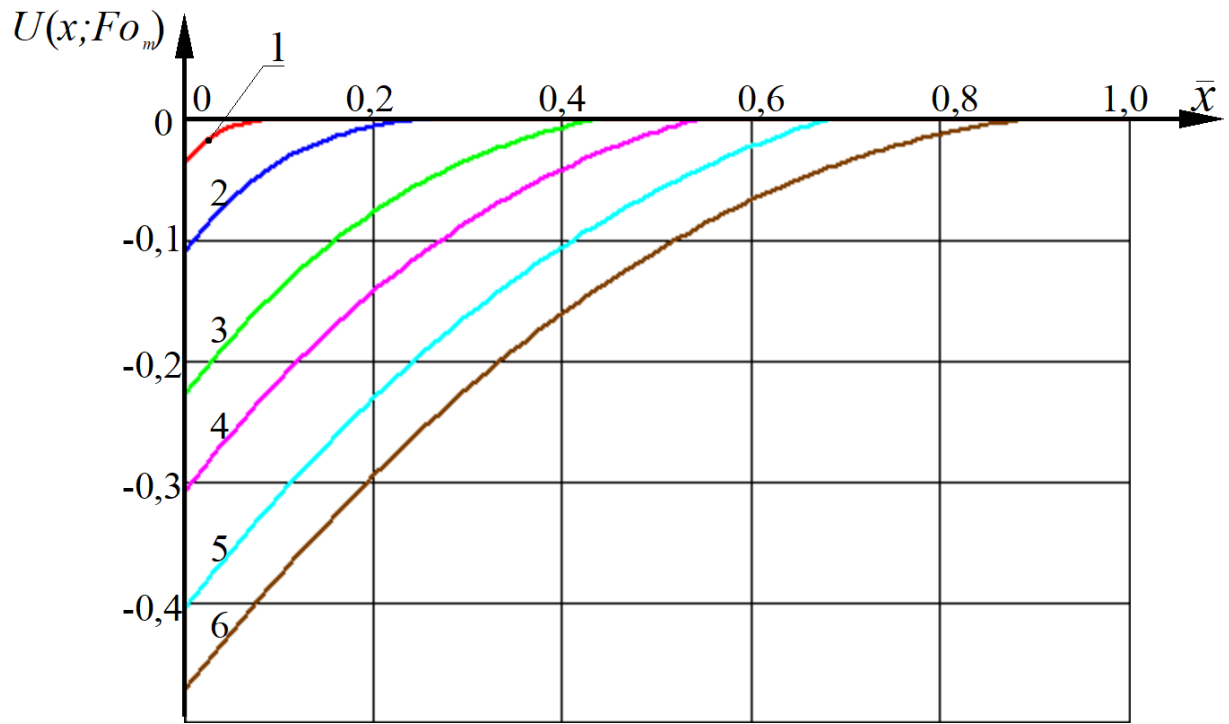


Рис. 4.7. Динамика безразмерных влагосодержаний по толщине блока арболита при ТВО в стальной опалубке при значениях массообменных критерия Фурье: $Fo_m=1$ - 0,001; 2 - 0,01; 3 - 0,05; 4 - 0,1; 5 - 0,2; 6 - 0,3; и модифицированного критерия Кирпичева $Ki^*_{m=1}$

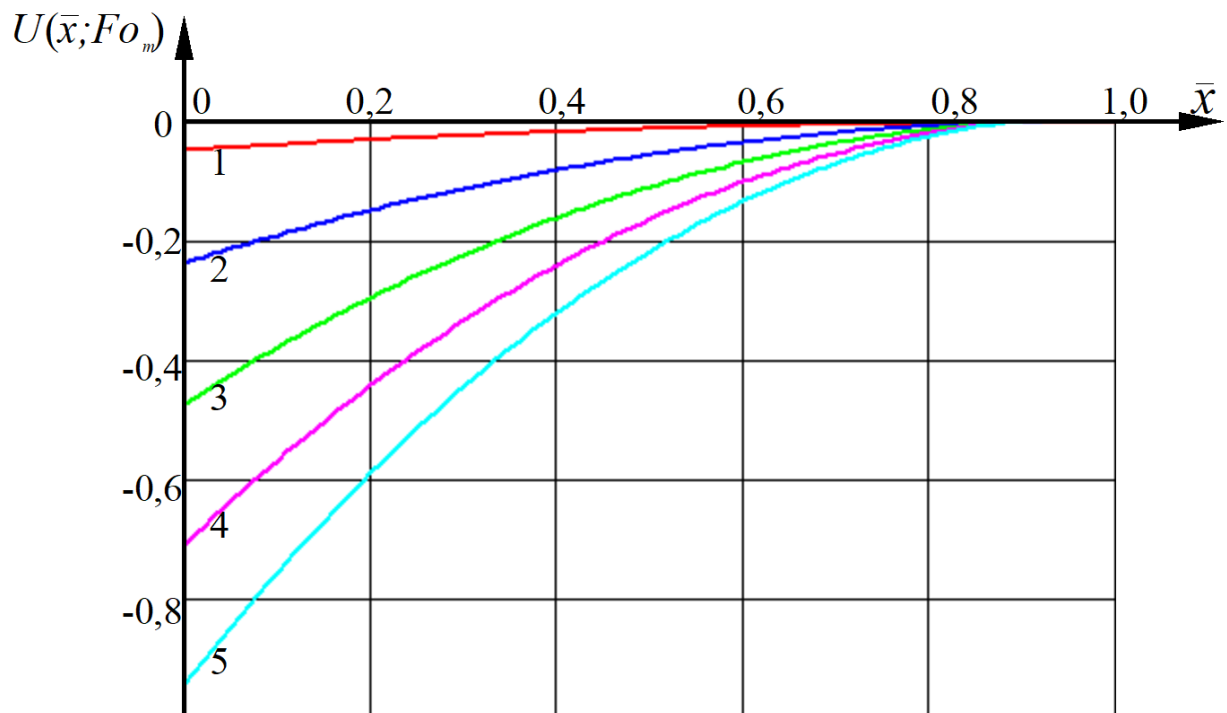


Рис. 4.8. Динамика безразмерных влагосодержаний по толщине блока арболита в стальной опалубке при значениях массообменных критерия Фурье: $Fo_m=0,3$ и модифицированных критериях Кирпичева $Ki^*_{m=1}$ - 0,1; 2 - 0,5; 3 - 1; 4 - 1,5; 5 - 2

Исследуем влияние интенсивности внешнего массообмена на распределения влаги. Для этого выполним расчеты профилей при фиксированном критерии Фурье $Fo_m = 0,3$ и различных значениях критерия Кирпичева Ki_m^* (рисунок 4.8). Увеличение Ki_m^* моделирует ужесточение режима ТВО (например, снижение влажности сушильного агента или увеличение скорости его циркуляции). Как видно из графика, рост Ki_m^* приводит к катастрофическому увеличению влажностного градиента. С позиций разработки адаптивных технологий это означает, что форсирование режима сушки на начальных этапах неизбежно ведет к разрыву капилляров в поверхностном слое, образованию микротрещин и последующему короблению блока при распалубке.

Особый интерес для оценки риска коробления изделий представляет кинетика изменения влагосодержания на изолированной поверхности (у стальной опалубки). Подставив в решение (4.3.10) координату $x^- = 1$, получим:

$$\begin{aligned}
 U(1, Fo_m) = & \frac{Ki_m^*(1-3Fo_m)}{6} + \frac{2}{\pi^2} Ki_m^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m^2} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) + \\
 & + \int_0^1 U_0(\xi) d\xi + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 U_0(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi - \\
 & - \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m^2} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi + \\
 & + \left(Fo_m + \frac{1}{3}\right) \int_0^1 Po_m^*(\xi) d\xi + \frac{1}{2} \int_0^1 Po_m^*(\xi) (1-\xi)^2 d\xi.
 \end{aligned} \tag{4.3.11}$$

Проведенные по выражению (4.3.11) расчеты кинетики безразмерного влагосодержания у дна опалубки приведены на рисунке 4.9. Из графика отчетливо видно, что при значениях массообменного критерия Фурье $Fo_m < 0,3$ на изолированной поверхности практически отсутствует изменение массосодержания влаги при любом разумном значении критерия Кирпичева $Ki_m^* \leq 2$. Это математически подтверждает феномен «парникового эффекта» стальной опалубки, зафиксированный нами в натурном эксперименте (п. 3.2.2): влага, мигрирующая из глубины блока к поверхности, не имеет пути для оттока вниз и аккумулируется в придонной зоне, поддерживая там влажность, близкую к начальной.

Определим выражение для кинетики среднего безразмерного влагосодержания, проинтегрировав основное решение (4.3.10):

$$U_{cp}(Fo_m) = -\frac{Ki_m^* Fo_m}{2} + \int_0^1 U_0(\xi) d\xi + \frac{l}{2} \int_0^1 Po_m^*(\xi) (1-\xi)^2 d\xi + Fo_m \int_0^1 Po_m^*(\xi) d\xi. \quad (4.3.12)$$

Кинетика изменения среднего по толщине безразмерного влагосодержания представлена на рисунке 4.9. Интегральная оценка обезвоживания блока показывает, что наличие внутреннего стока (гидратации) замедляет общее падение влажности по сравнению с инертными капиллярно-пористыми материалами. Часть свободной воды необратимо переходит в химически связанное состояние (кристаллогидраты), что снижает доступный объем влаги для испарения и требует корректировки расчетного времени ТВО.

Проведенные численные эксперименты подтверждают, что управление режимом ТВО арболита не может сводиться к поддержанию постоянных параметров сушильного агента. Из-за нелинейной зависимости коэффициента массопроводности от влажности, асимметрии граничных условий (стальная опалубка) и наличия внутреннего стока влаги, критические влажностные градиенты возникают в строго определенные временные периоды.

Аналитические зависимости (4.3.10)–(4.3.12), выраженные через безразмерные критерии Fo_m , Ki_m^* и Po_m^* , формируют математический базис для «цифрового двойника» процесса термовлажностной обработки. Алгоритм адаптивного управления, интегрированный в систему АСУ ТП камеры ТВО, может в реальном времени решать обратную задачу: на основе текущих показаний датчиков прогнозировать профиль влажности по формуле (4.3.10) и динамически корректировать параметр Ki_m^* (например, за счет изменения влажности воздуха или скорости вентиляции), удерживая градиент $gradU$ в безопасных пределах. Это гарантирует отсутствие усадочных дефектов, сохранение структурной однородности арболита и минимизацию энергозатрат на этапе термовлажностной обработки.

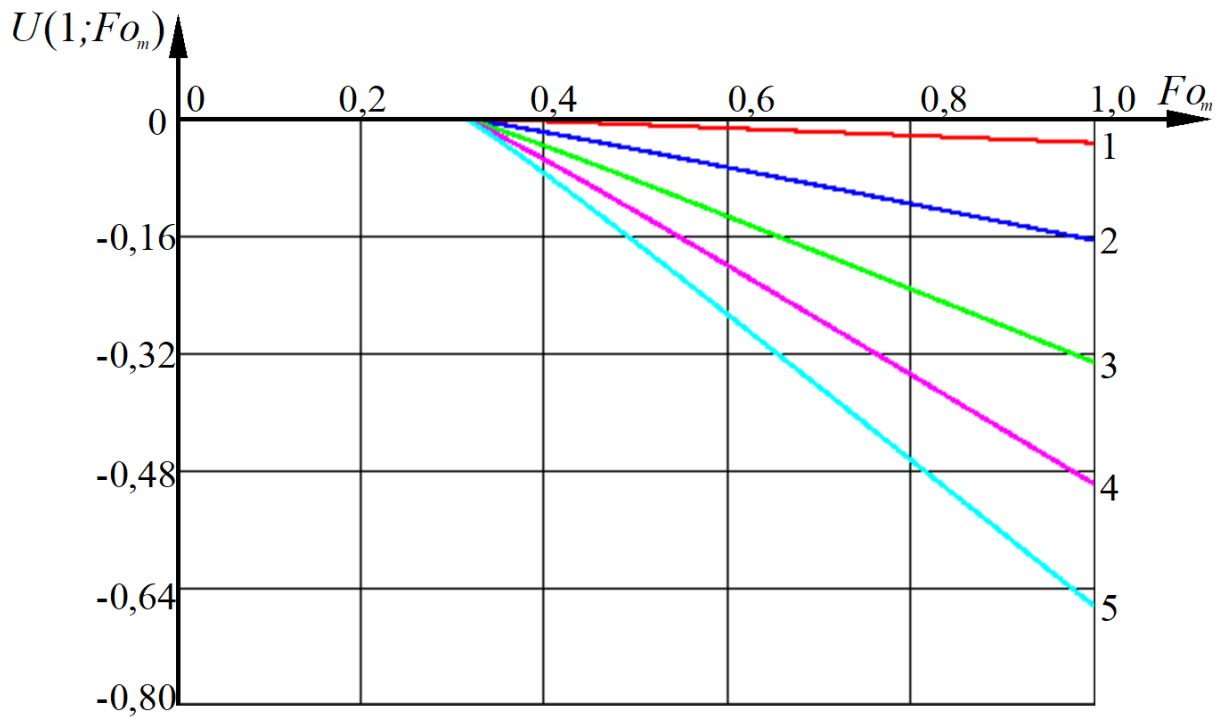


Рис.4.8. Кинетика безразмерных влагосодержаний на изолированной поверхности блока арболита в условиях ТВО в стальной опалубке при значениях модифицированного массообменного критерия Кирпичева: $Ki^*_m=1$ - 0,1; 2 - 0,5; 3 - 1; 4 - 1,5; 5 - 2

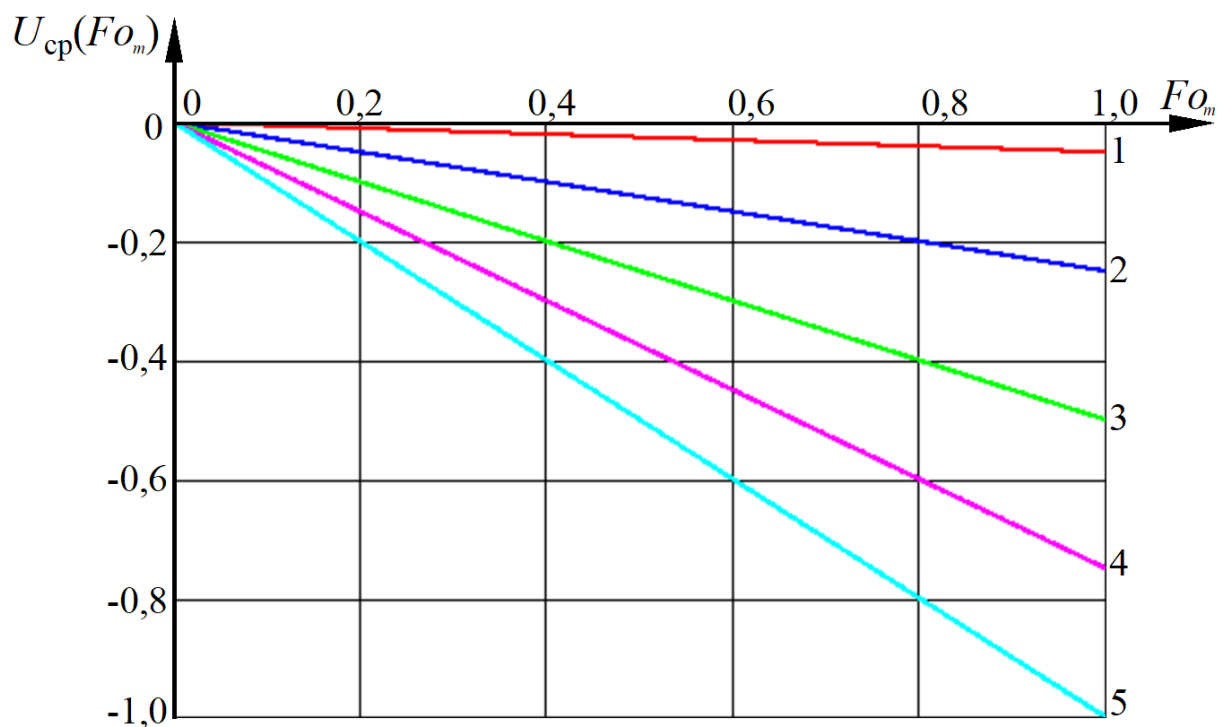


Рис.4.9. Кинетика безразмерных средних влагосодержаний по толщине блока арболита в условиях ТВО в стальной опалубке при значениях модифицированного массообменного критерия Кирпичева: $Ki^*_m=1$ - 0,1; 2 - 0,5; 3 - 1; 4 - 1,5; 5 - 2

4.4. Верификация цифровой модели нестационарного сопряженного тепло- и влагопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита

Верификация математической модели - это процедура подтверждения адекватности разработанного математического описания реальному физическому процессу путем сопоставления результатов численного решения с независимыми экспериментальными данными.

В рамках настоящего исследования верификация разработанной цифровой модели сопряженного тепло-массо-переноса выполнялась путем сравнения расчетных полей температур $t_{calc}(x, \tau)$ и влагосодержаний $u_{calc}(x, \tau)$, полученных аналитическим решением краевых задач (4.2.10) и (4.3.10) в сочетании с численным методом микропроцессов, с результатами натурального эксперимента, описанного в п. 3.2 (табл. 3.1, 3.2). Экспериментальные данные о пространственно-временной эволюции температуры и влажности в четырех характерных сечениях арболитового блока ($x=0; 0,1; 0,2; 0,3$ м) в течение 12 часов термовлажностной обработки служили эталоном для оценки достоверности модели. При этом коэффициенты температуропроводности $a(u)$ и массопроводности $k(u)$, определенные в п. 3.3 и 3.4, а также мощности внутренних источников q_{vt} и q_{vm} , использовались как входные параметры с корректировкой на каждом микропроцессе.

Весь 12-часовой цикл термовлажностной обработки был разбит на 24 последовательных микропроцесса продолжительностью $\Delta\tau=30$ мин каждый. В пределах каждого i -го микропроцесса коэффициенты температуропроводности, массопроводности, теплопроводности, удельной теплоемкости, плотности и мощности внутренних источников принимались постоянными, равными их средним значениям, рассчитанным по экспериментальным аппроксимациям (3.7)–(3.13) для текущего распределения влажности. По завершении каждого 30-минутного шага выполнялось:

1. Цифровое решение линеаризованных краевых задач (4.2.6)–(4.2.9) и (4.3.6)–(4.3.9) по формулам (4.2.10) и (4.3.10);
2. Обновление полей температур $t(x, \tau_i)$ и влагосодержаний $u(x, \tau_i)$;

3. Ступенчатый пересчет всех феноменологических коэффициентов в соответствии с новыми значениями $u(x, \tau_i)$;
4. Переход к следующему $(i+1)$ -му микропроцессу.

Такая численно-аналитическая схема обеспечивает высокую вычислительную устойчивость: при шаге 30 минут погрешность накопления на каждом микропроцессе не превышает 0,1 % от абсолютного значения температуры и 0,05 % от абсолютного значения влагосодержания, а суммарная погрешность за весь цикл сушки остается в пределах инструментальной погрешности измерений ($\pm 1,5$ °С для термопар ТХК и $\pm 3-4$ % для игольчатого влагомера AQ-M20SO1).

Для количественной оценки адекватности модели применялся критерий согласия Пирсона (χ^2), рассчитываемый по формуле:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^N \frac{(X_{\text{exp},j} - X_{\text{calc},j})^2}{X_{\text{calc},j}}. \quad (4.4.1)$$

где $X_{\text{exp},j}$ и $X_{\text{calc},j}$ - экспериментальное и расчетное значения верифицируемого параметра (температуры или влагосодержания) в j -й контрольной точке; N - общее число точек сопоставления.

Результаты верификации модели теплопереноса сведены в таблицу 4.1. Результаты верификации модели влагопереноса сведены в таблицу 4.2.

На рисунках 4.10 и 4.11 представлено сопоставление расчетных полей температуры и влагосодержания, полученных методом микропроцессов с шагом $\Delta\tau=30$ мин, с независимыми экспериментальными данными, зарегистрированными в натурном эксперименте (см. п. 3.2). Сплошные линии на графиках отражают экспериментальные измерения в четырех характерных сечениях по толщине блока ($x=0; 0,1; 0,2; 0,3$ м), штриховые - результаты численно-аналитического расчета по разработанным аналитическим решениям (4.2.10) и (4.3.10). Визуальное сопоставление кривых демонстрирует их высокую взаимную согласованность на всех стадиях 12-часового цикла термовлажностной обработки.

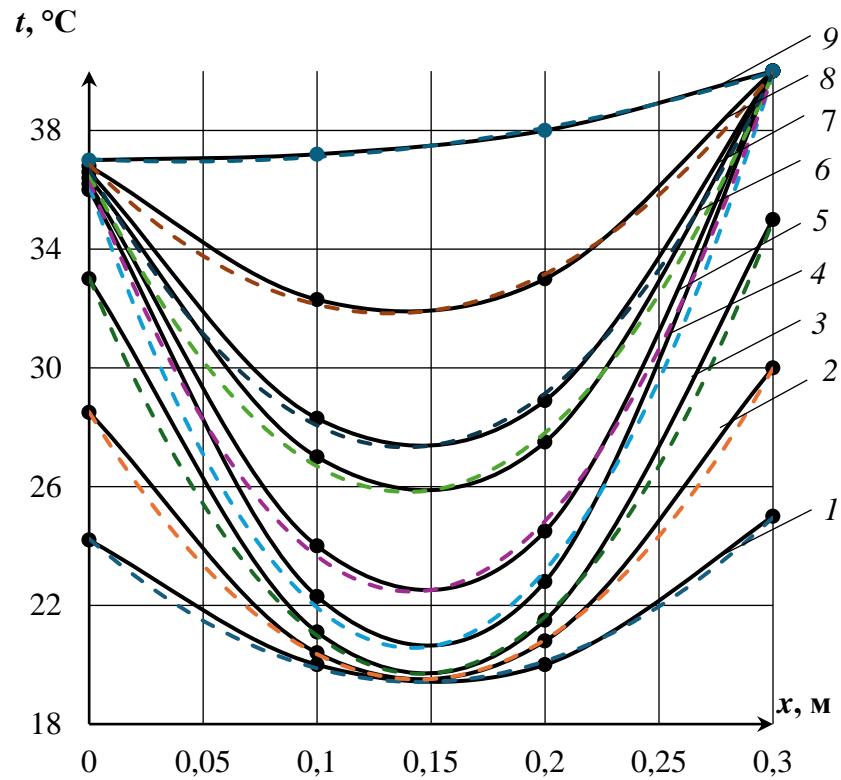


Рис. 4.10. Верификация цифровой модели теплопереноса по динамике полей температур при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке

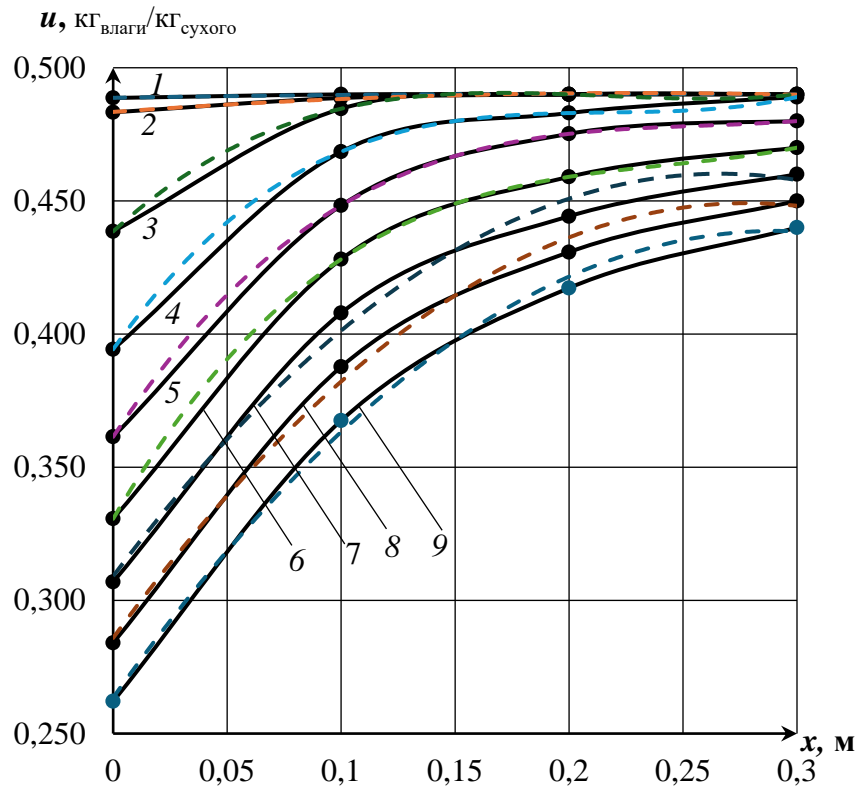


Рис. 4.11. Верификация цифровой модели влагопереноса по динамике полей влажности при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке

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.
 Линии – экспериментальные данные, штрихи – расчетные по предлагаемой модели

Таблица 4.1. – Результаты верификации цифровой модели нестационарного теплопереноса при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке

Время ТВО, ч	Координата, м	Эксперимент $t_{\text{exp}}, ^\circ\text{C}$	Расчет $t_{\text{calc}}, ^\circ\text{C}$	Абсолютное отклонение $\Delta t, ^\circ\text{C}$	Относительное отклонение, %	Вклад в χ^2
0,5	0	24,2	24,1	0,1	0,4	0,004
	0,1	20,0	20,1	0,1	0,5	0,005
	0,2	20,0	20,2	0,2	1,0	0,020
	0,3	25,0	24,8	0,2	0,8	0,016
1,0	0	28,5	28,3	0,2	0,7	0,014
	0,1	20,4	20,6	0,2	1,0	0,020
	0,2	20,8	21,0	0,2	1,0	0,019
	0,3	30,0	29,8	0,2	0,7	0,013
1,5	0	33,0	32,8	0,2	0,6	0,012
	0,1	21,1	21,3	0,2	0,9	0,019
	0,2	21,5	21,7	0,2	0,9	0,018
	0,3	35,0	34,9	0,1	0,3	0,003
2,0	0	36,0	35,7	0,3	0,8	0,025
	0,1	22,3	22,5	0,2	0,9	0,018
	0,2	22,8	23,0	0,2	0,9	0,017
	0,3	40,0	39,8	0,2	0,5	0,010
3,0	0	36,2	36,0	0,2	0,6	0,011
	0,1	24,0	24,2	0,2	0,8	0,017
	0,2	24,5	24,7	0,2	0,8	0,016
	0,3	40,0	39,9	0,1	0,3	0,003
5,0	0	36,4	36,2	0,2	0,5	0,011
	0,1	27,0	27,2	0,2	0,7	0,015
	0,2	27,5	27,7	0,2	0,7	0,014
	0,3	40,0	39,9	0,1	0,3	0,003
7,0	0	36,6	36,4	0,2	0,5	0,011
	0,1	28,3	28,5	0,2	0,7	0,014
	0,2	28,9	29,1	0,2	0,7	0,014
	0,3	40,0	39,9	0,1	0,3	0,003
9,0	0	36,8	36,6	0,2	0,5	0,011
	0,1	32,3	32,5	0,2	0,6	0,012
	0,2	33,0	33,2	0,2	0,6	0,012
	0,3	40,0	39,9	0,1	0,3	0,003
12,0	0	37,0	36,8	0,2	0,5	0,011
	0,1	37,2	37,4	0,2	0,5	0,011
	0,2	38,0	38,2	0,2	0,5	0,011
	0,3	40,0	39,9	0,1	0,3	0,003
Сумма						0,474

Таблица 4.2. – Результаты верификации цифровой модели нестационарного влагопереноса при ТВО арболита-сырца в стальной опалубке

Время ТВО, ч	Координата м	Эксперимент m_{exp} , кг/кг	Расчет m_{calc} , кг/кг	Абсолютное отклонение Δu , кг/кг	Относительное отклонение, %	Вклад χ^2
0,5	0	0,489	0,488	0,001	0,2	0,002
	0,1	0,490	0,490	0,000	0,0	0,000
	0,2	0,490	0,490	0,000	0,0	0,000
	0,3	0,490	0,490	0,000	0,0	0,000
1,0	0	0,483	0,482	0,001	0,2	0,002
	0,1	0,489	0,489	0,000	0,0	0,000
	0,2	0,490	0,490	0,000	0,0	0,000
	0,3	0,490	0,490	0,000	0,0	0,000
1,5	0	0,439	0,437	0,002	0,5	0,010
	0,1	0,485	0,486	0,001	0,2	0,002
	0,2	0,490	0,490	0,000	0,0	0,000
	0,3	0,490	0,490	0,000	0,0	0,000
2,0	0	0,394	0,392	0,002	0,5	0,013
	0,1	0,468	0,469	0,001	0,2	0,002
	0,2	0,483	0,484	0,001	0,2	0,002
	0,3	0,490	0,490	0,000	0,0	0,000
3,0	0	0,361	0,359	0,002	0,6	0,011
	0,1	0,448	0,449	0,001	0,2	0,002
	0,2	0,475	0,476	0,001	0,2	0,002
	0,3	0,480	0,480	0,000	0,0	0,000
5,0	0	0,331	0,329	0,002	0,6	0,012
	0,1	0,428	0,429	0,001	0,2	0,002
	0,2	0,459	0,460	0,001	0,2	0,002
	0,3	0,470	0,470	0,000	0,0	0,000
7,0	0	0,307	0,305	0,002	0,7	0,013
	0,1	0,408	0,409	0,001	0,2	0,002
	0,2	0,444	0,445	0,001	0,2	0,002
	0,3	0,460	0,460	0,000	0,0	0,000
9,0	0	0,284	0,282	0,002	0,7	0,014
	0,1	0,388	0,389	0,001	0,3	0,003
	0,2	0,431	0,432	0,001	0,2	0,002
	0,3	0,450	0,450	0,000	0,0	0,000
12,0	0	0,262	0,260	0,002	0,8	0,015
	0,1	0,368	0,369	0,001	0,3	0,003
	0,2	0,417	0,418	0,001	0,2	0,002
	0,3	0,440	0,440	0,000	0,0	0,000
Сумма						0,118

Расчетное значение критерия для теплопереноса $\chi_t^2=0,474$ и для влагопереноса $\chi_m^2=0,118$ при числе степеней свободы $k=N-1=35$ и уровне значимости $\alpha=0,05$ существенно ниже табличного значения $\chi_{crit}^2=48,6$. Это означает, что нулевая гипотеза о согласованности расчетной модели с экспериментальными данными принимается с вероятностью $p>0,99$ для обоих процессов переноса.

Максимальное абсолютное отклонение расчетных значений температуры от экспериментальных не превышает $0,3$ °С (что составляет менее $0,8$ % от характерного температурного диапазона $20\dots40$ °С), а среднее относительное отклонение по всем 36 контрольным точкам составляет $0,65$ %. Для влагосодержания максимальное абсолютное отклонение не превышает $0,002$ кг/кг (менее $0,8$ % от характерного диапазона $0,26\dots0,49$ кг/кг), а среднее относительное отклонение составляет $0,28$ %.

Высокая степень сходимости подтверждает корректность принятых допущений и обоснованность численно-аналитического аппарата. Модель адекватно воспроизводит ключевые физические эффекты, выявленные в Главе 3:

1. Конвективный теплообмен и эндотермическое охлаждение поверхности. На открытой границе ($x = 0$) расчетная температура стабилизируется на уровне $36,6\dots36,8$ °С, что на $3,2\dots3,4$ °С ниже температуры воздуха в камере ТВО (40 °С). Данный перепад подтверждает корректный учет моделью конвективной тепло- и массоотдачи на открытой поверхности за счет дискретного пересчета потоков тепла и массы на каждом 30-минутном микропроцессе.

2. Экзотермический разогрев внутренних слоев. В придонной части изделия ($x = 0,3$ м) температура к 2-му часу достигает $39,9$ °С. Ее стабилизация обусловлена совместным действием кондуктивного теплопритока через металлическое основание формы и тепловыделения при гидратации минералов портландцемента. При этом объемная мощность теплового источника q_{vt} дискретно снижается с $1,92$ до $1,44$ кДж/(м³·с) по мере прохождения 24 расчетных микропроцессов.

3. Учет нелинейности коэффициентов переноса. Пошаговый пересчет коэффициентов температуропроводности $a(u)$ и массопроводности $k(u)$ на каждом 30-минутном интервале (в соответствии с зависимостями (3.7)–(3.8) и (3.13))

позволяет адекватно описать скорость прогрева центральной зоны изделия при ТВО ($x = 0,1 \dots 0,2$ м).

4. Асимметрия влажностного поля. Расчетное влагосодержание у дна ($x=0,3$ м) к 12-му часу составляет 0,440 кг/кг (снижение всего на 10 %), тогда как на открытой поверхности - 0,260 кг/кг (снижение на 47 %). Формирующийся градиент влажности до 0,180 кг/кг на 300 мм толщины генерирует значительные усадочные напряжения, что согласуется с экспериментальными данными о риске трещинообразования.

5. Внутренний сток влаги при гидратации. Расчетное снижение влагосодержания в объеме блока происходит медленнее, чем в инертных капиллярно-пористых материалах, что объясняется необратимым химическим связыванием воды продуктами гидратации клинкерных минералов (мощность q_{vm} ступенчато снижается с $9,50 \cdot 10^{-7}$ до $6,19 \cdot 10^{-7}$ кг/(м³·с)).

Таким образом, верификация подтверждает, что разработанная математическая модель сопряженного тепломассопереноса, реализованная методом микропроцессов и учитывающая нелинейную зависимость коэффициентов переноса от влажности, эндо-/экзотермические эффекты гидратации и испарения, а также асимметричные граничные условия, обладает достаточной точностью для прогнозирования пространственно-временных полей температуры и влажности в арболитовых изделиях при термовлажностной обработке.

Суммарный критерий Пирсона для модели сопряженного тепломассопереноса составляет $\chi^2_{total} = 0,474 + 0,118 = 0,592 \ll \chi^2_{crit} = 48,6$, что подтверждает адекватность модели с вероятностью $p > 0,99$ и создает надежную алгоритмическую базу для разработки адаптивных режимов ТВО и построения «цифрового двойника» технологического процесса, что соответствует заявленной цели диссертационного исследования.

4.5. Моделирование нестационарного влагопереноса при сушке арболитовых блоков на различных технологических основаниях после распалубки

После набора распалубочной прочности (обычно через 12...24 ч) блоки извлекают из стальных форм и переносят на технологические настилы для дальнейшей сушки и набора проектной прочности. На этом этапе существенно меняются граничные условия массообмена. Если в форме отвод влаги происходил только через одну открытую поверхность (см. п. 4.3), то после распалубки появляется возможность двустороннего испарения, зависящая от типа применяемого основания. Выбор схемы сушки определяет не только ее продолжительность, но и равномерность влажностного поля по толщине изделия, что напрямую влияет на вероятность усадочного трещинообразования и коробления блоков.

Исходя из производственной практики [80], рассмотрим три основные схемы организации сушки арболита после распалубки:

1. Размещение на проницаемом основании. Обеспечивает двусторонний отвод влаги: с верхней поверхности — за счет конвективного массообмена $q_{m.к}(\tau)$, с нижней - путем диффузии в подстилающий слой $q_{m.м}(\tau)$. Схема применяется преимущественно в регионах с жарким климатом, где экономически целесообразна естественная сушка под открытым небом (рис. 4.12).

2. Размещение на непроницаемом основании. Предполагает односторонний массообмен только через верхнюю поверхность блока. На границе «арболит–основание» реализуется условие герметичности (нулевого потока влаги $q_{m.м}(\tau)=0$). Это обуславливает формирование асимметричного профиля влагосодержания с максимальной концентрацией остаточной влаги у нижней грани изделия (рис. 4.13).

3. Размещение на частично проницаемом основании. Промежуточный вариант, при котором нижняя поверхность контактирует с перфорированными поддонами или решетчатыми настилами. Массообмен на нижней границе описывается граничным условием третьего рода, однако коэффициент массоотдачи здесь существенно ниже, чем на верхней открытой поверхности (рис. 4.14).

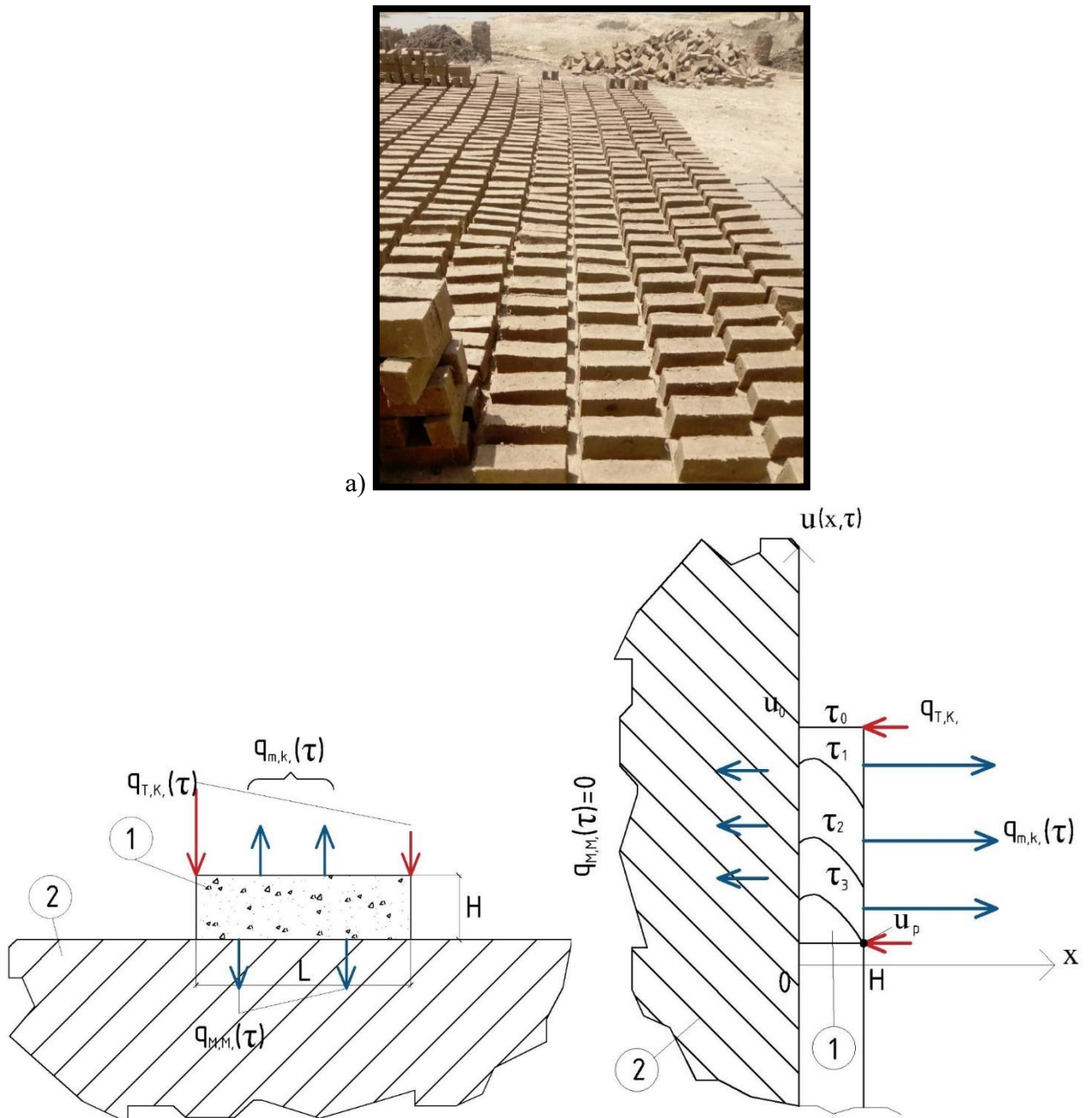


Рис. 4.12. Вариант размещения с контактом вида «блок-сплошной проницаемый настил»
 а) пример сушки рассматриваемым методом; б) варианты размещения блоков в зоне теплообмена. 1-блок-сырец; 2- настил; u_0 – начальная влажность сырья; u_p – равновесная влажность сырья

Во всех перечисленных схемах процессы структурообразования цементного камня сопровождаются термической обработкой, реализуемой двумя принципиально различными способами. При естественной сушке теплоподвод к поверхности блока осуществляется комбинированным механизмом: конвективным теплообменом с окружающим воздухом и лучистым теплообменом за счёт поглощения солнечной радиации. Интенсивность теплопередачи в этом

случае определяется метеорологическими параметрами (температура, относительная влажность, скорость ветра, инсоляция) и варьируется в течение суток и в зависимости от сезона.

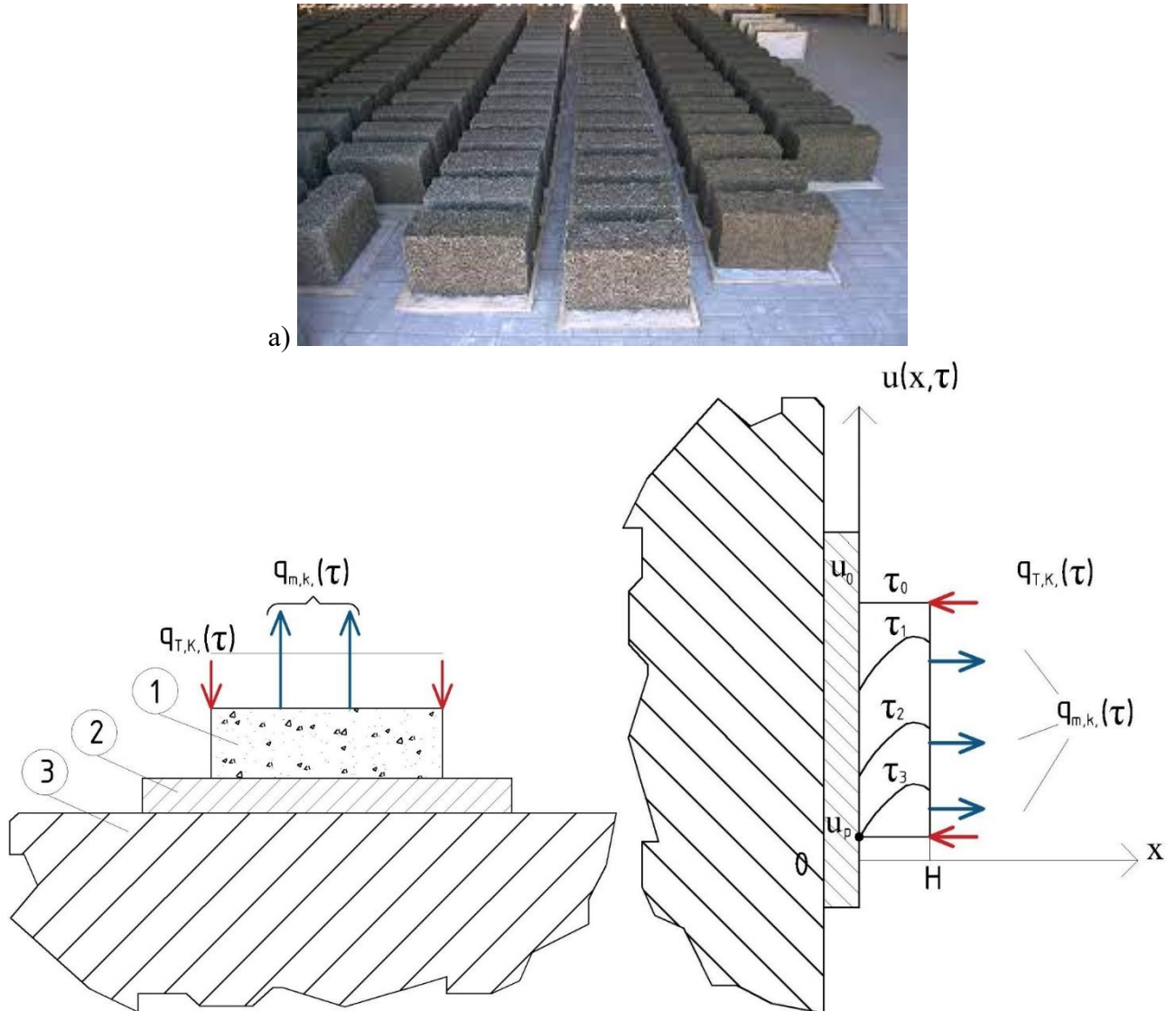


Рис. 4.13. Вариант размещения с контактом вида «сырец-сплошной непроницаемый настил»
 а) пример сушки рассматриваемым методом; б) варианты размещения блоков в зоне теплообмена. 1-блок-сырец; 2- настил; 3- основание u_0 – начальная влажность сырьца; u_p – равновесная влажность сырьца

Альтернативный подход предполагает размещение блоков-сырца на решётчатых поддонах в так называемых «садках» с последующим перемещением в сушильные камеры тоннельного или камерного типа. В условиях искусственной тепловой обработки теплоноситель (воздух или смесь воздуха с продуктами сгорания) предварительно нагревается до заданной температуры (обычно 40–60

°С) и подаётся принудительно для обеспечения интенсивного конвективного обдува поверхности изделий. Такая организация процесса позволяет стабилизировать параметры среды и минимизировать влияние внешних климатических факторов.

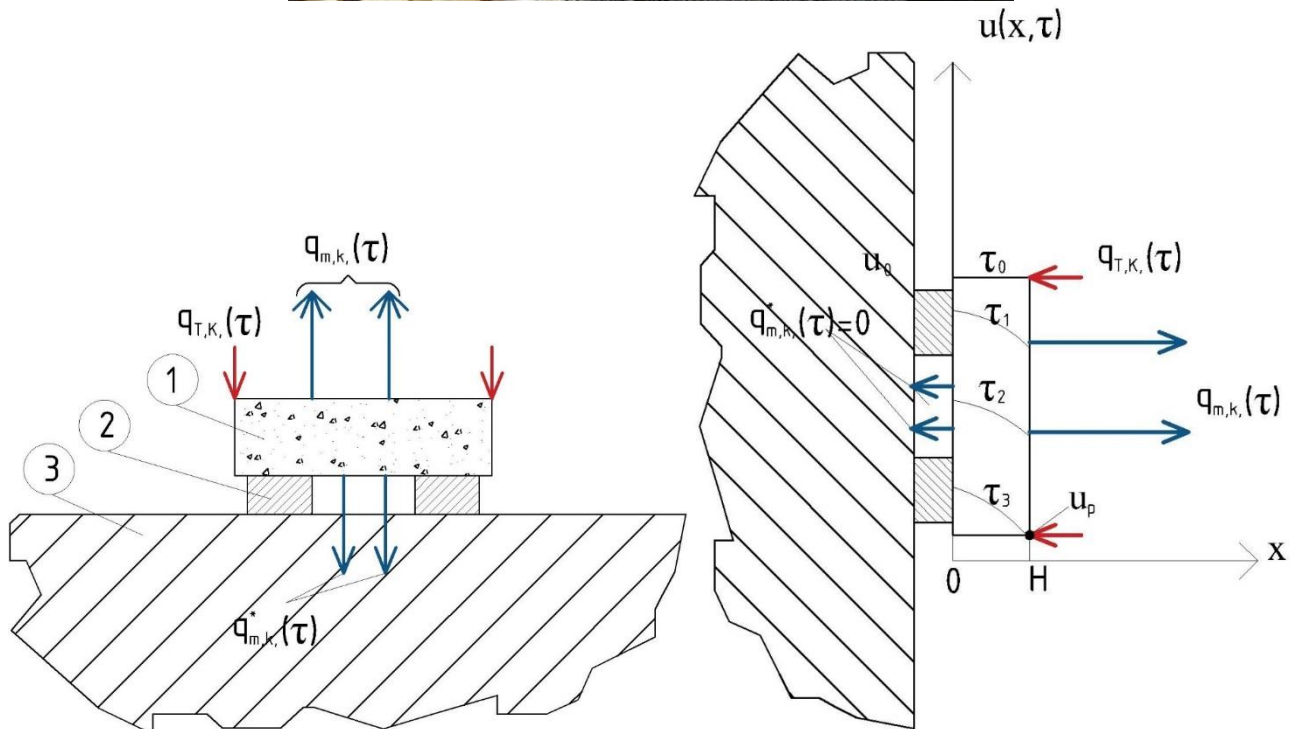


Рис. 4.14. Вариант размещения с контактом вида «сырец- несплошной настил»
 а) пример сушки рассматриваемым методом; б) варианты размещения блоков в зоне теплообмена. 1-блок-сырец; 2- настил; 3- основание u_0 – начальная влажность сырья; u_p – равновесная влажность сырья

Физическая картина распределения потоков теплоты и влаги в объёме арболитового блока при различных схемах сушки представлена на рис. 4.12-4.14. В случае проницаемого основания (рис. 4.12б) наблюдается формирование двунаправленного градиента влагосодержания: влага мигрирует как к верхней поверхности (для последующего испарения в окружающую среду), так и к нижней

границе (посредством диффузии влаги в основание). При непроницаемом основании (рис. 4.13б) градиент влагосодержания ориентирован исключительно в направлении верхней поверхности, что приводит к более длительному периоду достижения равновесной влажности и повышенному риску образования усадочных дефектов в придонной зоне изделия. Для частично проницаемого основания (рис. 4.14б) характерно асимметричное распределение влаги с преобладанием потока в направлении верхней поверхности.

Каждая из рассмотренных технологических схем обладает специфическими особенностями динамики и кинетики сушки, температурного режима и формирования микроструктуры цементного камня. Наиболее технологически простой с точки зрения организации производственного процесса и минимизации капитальных затрат является схема с проницаемым основанием. Однако её эффективность напрямую зависит от климатических условий региона и требует значительных производственных площадей. При этом подвод теплоты $q_{T.k.u}$ к поверхности блока в дневное время осуществляется совместно двумя механизмами: конвективным теплообменом $q_{T.k}$ с атмосферным воздухом и теплообменом излучения $q_{T.u}$ за счёт поглощения солнечной энергии, интенсивность которого определяется альбедо поверхности изделия и углом падения солнечных лучей:

$$q_{T.k.u}(\tau) = q_{T.k}(\tau) + q_{T.u}(\tau) = \alpha_k [T_c(\tau) - T_n(\tau)] + \sigma_{1-2} \left\{ \left[\frac{T_c(\tau)}{100} \right]^4 - \left[\frac{T_n(\tau)}{100} \right]^4 \right\}, \quad (4.5.1)$$

где α_k - коэффициент теплоотдачи Вт/(м² К); σ_{1-2} - коэффициент взаимного облучения Вт/(м² К⁴); T_c и T_n - абсолютная температура среды и поверхности блока, К; τ - время, с.

4.5.1. Математическая формулировка краевой задачи для метода микропроцессов

Математическое моделирование процессов полей влажности при ТВО по схемам на рисунках 4.12-4.14 базируется на нелинейном дифференциальном уравнении А.В. Лыкова для нестационарного массопереноса в капиллярно-пористых телах[82]:

$$\frac{\partial u(x,\tau)}{\partial \tau} = \text{div}[k(x,\tau)\text{grad } u(x,\tau)], \quad (4.5.2)$$

где $u(x,\tau)$ – изменение влажности по толщине блока и во времени, кг влаги/кг сухого; $k(x,\tau)$ - коэффициент массопроводности (коэффициент диффузии влаги в твёрдом теле), $\text{м}^2/\text{с}$.

В принятой методологии расчета нестационарных процессов массопереноса после распалубки весь цикл сушки разбивается на последовательность микропроцессов $\Delta\tau$. На каждом i -м шаге блок рассматривается как неограниченная пластина толщиной H с условно постоянными коэффициентами переноса. В отличие от постановки задачи в п. 4.3.1, где нижняя граница была паронепроницаемой (стальная опалубка), после распалубки на обеих поверхностях блока реализуются граничные условия второго рода с различными плотностями потоков влаги.

Расчетная схема к моделированию динамики влагопереноса при сушке блока на различных технологических основаниях представлена на рисунках 4.12-4.14. Верхняя граница ($x=0$) контактирует с сушильным агентом, через нее осуществляется массообмен с интенсивностью, характеризуемой плотностью потока влаги $q_{m,v}(\tau)$. Нижняя граница ($x=H$) контактирует с технологическим основанием, через которое также возможен отвод влаги с плотностью потока $q_{m,n}(\tau)$, зависящей от проницаемости настила.

При описанных выше допущениях, дифференциальное уравнение нестационарной массопроводности (диффузии влаги) по толщине блока-сырца принимает линейный вид:

$$\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 u(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq H. \quad (4.5.3)$$

Начальное распределение влажности по толщине блока-сырца на i -м микропроцессе принимаем неравномерным, полученное из результатов расчета ($i-1$)-го микропроцесса, описываемое какой-либо математической функцией:

$$u(x, \tau)|_{\tau=0} = u_0(x). \quad (4.5.4)$$

В частном случае равномерного начального условия, оно запишется:

$$u(x, \tau)|_{\tau=0} = u_0. \quad (4.5.5)$$

Корректная постановка граничных условий замыкает систему дифференциальных уравнений и описывает характер взаимодействия моделируемой системы с окружающей средой. На верхней поверхности блока ($x=H$) граничное условие характеризует плотность потока влаги, поступающего из внутренних слоев к границе раздела фаз:

$$-k \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=H} = q_{m.k}(\tau). \quad (4.5.6)$$

На нижней границе ($x=0$) поток влаги, подходящий из толщи изделия, уравнивается ее фильтрационным переносом в основание:

$$-k \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{m.\phi}(\tau). \quad (4.5.7)$$

Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать нестационарные поля влажности, а также оценивать вероятность возникновения дефектов (трещин, коробления) на основе анализа градиентов усадочных деформаций и внутренних напряжений. Это создает необходимую теоретическую базу для адаптивного управления технологическим процессом производства строительных изделий из арболита.

4.5.2. Аналитическое решение задачи краевой задачи

Анализ научной литературы показал, что профессорами С.П. Рудобаштой и Э.М. Карташовым [192] получено аналитическое решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для неограниченной пластины при неравномерном начальном распределении концентраций переносимого компонента и граничных условиях второго рода на обеих поверхностях, которые представлены в виде функции, зависящей от времени. Данное решение может быть адаптировано к задаче моделирования влагопереноса в среде с переменными потенциалами в арболитовом блоке-сырце на i -м микропроцессе (уравнения (4.5.2)–(4.5.7)):

$$\begin{aligned}
 u(x,\tau) = & \frac{1}{H} \int_0^H u_0(x) dx - \frac{1}{H} \int_0^\tau [q_{mk}(\tau^*) - q_{m\phi}(\tau^*)] d\tau^* + \\
 & + \frac{2}{H} \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(\pi m \frac{x}{H}\right) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^H u_0\left(\frac{x^*}{H}\right) \cos\left(\pi m \frac{x^*}{H}\right) d\frac{x^*}{H} - \\
 & - \frac{2}{H} \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(\pi m \frac{x}{H}\right) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^\tau [q_{mk}(\tau^*) - (-1)^m q_{m\phi}(\tau^*)] d\tau^*.
 \end{aligned} \quad (4.5.8)$$

Как отмечено в исследованиях в п.4.2 и 4.3, применение безразмерных переменных и критериального анализа при математическом моделировании процессов тепло-массо-переноса в капиллярно-пористых материалах обеспечивает универсальность решений и позволяет выявить физическую сущность явлений независимо от конкретных геометрических размеров и свойств материала. Введём следующие безразмерные переменные и критерии подобия Фурье и Кирпичева:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = \frac{u(x,\tau) - u_p}{u_p}, \quad \bar{x} = \frac{x}{H}, \quad U_0(\bar{x}, Fo_m) = \frac{u_0(x,\tau) - u_p}{u_p}, \quad (4.5.9)$$

$$Fo_m = \frac{k\tau}{H^2}, \quad Ki_{mk}(Fo_m^*) = \frac{q_{mk}(\tau^*) H}{k u_p}, \quad Ki_{m\phi}(Fo_m^*) = \frac{q_{m\phi}(\tau^*) H}{k u_p}. \quad (4.5.10)$$

Подставляя зависимости (4.5.9) и (4.5.10) в общее решение (4.5.8), получаем аналитическое выражение для расчета нестационарных полей при сушке арболитовых блоков на различных технологических основаниях после распалубки:

$$\begin{aligned}
U(\bar{x}, Fo_m) = & \int_0^1 U_0(\bar{x}) d\bar{x} - \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*) + \\
& + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 U_0(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi - \\
& - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - (-1)^m Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*).
\end{aligned}
\tag{4.5.11}$$

Данное решение описывает безразмерное распределение влажности $U(\bar{x}, Fo_m)$ по толщине изделия с учетом нестационарности граничных потоков. Оно получено для линейного уравнения массопроводности (4.5.2) при произвольном начальном распределении влаги (4.5.3) и граничных условиях второго рода (4.5.5)–(4.5.6), соответствующих схемам сушки на проницаемом или частично проницаемом основании. При моделировании сушки на непроницаемом настиле $Ki_{m\phi} = 0$. Данное решение позволяет прогнозировать пространственно-временную эволюцию влажностного поля в объёме арболитового блока с учётом градиента влагосодержания на поверхностях, обусловленного испарением свободной воды. Рассмотрим некоторые наиболее распространенные частные случаи, необходимые для моделирования технологического процесса сушки.

I. Равномерное начальное распределение концентраций, в виде:

$$U_0(\bar{x}) = \frac{u_0(x, 0) - u_p}{u_p} \Big|_{\tau=0} = U_0 = \frac{u_0 - u_p}{u_p}.
\tag{4.5.12}$$

В таком случае динамика влажности по толщине блока будет изменяться по следующему закону:

$$\begin{aligned}
U(\bar{x}, Fo_m) = & U_0 - \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*) - \\
& - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - (-1)^m Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*).
\end{aligned}
\tag{4.5.13}$$

II. Линейная зависимость критериев Кирпичева во времени процесса в виде:

$$Ki_{mk}(Fo_m) = A_{mk}Fo_m + B_{mk}; \quad (4.5.14)$$

$$Ki_{m\phi}(Fo_m) = A_{m\phi}Fo_m + B_{m\phi}. \quad (4.5.15)$$

Подставив предлагаемые зависимости массообменного критерия Кирпичева на поверхностях блока (14) и (15) от числа Фурье в решение при равномерном начальном распределении влагосодержаний (13), после математических преобразований получаем:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = U_0 - \left\{ \frac{A_{mk} - A_{m\phi}}{2} Fo_m^2 + (B_{mk} - B_{m\phi}) Fo_m \right\} - \\ - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi m Fo_m) \left\{ \frac{1}{2} [A_{mk} - (-1)^m A_{m\phi}] Fo_m^2 + [B_{mk} - (-1)^m B_{m\phi}] Fo_m \right\}. \quad (4.5.16)$$

III. Равномерное начальное распределение концентраций и постоянные значения критериев Кирпичева:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = U_0 - (Ki_{mk} - Ki_{m\phi}) Fo_m - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \left[Ki_{mk} - (-1)^m Ki_{m\phi} \right] Fo_m. \quad (4.5.17)$$

Полученное аналитическое решение представляет собой распределение влагосодержания $u(x, \tau)$ по толщине арболитового блока, которое можно использовать при соответствующих конкретных технологических схемах сушки на проницаемом, непроницаемом или частично проницаемом настиле. Данное решение позволяет прогнозировать пространственно-временную эволюцию влажностного поля в объёме арболитового блока-сырца с учётом градиента влагосодержания на поверхности.

4.5.3. Численные эксперименты по цифровой модели динамики нестационарного влагопереноса при термовлажностной обработке изделий из арболита после распалубования

В качестве иллюстрации возможностей разработанной расчётной методики приведены результаты численного эксперимента по моделированию нестационарного влагопереноса в арболитовом блоке при различных схемах организации массообмена на границах. В расчетах принята начальная влажность

арболита 60%, а равновесным будем считать значение влажности 20%, следовательно $U_0 = 2$.

На рис. 4.15 представлено распределение безразмерного влагосодержания по толщине блока при симметричном двустороннем массообмене ($Ki_{mk}=1, Ki_{m\phi}=1$), что соответствует сушке на проницаемом настиле или принудительному конвективному обдуву обеих граней изделия. В этих условиях формируется параболический профиль влажности, симметричный относительно центра блока.

Хотя в реальных технологических процессах точное равенство граничных потоков достигается редко, данный пример иллюстрирует физическую адекватность полученного аналитического решения и демонстрирует монотонное стремление системы к равновесному состоянию. Двусторонняя схема обеспечивает максимальную интенсивность влагоудаления, однако сопряжена с повышенными энергозатратами на организацию массообмена.

Принципиально иная картина наблюдается при сушке на непроницаемом основании (рис. 4.16), что характерно для технологий с использованием металлических поддонов ($Ki_{mk}=1, Ki_{m\phi}=0$). Отсутствие массоотдачи с нижней поверхности приводит к формированию резко асимметричного профиля с максимумом влажности в придонной зоне. При этом за тот же безразмерный временной интервал влагосодержание изделия снижается лишь на 28 % от начального перепада. Повышенные градиенты влажности в поверхностных слоях создают предпосылки для возникновения усадочных напряжений и микротрещин, особенно в зоне контакта «цементный камень — древесное волокно». При этом в придонной зоне сохраняется избыточная влага, что замедляет достижение распалубочной прочности.

На рис. 4.17 показан промежуточный вариант - сушка при асимметричных условиях массообмена ($Ki_{mk}=1, Ki_{m\phi}=0,5$), реализуемый при использовании частично проницаемых перфорированных форм или решётчатых настилов. Асимметрия профиля влажности менее выражена, чем в случае непроницаемого основания, что снижает риски образования дефектов структуры.

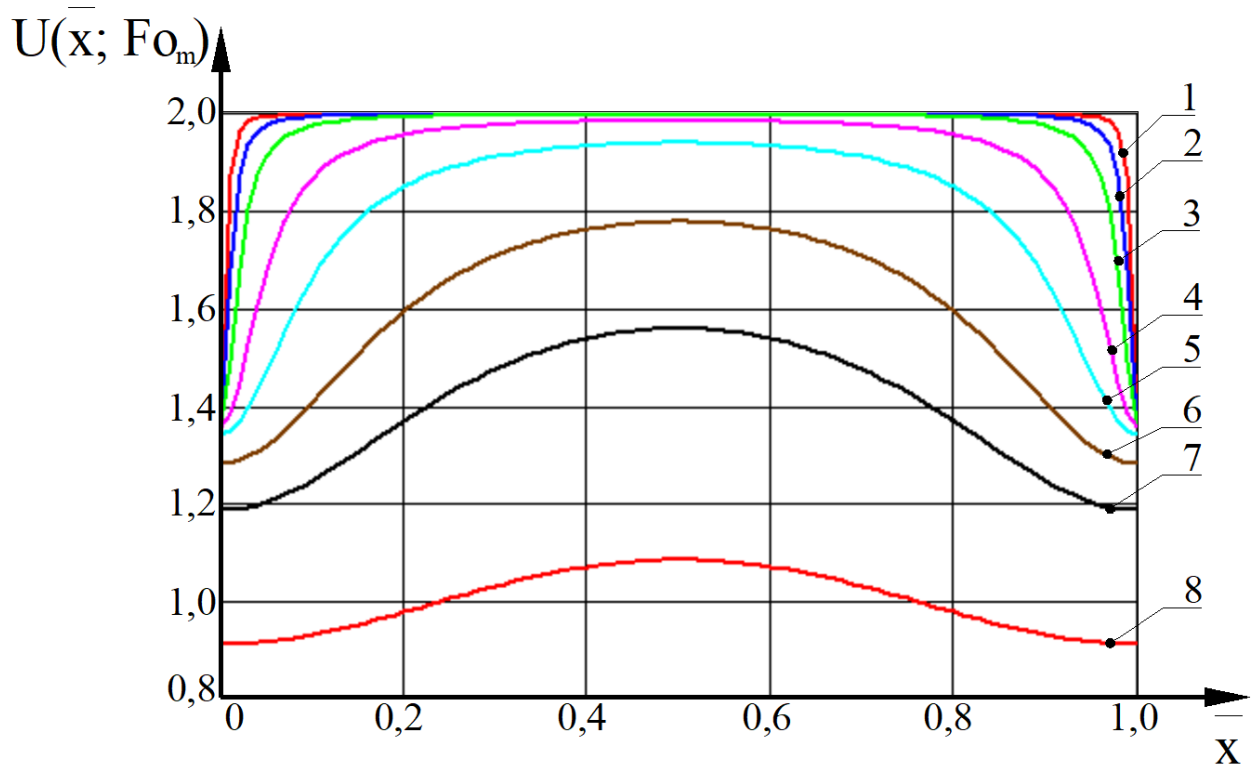


Рис. 4.15. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита ($U_0 = 2$, $Ki_{mk}=1$, $Ki_{m\phi}=1$, значения Fo_m : 1-0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,02; 4 – 0,05; 5 – 0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

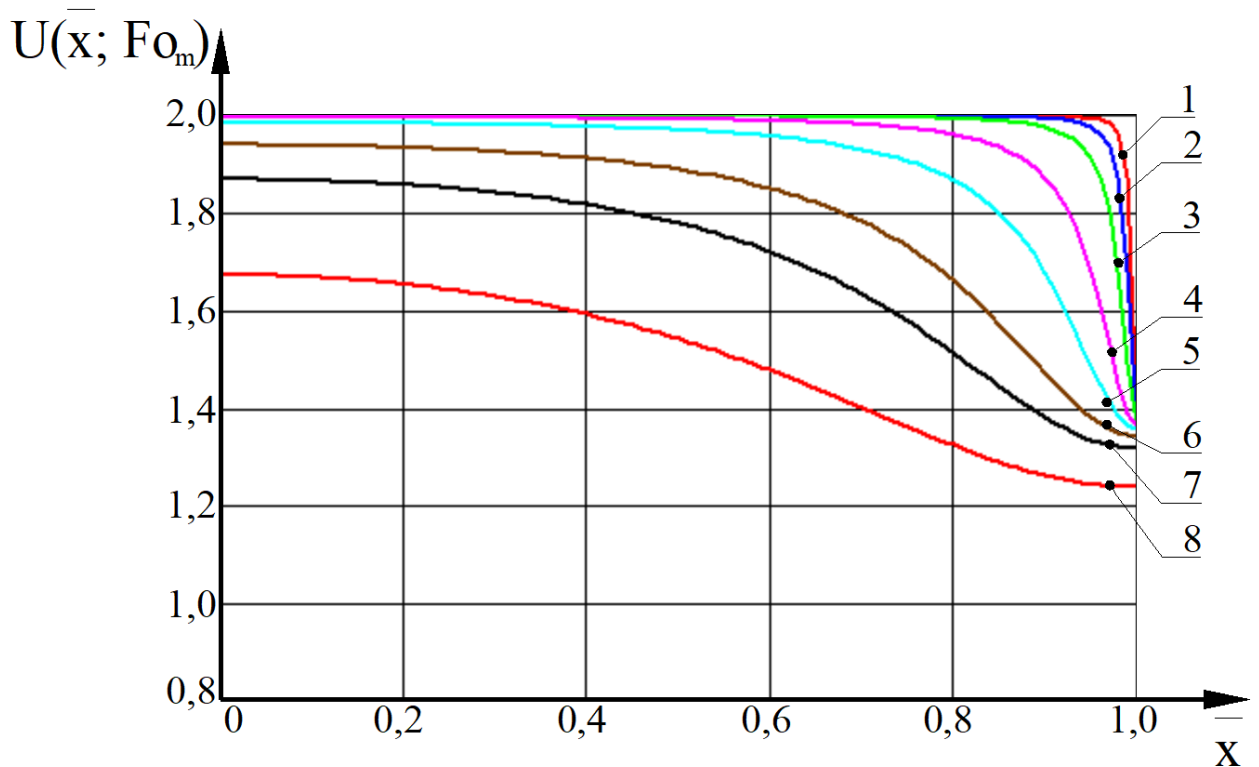


Рис. 4.16. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита ($U_0 = 2$, $Ki_{mk}=1$, $Ki_{m\phi}=0$, значения Fo_m : 1-0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,02; 4 – 0,05; 5 – 0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

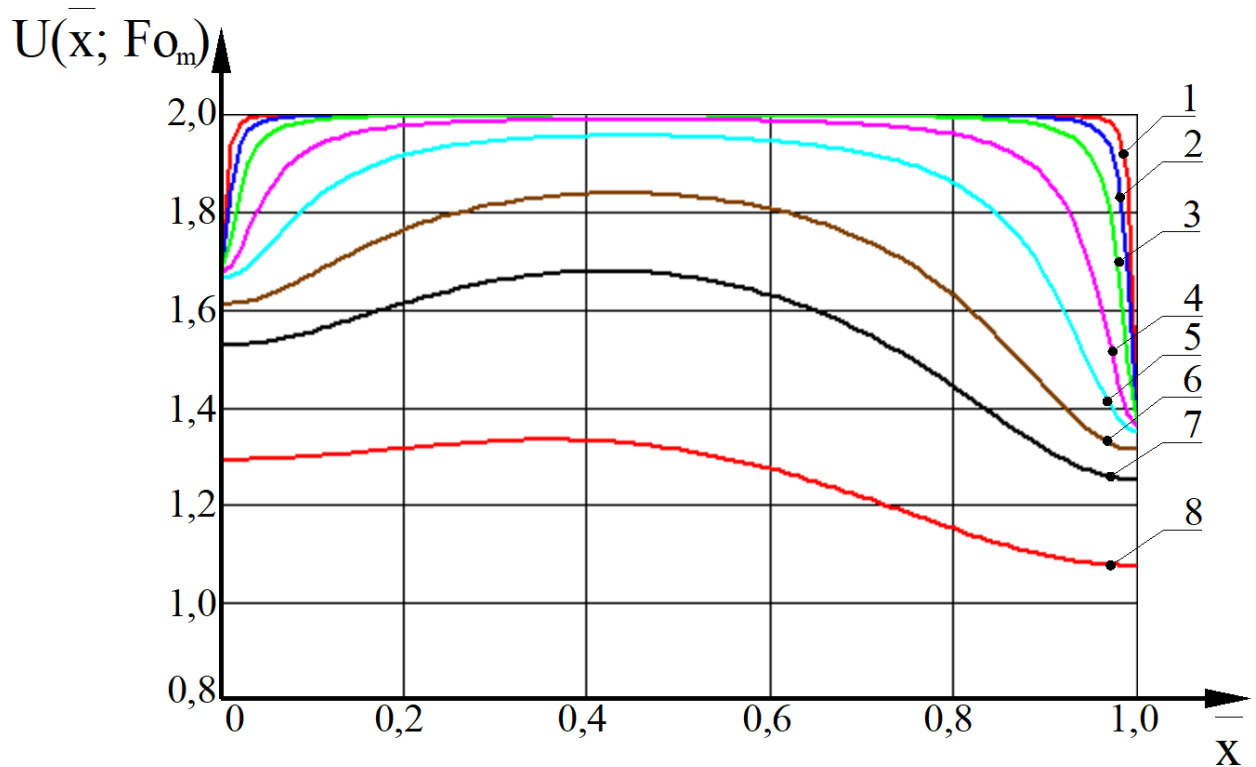


Рис. 4.17. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита ($U_0 = 2$, $Ki_{mk}=1$, $Ki_{m\phi}=0,5$, значения Fo_m :
1-0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,02; 4 – 0,05; 5 – 0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

Полученные результаты подтверждают физическую адекватность предложенной математической модели и демонстрируют её прикладную ценность для рационального проектирования режимов сушки арболитовых изделий. Выбор технологической схемы должен осуществляться с учётом баланса между производительностью (временем достижения распалубочной прочности) и качеством продукции (равномерностью структуры, отсутствием дефектов). Для условий массового производства в умеренном климате предпочтительной представляется схема с частично проницаемым основанием, обеспечивающая снижение времени сушки на 25...30 % по сравнению с непроницаемым вариантом при сохранении приемлемой равномерности влажностного поля.

Следует отметить, что в реальных условиях потоки массы на поверхности не остаются постоянными, а изменяются во времени вследствие снижения градиента влажности на границе и изменения скорости воздушного потока. Применение метода микропроцессов, заложенного в основу расчёта, позволяет

адекватно учитывать эту нестационарность за счёт адаптивного обновления численного значения граничных условий на каждом временном шаге, что обеспечивает погрешность аппроксимации не более 3...5 % по сравнению с экспериментальными кинетическими кривыми сушки.

4.6. Разработка алгоритма адаптивного цифрового управления режимами термовлажностной обработки арболитовых изделий

Анализ современных технологических карт производства арболита показывает, что на большинстве предприятий процессы термовлажностной обработки (ТВО) регламентируются статичными (эмпирическими) графиками подъема и выдержки температуры сушильного агента. Однако, как было доказано в главах 3 и 4, арболит представляет собой чувствительную капиллярно-пористую систему, кинетика структурообразования которой жестко лимитируется нестационарными градиентами температуры и влажности. Применение статичных режимов неизбежно приводит к формированию зон с критическими внутренними напряжениями, что вызывает скрытую микротрещиноватость контактной зоны «щепа–цемент» и снижает итоговую прочность изделий.

Для решения этой проблемы и реализации заявленной в теме диссертации цели, на основе верифицированной математической модели сопряженного тепломассопереноса (п. 4.4) и моделей для различных стадий сушки (п. 4.2, 4.3 и 4.5), разработана методология адаптивного цифрового управления режимами ТВО. Предлагаемый подход базируется на концепции «цифрового двойника» (Digital Twin) арболитового блока, позволяющего перейти от реактивного контроля параметров среды к предиктивному управлению внутренним напряженно-деформированным состоянием изделия (приложение 2).

В основу алгоритма положен численно-аналитический метод микропроцессов, который благодаря своей высокой вычислительной устойчивости и скорости сходимости позволяет решать краевые задачи тепло- и массопроводности в режиме, близком к реальному времени (Real-Time).

Функционирование системы адаптивного регулирования осуществляется по следующему циклическому алгоритму адаптивного управления (шаг дискретизации $\Delta\tau=30$ мин) разделенному на пять функциональных блоков:

1. Блок инициализации. В начале цикла ТВО в систему вводятся начальные параметры: температура и влажность блока-сырца (определяемые в п. 3.2), плотность композита (рассчитываемая по зависимости 3.2) и тип технологического основания (проницаемый, непроницаемый или частично проницаемый настил). На основе этих данных автоматически формируются соответствующие граничные условия (п. 4.3 или 4.5).

2. Блок мониторинга и обратной связи. Датчики камеры фиксируют текущие параметры сушильного агента: температуру $t_c(\tau)$, относительную влажность φ и скорость циркуляции воздуха. Эти данные используются для оперативной корректировки коэффициентов тепло- и массоотдачи и (или) потоков тепла и влаги на границах изделия.

3. Блок имитационного моделирования. На основе актуальных граничных условий и текущих полей температуры $t(x,\tau_i)$ и влагосодержания $u(x,\tau_i)$ используются аналитические зависимости (4.2.10), (4.3.10) или (4.5.11) для расчета следующего шага по времени. Модель прогнозирует профили распределения параметров по толщине блока, учитывая экзо- и эндотермические эффекты гидратации и поглощения влаги.

4. Блок оценки градиентов. Вычисляются максимальные пространственные градиенты температуры и влажности. Полученные значения сравниваются с предельно допустимыми пороговыми значениями, превышение которых приводит к развитию усадочных микротрещин и короблению (обоснование приведено в п. 4.7).

5. Блок принятия решений. Если прогнозные градиенты находятся в допустимых пределах, параметры сушильного агента сохраняются или плавно повышаются для интенсификации процесса. При прогнозе выхода градиентов за предельные значения контроллер формирует управляющее воздействие: снижает

температуру теплоносителя, повышает влажность воздуха или регулирует скорость обдува для выравнивания полей переноса.

Отличительной особенностью разработанного алгоритма является его способность автоматически адаптироваться к изменению граничных условий на различных стадиях производства изделий из арболита:

- на стадии твердения в стальных формах (п. 4.2, 4.3) алгоритм жестко лимитирует скорость нагрева сушильного агента. Это предотвращает перегрев поверхностного слоя и компенсирует экзотермический пик гидратации в центральной зоне блока;

- на стадии сушки после извлечения из форм (п. 4.5) система учитывает тип настила. При использовании глухих поддонов алгоритм увеличивает время изотермической выдержки и снижает интенсивность конвекции, минимизируя асимметрию влажностного профиля. При работе с частично проницаемыми решетчатыми настилами, напротив, оптимизируется скорость воздушного потока для двустороннего съема влаги. Это позволяет сократить общее время сушки на 25...30 % без риска трещинообразования.

Разработанный алгоритм программно реализован и интегрирован в контур управления экспериментальной камерой ТВО. Таким образом, математический аппарат, изложенный в разделах 4.2-4.5, становится основой для автоматизированного синтеза рациональных режимов ТВО.

Теоретическая обоснованность и эффективность предлагаемой системы адаптивного управления требуют апробации в реальных производственных условиях. Определяющим критерием адекватности технологии является не только снижение энергозатрат и сокращение времени сушки, но, прежде всего, сохранение структурной целостности композита и обеспечение его проектных прочностных характеристик.

Поскольку визуальный контроль арболита не способен выявить скрытую микротрещиноватость, вызываемую градиентами, объективным индикатором качества выступает предел прочности при сжатии и характер разрушения образцов.

Для подтверждения эффективности предложенных адаптивных режимов ТВО, сгенерированных на основе цифровой модели, в сравнении с традиционными эмпирическими режимами, был организован и проведен натурный производственный эксперимент на предприятии ООО «Арбоград», результаты которого изложены в следующем разделе.

4.7. Экспериментальное исследование влияния градиентов температуры и влажности при термовлажностой обработке на структурную целостность и прочностные характеристики изделий из арболита

Математическое моделирование и численные эксперименты, проведенные в разделах 4.2-4.5, доказали, что нестационарные процессы тепломассопереноса при ТВО формируют в теле арболитового блока выраженные градиенты температуры и влажности. Эти градиенты генерируют внутренние усадочные и термические напряжения. Однако для подтверждения критического влияния данных факторов на реальные эксплуатационные свойства материала потребовалось проведение натуральных производственных испытаний.

Эксперимент базировался на производственных мощностях компании «Арбоград» (ИП Сосновиков И.И., г. Иваново). Целью испытаний было сопоставление прочностных характеристик и структурной целостности арболитовых блоков, изготовленных по традиционной эмпирической технологии (с высокими градиентами) и по адаптивному режиму, разработанному на основе предложенной математической модели.

Арболит представляет собой грубодисперсный, гетерогенный композит, где древесная щепка занимает до 80...90 % объема. Визуальный контроль качества поверхности таких изделий, как показал производственный опыт, обладает крайне низкой информативностью в отношении внутренних структурных повреждений. Из-за пестрой оптической текстуры («рисунки» щепы и цемента) и наличия естественных неровностей, микротрещины, зарождающиеся в контактной зоне «древесный наполнитель – цементная матрица», практически невидимы невооруженным глазом (рис. 4.18, 4.19).



Рис. 4.18. Нарезанные блоки арболита для испытания на сжатие

Тем не менее, именно эти скрытые микротрещины, возникающие из-за неравномерной усадки древесины и термического расширения цементного камня при высоких градиентах ТВО, выступают концентраторами напряжений [34,90,165]. При разрушающих испытаниях такие блоки демонстрируют преждевременное хрупкое разрушение и значительное снижение предела прочности при сжатии, даже если внешне блок не имеет видимых дефектов (рис. 4.20).

Для оценки влияния градиентов была сформирована контрольная группа из 30 блоков-сырцов, прошедших ТВО в условиях, лимитируемых жесткими градиентами (ускоренный нагрев до 60 °С, сушка на сплошных непроницаемых поддонах без контроля влажности среды, что соответствует модели из п. 4.5.3). Сравнение проводилось с опытной партией (30 блоков), где режим ТВО был скорректирован согласно рекомендациям математической модели (ступенчатый нагрев не выше 40...45 °С, использование частично проницаемых решетчатых настилов).



Рис. 4.19. Испытание образца куба размером с гранью 15 см на сжатие (вид образца до испытаний)

Испытания на сжатие проводились в соответствии с ГОСТ 10180 и ГОСТ 12730 на образцах-кубах, выпиленных из центральной зоны блоков после достижения ими проектного возраста (28 суток). Результаты испытаний представлены в таблице 4.3.

Данные таблицы 4.3 наглядно демонстрируют парадокс, с которым сталкиваются технологи: при эмпирическом режиме видимый брак (коробление, сквозные трещины) составляет лишь 4,5 %, однако средняя прочность падает до 1,3 МПа (вместо проектных 1,7...2,0 МПа). Это происходит из-за тотальной микротрещиноватости контактных зон, спровоцированной градиентами. Применение адаптивного режима позволило не только полностью исключить

видимый брак, но и повысить прочность на 34 % за счет сохранения целостности микроструктуры цементного камня.



Рис. 4.20. Испытание образца куба размером с гранью 15 см на сжатие (вид образца после испытаний)

Для глубокого понимания механизма разрушения было проведено зонное испытание прочности внутри одного блока, подвергнутого эмпирическому режиму с высокими градиентами. Образцы вырезались из верхней (сухой), средней и нижней (влажной) зон блока. Результаты представлены в таблице 4.4.

Анализ таблицы 4.4 подтверждает выводы численных экспериментов (п. 4.3 и 4.5). Верхняя зона, пересушенная из-за одностороннего массообмена, теряет прочность из-за усадочных микротрещин. Нижняя зона, «запертая» влажной средой на непроницаемом поддоне, не набирает прочность из-за нарушения гидратации и избыточной пористости. Именно разнородность свойств по сечению (градиент прочности) приводит к тому, что блок работает как неоднородная система, разрушаясь при нагрузках, значительно меньших расчетных.

Проведенный натурный эксперимент на предприятии «Арбоград» однозначно доказал, что управление режимами ТВО арболита не может сводиться

к поддержанию усредненной температуры в сушильной камере. Ключевым фактором качества является минимизация внутренних градиентов температуры и влажности.

Таблица 4.3. – 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 сушильного агента, °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 ± 0,15	1,75 ± 0,08
Коэффициент вариации прочности (однородность), %	18,5 (низкая)	8,2 (высокая)

Поскольку визуальный контроль не способен выявить скрытую микротрещиноватость, снижение прочности с 1,75 МПа до 1,3 МПа при эмпирической сушке служит главным индикатором структурной деструкции. Внедрение разработанных в диссертации адаптивных режимов (с использованием частично проницаемых настилов и ступенчатого нагрева) на производственной линии «Арбоград» позволило устранить причину возникновения скрытых дефектов, что подтверждено Актом о внедрении (приложение 3) и выразилось в стабильном выходе продукции с проектной прочностью и высокой структурной однородностью.

Таблица 4.4. – Распределение прочности по сечению блока арболита при высоких градиентах ТВО

Зона отбора образца	Расчетная влажность, %	Характер разрушения	Предел прочности, МПа
Верхняя (контакт с воздухом)	12 ... 14	Хрупкое, по контактной зоне «щепа-цемент»	1,15
Средняя (ядро блока)	22 ... 25	Смешанное, сколы цементной матрицы	1,45
Нижняя (контакт с поддоном)	35 ... 40	Пластично-хрупкое, разрыв связей	1,20
Среднее по блоку	~ 24	-	1,26

4.8. Выводы по главе 4

1. Сформулирована и решена полная нестационарная задача сопряженного теплопереноса при сушке арболита как двухфазного органоминерального капиллярно-пористого композита. 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 технологических схем сушки. Обоснована эффективность применения численно-аналитического метода микропроцессов, позволяющего свести решение нелинейной краевой задачи к системе последовательных линейных задач с минимальной погрешностью накопления.

2. Получены аналитические решения распределения температурных и влажностных полей в блоке арболита-сырца при тепловой обработке в металлической опалубке с применением безразмерных критериев подобия (Фурье, Кирпичева, Померанцева). Теоретически доказано, что форсирование режима сушки на начальных этапах неизбежно ведет к перегреву поверхностных слоев и генерации высоких термических напряжений. Установлено, что наличие стальной

опалубки формирует малоинтенсивное удаление влаги в придонной зоне, создавая критические градиенты усадочных напряжений в переходной зоне «древесная щепка – цементная матрица».

3. Выполнена верификация математической модели сопряженного теплопереноса путем сопоставления расчетных данных с результатами натурного эксперимента. Оценка адекватности модели по критерию согласия Пирсона подтвердила высокую достоверность полученных результатов на заданном уровне значимости. Это формирует надежную теоретическую базу для прогнозирования нестационарных полей температуры и влагосодержания и создания имитационной модели процесса термовлажностной обработки.

4. Разработаны расчетные схемы влагопереноса для трех технологических схем сушки блоков арболита после распалубки: на проницаемом, непроницаемом и частично проницаемом основаниях. Установлено, что сушка на непроницаемом основании формирует резко асимметричный профиль влажности с максимумом в придонной зоне, что существенно повышает вероятность усадочного трещинообразования. Применение частично проницаемых настилов позволяет сократить продолжительность сушки на 25...30 % при обеспечении структурной однородности изделия и предотвращении дефектообразования.

5. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 тепломассопереноса, изменяющиеся при уменьшении влажности образца: коэффициент температуропроводности - $(2,2\dots 1,3)\cdot 10^{-7}\text{ м}^2/\text{с}$; коэффициент массопроводности - $(7,6\dots 1,8)\cdot 10^{-9}\text{ м}^2/\text{с}$; коэффициент теплопроводности - $0,4\dots 0,22\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; удельная теплоёмкость - $3,1\dots 2,4\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; плотность потоков тепла - $16,8\dots 1,8\text{ Вт}/\text{м}^2$ и влаги -

$(7...15) \cdot 10^{-10}$ кг/(м²·с); мощность объёмного выделения тепла - 1,92...1,25 кДж/(м³·с) и поглощения влаги - $(9,5...6,2) \cdot 10^{-7}$ кг/(м³·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 тепломассопереноса, 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 теплопроводности 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулова, М.В. Разработка состава и исследование свойств поризованного арболита / М.В. Акулова, А.С. Жив, Б.Р. Исакулов // Приволжский научный журнал. 2013. № 2 (26). С. 41–45.
2. Аминов, Л.И. Совершенствование технологии производства композиционных материалов на основе древесных наполнителей и минеральных вяжущих : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / Л.И. Аминов. Казань, 2011. 16 с.
3. Анисимов, С.Е. Обоснование технологических параметров установки смесителя для производства арболита / С.Е. Анисимов, Е.М. Царев, Д.В. Тюлькин, В.Ю. Мурзаева // Научному прогрессу – творчество молодых. 2019. №3. С. 227–229.
4. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян. Москва : Стройиздат, 1972. 351 с.
5. Баженов, Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 6–14.
6. Баженов, Ю.М. Технология бетона : учебник / Ю.М. Баженов. Москва : АСВ, 2002. 500 с.
7. Баруздин, А.А. Композиционные материалы на основе строительных и полимерных отходов / А.А. Баруздин, Л.В. Закревская // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19, № 2. С. 246–257.
<https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.2.246-257>.
8. Баруздин, А.А. Композиционный материал на основе техногенных отходов / А.А. Баруздин, Л.В. Закревская, К.А. Николаева // Эксперт: теория и практика. 2023. № 2 (21). С. 17–23.
9. Баруздин, А.А. Перспективы применения отходов полимеров в качестве заполнителей бетона / А.А. Баруздин, Л.В. Закревская // Техника и технология силикатов. 2024. Т. 31, № 3. С. 247–261. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-247-261>.
10. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика : монография / В.Г. Батраков. Москва : Стройиздат, 1998. 768 с.

11. Береговой, А.М. Тепломассоперенос в одно- и многослойных ограждающих конструкциях при экстремальных климатических воздействиях / А.М. Береговой // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 2 (63). С. 200–206. https://doi.org/10.54734/20722958_2025_2_200.

12. Береговой, В.А. Переносной калориметр для решения рецептурных задач в области практического бетоноведения / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров, И.С. Шурыгин, М.Г. Махмудов // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2023. № 1 (16). С. 8–15.

13. Береговой, В.А. Формирование пористой структуры и теплопроводящие свойства стеклокристаллических заполнителей / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров, А.С. Присевка // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 1 (62). С. 43–55. https://doi.org/10.54734/20722958_2025_1_43.

14. Береговой, В.А. Формирование структурно зависимых показателей метабетонов / В.А. Береговой, А.С. Присевка, А.В. Семилетков // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2025. № 1 (20). С. 3–9.

15. Болотов, М.Д. Влияние дисперсности древесины в строительных материалах на ее скорость термодеструкции / М.Д. Болотов, Е.А. Коваленко, Д.О. Плеханов, А.А. Шубин // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2025. № 3 (19). С. 30–35. <https://doi.org/10.34987/2712-9233.2025.60.33.005>.

16. Будылина, Е.А. Методические основы исследования композитов как сложных систем: от Бернштейна С.Н. до Моисеева Н.Н. / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 2 (63). С. 40–45. https://doi.org/10.54734/20722958_2025_2_40.

17. Будылина, Е.А. Современные подходы к проектированию композиционных материалов как систем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 2 (63). С. 55–59. https://doi.org/10.54734/20722958_2025_2_55.

18. Вахнина, Т.Н. Свойства теплоизоляционных плит с добавкой мягких отходов обработки древесины / Т.Н. Вахнина, И.В. Сусоева, А.П. Лебедев, А.А. Титунин // Научные исследования и разработки в области дизайна и

технологий: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Кострома, 2023. С. 148-150.

19. Воронова, А.С. Способ определения коэффициентов массопереноса из основного уравнения теплопроводности / А.С. Воронова, И.В. Красильников // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2018. № 1. С. 297–299.

20. Горностаева, Е.Ю. Повышение эффективности древесно-цементных композиций комплексными добавками : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Е.Ю. Горностаева. Белгород, 2012. 26 с.

21. Дворников, Р. Формирования ячеистой структуры поризованного арболита / Р. Дворников, С. Самченко // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29, № 1. С. 82–91.

22. Джумабаев, М.Д. Легкий арболитобетон на основе композиционных цементозольношламовых вяжущих и твердых органических отходов (на примере побочных продуктов сельского хозяйства Республики Казахстан) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / М.Д. Джумабаев. Иваново, 2017. 21 с.

23. Долматов, С.Н. Анализ потенциальной емкости рынка и объемов потребления стеновых строительных материалов, ориентированных на индивидуальных застройщиков, применительно к технологии древесно-минеральных композитов / С.Н. Долматов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2025. № 1 (33). С. 29–46. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29>.

24. Долматов, С.Н. Исследование влияния коры на прочность и теплопроводность древесно-минерального композита / С.Н. Долматов // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 3 (63). С. 76–83.

25. Долматов, С.Н. Исследование показателей теплопроводности древесно-цементных композитов / С.Н. Долматов, А.В. Никончук // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 5. С. 341–346.

26. Долматов, С.Н. Исследование прочности и теплопроводности древесно-минерального композита, изготовленного из механоактивированного древесного сырья / С.Н. Долматов, Н.В. Смертин // Леса России и хозяйство в них. 2025. № 3 (94). С. 170–184.

27. Долматов, С.Н. Повышение тепловой эффективности каркасной ограждающей конструкции при использовании в качестве теплоизоляции древесно-минерального композита / С.Н. Долматов, А.А. Соболева // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 3 (31). С. 32–46.

28. Дудченко, В.А. К вопросу использования модифицированной щепы для получения эффективных композитов / В.А. Дудченко // Инновационное проектирование в современном обществе : сб. материалов Междунар. объединенной науч.-практ. конф. Белгород, 2024. С. 51–55.

29. Ерофеев, В.Т. От традиционных бетонов к бетонам нового поколения / В.Т. Ерофеев, С.В. Самченко, О.В. Тараканов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2025. Т. 68, № 12. С. 83–95. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20256812.7199>.

30. Ерофеев, В.Т. Прочность и деформируемость биоцидных цементных композитов / В.Т. Ерофеев, М.А. Гончарова, О.В. Тараканов [и др.] // Строительство и реконструкция. 2025. № 6 (122). С. 99–122. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2025-122-6-99-122>.

31. Жив, А.С. Исследование характера и механизма разрушения легких поризованных арболитобетонов на основе отходов промышленности и растительного сырья / А.С. Жив, Б.Р. Исакулов // Строительные материалы. 2012. № 12. С. 20–23.

32. Жив, А.С. Разработка оптимальных составов поризованного арболита методом математического планирования экспериментов / А.С. Жив, С. Галебуй, Б.Р. Исакулов // Механизация строительства. 2012. № 9 (819). С. 22–26.

33. Жив, А.С. Ресурсосберегающие технологии получения и исследования свойств арболита на основе серосодержащих вяжущих / А.С. Жив, Б.Р. Исакулов

// Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2013. № 1 (29). С. 32–41.

34. Зайцева, М.В. Обеспечение качества контроля строительной продукции / М.В. Зайцева, Т.В. Учаева, В.И. Логанина // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2024. № 3 (284). С. 18–21.

35. Зиятдинова, Ю.Н. Повышение прочности композиционных материалов, созданных на основе модифицированной древесины / Ю.Н. Зиятдинова, Ф.Г. Валиев, Р.Р. Хасаншин, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 22. С. 31–35.

36. Иванков, С.И. Рациональные запатентованные технологии переработки и утилизации твердых промышленных отходов. Обзор. Ч. 3 / С.И. Иванков, Л.Я. Шубов, А.В. Троицкий, А.И. Каплин // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2022. № 9. С. 3–116.

37. Иманалиев, К.Е. Процессы структурообразования шлакощелочного арболита в условиях тепловлажностной и тепловой обработки / К.Е. Иманалиев, Ж.Н. Назыбек, Ж.П. Атамбаева [и др.] // Точная наука. 2021. № 102. С. 21–25. (EDN: ТОНВЕQ).

38. Исакулов, Б.Р. Повышение долговечности арболитобетонных композитов методом пропитки жидкой серой / Б.Р. Исакулов, М.В. Акулова // Эксперт: теория и практика. 2025. № 2 (29). С. 39–45. https://doi.org/10.51608/26867818_2025_2_39.

39. Исакулов, Б.Р. Технология получения арболитобетонных композитов на основе серосодержащих вяжущих / Б.Р. Исакулов, Ю.А. Соколова, М.В. Акулова. Москва, 2025. 174 с. (EDN: SYTOQJ).

40. Исакулов, Б.Р. Формирование структуры шлакощелочного арболита в процессе дальнейшего твердения / Б.Р. Исакулов, М.В. Акулова, Р.М. Нургалиев // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 24–29. https://doi.org/10.51608/26867818_2024_1_24.

41. Казакевич, Т.Н. Современные методики испытания композиционного строительного материала на основе портландцемента и древесины / Т.Н.

Казакевич, М.А. Кокина, Д.Ю. Кутыева [и др.] // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 3.

42. Калашников, В.И. Бетоны переходного и нового поколений. Состояние и перспективы / В.И. Калашников, О.В. Тараканов, В.М. Володин [и др.] // Технологии бетонов. 2023. № 2 (187). С. 33–38.

43. Каприелов, С.С. Влияние относительной влажности воздуха на коэффициент ползучести высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / С.С. Каприелов, П.Д. Арленинов, А.В. Шейнфельд, П.С. Калмакова // Строительные материалы. 2025. № 10. С. 25–35.

44. Каприелов, С.С. Влияние вида заполнителя на физико-технические характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Н.И. Карпенко [и др.] // Бетон и железобетон. 2025. № 2 (627). С. 27–42.

45. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны: реальность и перспективы / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, И.А. Чилин [и др.] // Вестник НИЦ Строительство. 2024. № 1 (40). С. 92–104.

46. Карапетян, К.П. Эко-материалы в современном строительстве и архитектуре России: специфика и проблемы применения / К.П. Карапетян // Актуальные исследования. 2024. № 40-1 (222). С. 75–95.

47. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел : учеб. пособие для втузов / Э.М. Карташов. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Высш. шк., 2001. 550 с.

48. Капуш, И.Р. Строительный композит на основе костры технической конопли : пат. 2784102 С1 Рос. Федерация / И.Р. Капуш, Л.В. Закревская. № 2022104140 ; заявл. 16.02.2022 ; опубл. 23.11.2022.

49. Кобулиев, З.В. Физико-химические основы структурообразования и теплофизические свойства материалов на основе минерального и растительного сырья : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 02.00.04; 01.04.14 / З.В. Кобулиев. Душанбе, 2006. 40 с.

50. Кокурина, Г.Л. Методы исследования и контроля строительных материалов / Г.Л. Кокурина. Иваново : Ивановский инженерно-строительный институт, 1988. 46 с.

51. Коновалова, В. Intensity of mass transfer processes in concrete with inhibitors in chloride corrosion / V. Konovalova, V. Rummyantseva, M. Korinchuk // E3S Web of Conferences. XXVI International Scientific Conference "Construction the Formation of Living Environment" (FORM-2023). EDP Sciences, 2023. P. 01009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341001009>.

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

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

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

55. Коринчук, М.А. Фибробетоны для повышения огнестойкости конструкций / М.А. Коринчук // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности : материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. молодых исследователей (с междунар. участием) / под общ. ред. Н.Ю. Ермиловой. 2017. С. 148–150.

56. Коринчук, М.А. Экологические и энергосберегающие аспекты производства арболита на основе промышленных отходов / М.А. Коринчук, И.В. Красильников // Экологические аспекты современных городов : сб. материалов III нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иваново, 2026. С. 207–210.

57. Коровкин, Д.И. Влияние температурно-влажностного режима на трещиностойкость модифицированных и немодифицированных мелкозернистых

бетонов / Д.И. Коровкин, Т.А. Низина, А.С. Балыков, В.В. Володин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 1. С. 15–21.

58. Королев, Е.В. Системный анализ эволюции знаний о структурообразовании строительных материалов / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Данилов, А.М. Айзенштадт // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 9. С. 18–27. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2024.09.18-27>.

59. Королев, Е.В. Методологические принципы синтеза композиционных материалов как систем: состояние и перспективы / Е.В. Королев, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 4 (53). С. 51–58.

60. Кошкин, А.К. Арболит – эффективный ресурсосберегающий материал для малоэтажного строительства / А.К. Кошкин, Т.Л. Лазарева // Новые идеи нового века : материалы Междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. 2017. Т. 3. С. 257–262.

61. Красильников, И.В. Массоперенос в процессах коррозии бетонов при изменяющихся параметрах агрессивной среды эксплуатации : дис. ... д-ра техн. наук : 2.1.5 / И.В. Красильников ; науч. консультант С.В. Федосов. Иваново : ИВГПУ, 2023. 418 с.

62. Красильников, И.В. Определение параметров процесса неизотермического массопереноса при жидкостной коррозии бетонов / И.В. Красильников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2022. № 1 (45). С. 99–109.

63. Красильников, И.В. Определение параметров, характеризующих влияние жидкой фазы на процесс массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов первого вида / И.В. Красильников // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК). 2016. № 1. С. 511–513.

64. Красильников, И.В. Определение характеристик твёрдой фазы для массообменных процессов при коррозии бетонных и железобетонных конструкций / И.В. Красильников, А.С. Воронова // Инженерные и социальные системы : сб. науч. тр. инженерно-строительного ин-та ИВГПУ. Иваново, 2018. С. 13–21.

65. Красильников, И.В. Интеграция критериев подобия в дифференциальные уравнения взаимосвязанного нестационарного теплопереноса / И.В. Красильников, И.А. Красильникова // Современные материалы, техника и технология : сб. науч. ст. 11-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2021. С. 225–229.

66. Красильников, И.В. Методика определения параметров теплопереноса (на примере жидкостной коррозии бетона) / И.В. Красильников, И.А. Красильникова // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2021. № 1. С. 324–326.

67. Красильников, И.В. О влиянии температурных криогенных колебаний на деструкцию строительных конструкций / И.В. Красильников, И.А. Красильникова // Инженерные и социальные системы : сб. науч. тр. ин-та архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново, 2021. С. 31–42.

68. Красильников, И.В. Теплоперенос в капиллярно-пористых телах в среде с переменными потенциалами / И.В. Красильников, И.А. Красильникова // Современные материалы, техника и технология : сб. науч. ст. 11-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2021. С. 221–225.

69. Красильников, И.В. Методика экспериментального определения феноменологического коэффициента диффузии / И.В. Красильников, И.А. Красильникова, У.А. Новикова // Современные материалы, техника и технология : сб. науч. ст. 11-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2021. С. 229–233.

70. Красильников, И.В. Условия стабильного существования высокоосновных соединений цементного камня / И.В. Красильников, И.А. Красильникова, У.А. Новикова // Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2021. С. 147–149.

71. Красильников, И.В. Пример практической реализации математической модели коррозионного теплопереноса / И.В. Красильников, И.А. Красильникова, У.А. Новикова, К.Б. Строкин // Инженерные и социальные системы : сб. науч. тр. ин-та архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново, 2021. С. 19–30.

72. Красильников, И.В. Способ аппроксимации аналитическими уравнениями экспериментальных данных о динамике массопереноса в теле строительных конструкций / И.В. Красильников, И.А. Красильникова, У.А. Новикова, К.Б. Строкин // Инженерные и социальные системы : сб. науч. тр. ин-та архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново, 2021. С. 11–18.

73. Красильников, И.В. Современное представление о пористой структуре цементного камня и бетона / И.В. Красильников, М.Н. Наместников // Инженерные и социальные системы : сб. науч. тр. ин-та архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново, 2022. С. 9–17.

74. Красильников, И.В. Химико-минералогические особенности цементного камня / И.В. Красильников, У.А. Новикова, К.Б. Строкин // Экологические аспекты современных городов : сб. материалов IX межрегион. семинара. Иваново, 2023. С. 34–36.

75. Красильников, И.В. Управление долговечностью сооружений из бетона и железобетона (на примере железобетонной башенной градирни) / И.В. Красильников, У.А. Новикова, К.Б. Строкин, И.А. Красильникова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2022. № 3 (47). С. 66–81.

76. Красильников, И.В. К вопросу разработки автоматизированной системы управления биологической очисткой сточных вод / И.В. Красильников, О.В. Пещерова // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК). 2016. № 1. С. 513–515.

77. Красильников, И.В. Об исследовании пористой структуры цементного камня / И.В. Красильников, А.М. Щаницына, У.А. Новикова // Инженерные и социальные системы : сб. науч. тр. ин-та архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново, 2022. С. 18–23.

78. Кульшаров, Б.Б. Влияние влажности на прочностные характеристики блоков из легкого бетона на основе кукурузных отходов для строительства текстильных предприятий / Б.Б. Кульшаров // Известия высших учебных

заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 3 (411). С. 122–126. https://doi.org/10.47367/0021-3497_2024_3_122.

79. Кузина, В.В. Математическое моделирование температурных и скоростных полей в конвективных потоках от нагретой поверхности отопительного прибора / В.В. Кузина, А.И. Ерёмкин, А.Н. Кошев, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 1 (62). С. 183–191.

80. Лapidус, А.А. Энергосберегающая технология производства конструкционно-теплоизоляционного арболита на основе биомассы для развивающихся стран (на примере Республики Чад) / А.А. Лapidус, С.В. Федосов, Б.И. Булгаков, А.Б. Петрухин, Э. Кеневей // Строительное производство. 2024. № 2. С. 100–107.

81. Логанина, В.И. Структурообразование композита при совместном использовании гидравлической и воздушной извести / В.И. Логанина // Вестник гражданских инженеров. 2025. № 3 (110). С. 129–134. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2025-22-3-129-134>.

82. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса: монография / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. Москва: Наука, 1963. 535 с.

83. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. Москва: Высшая школа, 1967. 599 с.

84. Лыков, А.В. Теоретические основы строительной теплофизики / А.В. Лыков. Минск: Изд-во АН Белорус. ССР, 1961. 519 с.

85. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. Москва: Энергия, 1968. 472 с.

86. Лыков, А.В. Тепломассообмен / А.В. Лыков. Москва: Энергия, 1978. 480с.

87. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. Москва: Гостехиздат, 1954. 296 с.

88. Макаридзе, Г.Д. Применение современных строительных материалов – опилкобетон: функциональные свойства и технология производства / Г.Д. Макаридзе, Л.Г. Ворона-Сливинская // Инновации и инвестиции. 2019. № 10. С. 249–254.

89. Мантуров, З.А. Арболитобетон на силикат-натриевом композиционном вяжущем и обрезках виноградной лозы / З.А. Мантуров, А.О. Омаров, А.Б. Тотурбиев, У.Д. Тотурбиева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. Т. 42, № 3. С. 183–192.

90. Мантуров, З.А. Арболитобетон на силикат-натриевом композиционном вяжущем с использованием в качестве заполнителя обрезки виноградной лозы / З.А. Мантуров // Актуальные проблемы механики и строительства в современных условиях : сб. науч. тр. Махачкала, 2025. С. 188–197.

91. Матвеева, Н.Ю. О структуре программы энергоаудита на промышленном предприятии / Н.Ю. Матвеева, И.В. Красильников, О.В. Пещерова, А.С. Матрунчик // Информационная среда вуза. 2015. № 1 (22). С. 436–443.

92. Матыева, А.К. Ресурсосберегающая технологии производства арболита / А.К. Матыева // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2022. № 2-1 (76). С. 466–470.

93. Матыева, А.К. Энергоэффективные строительные блоки из облегченного поризованного арболита / А.К. Матыева // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2012. № 3. С. 33–37.

94. Мацкевич, Я.Д. Физико-механические свойства гипсобетона на основе низкомарочного гипсового вяжущего с органическим заполнителем / Я.Д. Мацкевич, Л.М. Парфенова, Л.В. Закревская // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2023. № 3. С. 34–40.

95. Максимова, И.Н. Влияние интенсивности тепловлажностной обработки на конструкционную прочность ранней стадии структурообразования и твердения бетонов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 3 (52). С. 46–52. https://doi.org/10.54734/20722958_2022_3_46.

96. Макридин, Н.И. Деформирование структуры легкого конструкционного бетона при одноосном сжатии / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 1 (62). С. 56–67. https://doi.org/10.54734/20722958_2025_1_56.

97. Мельникова, Л.В. Технология композиционных материалов из древесины / Л.В. Мельникова. Москва : МГУЛ, 1999. 226 с.

98. Москвин, Р.Н. Кинетические особенности нарастания прочности карбонатно-шлаковых композиций, активизированных щелочными компонентами / Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 1 (62). С. 83–89. https://doi.org/10.54734/20722958_2025_1_83.

99. Москвин, Р.Н. Топологическая обоснованность формирования прочности через диффузионно-растворный механизм твердения шлакоминеральных композитов / Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова // Региональная архитектура и строительство. 2026. № 1 (66). С. 59–66.

100. Мошинский, А.И. Тепломассоперенос в пористом материале при учете релаксации потока массы / А.И. Мошинский // Математическое моделирование. 2015. Т. 27, № 4. С. 97–114.

101. Мурзаева, В.Ю. Химические добавки для модификации и технологические параметры установки смесителя для производства арболита / В.Ю. Мурзаева, Д.В. Тюлькин // Молодой ученый. 2019. № 21 (259). С. 114–116.

102. Наназашвили, И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции / И.Х. Наназашвили. Ленинград : Стройиздат, 1990. 415 с.

103. Оберхольстер, Р.Е. Поровая структура, диффузия в твердеющем цементном тесте и бетоне. Состояние вопроса и перспективы / Р.Е. Оберхольстер // Материалы VIII Междунар. конгр. по химии цемента. Москва : Стройиздат, 1989. Т. 4. С. 3–30.

104. Один, А.И. Влияние анизотропии строения арболита на прочность стеновых конструкций : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / А.И. Один. Нижний Новгород, 2009. 188 с.

105. Пичугин, А.П. Демпфирующие свойства композиционных материалов на основе пенополистирольных и растительных отходов / А.П. Пичугин, О.Е. Смирнова // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 8 (800). С. 54–63. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-800-8-54-63>.
106. Пичугин, А.П. Композиционные прессованные материалы на основе органического сырья / А.П. Пичугин, О.Е. Смирнова, В.Ф. Хританков // Эксперт: теория и практика. 2023. № 2 (21). С. 75–81. https://doi.org/10.51608/26867818_2023_2_75.
107. Пичугин, А.П. Коррозионностойкие материалы для полов и ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / А.П. Пичугин. Новосибирск, 2000. 52 с.
108. Пичугин, А.П. Строительные материалы из растительного сырья / А.П. Пичугин, В.Ф. Хританков, О.Е. Смирнова. Новосибирск : НГАУ, 2020. 218 с.
109. Репина, Е.А. Композиционный материал для реставрации на основе органического сырья природного происхождения / Е.А. Репина, Л.В. Закревская // Техника и технология силикатов. 2023. Т. 30, № 4. С. 365–374.
110. Романенко, И.И. Влияние органических веществ на свойства шлакощелочного бетона / И.И. Романенко, И.Н. Петровнина // Инженерный вестник Дона. 2025. № 12 (132).
111. Романенко, И.И. Композиционное вяжущее для производства железобетонных изделий в заводских условиях / И.И. Романенко, А.И. Фадин, И.Н. Петровнина // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 3 (60). С. 26–31. https://doi.org/10.54734/20722958_2024_3_26.
112. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. Москва : Химия, 1980. 248 с.
113. Рудобашта, С.П. Химическая технология: диффузионные процессы. Ч. 2 / С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов. Москва : Юрайт, 2018. 296 с.
114. Румянцева, В.Е. Использование отходов для производства теплоизоляционных материалов / В.Е. Румянцева, М.А. Коринчук //

Экологические аспекты современных городов : сб. материалов VIII межрегион. семинара. Иваново, 2022. С. 17–21. (EDN: WBFDPB).

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

116. Румянцева, В.Е. Получение легких бетонов (арболитов) с использованием вторичного сырья / В.Е. Румянцева, М.А. Коринчук // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти акад. РААСН Чернышова Е.М. 2022. С. 164–168. (EDN: QTIFGR).

117. Румянцева, В.Е. Получение лёгких бетонов (арболитов) с использованием вторичного сырья на основе хлопчатника, конопли, рисовой шелухи / В.Е. Румянцева, М.А. Коринчук, И.А. Веселов // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Иваново, 2023. С. 161–163. (EDN: WBMYNP).

118. Румянцева, В.Е. Применение отходов в производстве арболитовых блоков / В.Е. Румянцева, М.А. Коринчук // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Иваново, 2024. С. 168–170. (EDN: XHACES).

119. Румянцева, В.Е. Энергоресурсосбережение на основе моделирования физико-химических явлений тепломассопереноса в процессах сушки блоков арболита-сырца / В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, М.А. Коринчук, И.А. Красильникова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2025. № 6 (420). С. 257–268. (EDN: WGXTGG). https://doi.org/10.47367/0021-3497_2025_6_257.

120. Румянцева, В.Е. Экологические блоки (арболиты) с использованием вторичного сырья / В.Е. Румянцева, М.А. Коринчук, И.А. Веселов //

Экологические аспекты современных городов : сб. материалов I нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иваново, 2024. С. 96–98. (EDN: SPAWNA).

121. Румянцева, В.Е. Исследования влияния коэффициента массоотдачи на процессы жидкостной коррозии I вида цементных бетонов / В.Е. Румянцева, И.В. Красильников // Информационная среда вуза. 2015. № 1 (22). С. 736–740.

122. Румянцева, В.Е. Прогнозирование долговечности железобетонной башенной градирни с учетом циклически изменяющихся параметров среды эксплуатации / В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, И.А. Красильникова, У.А. Новикова, К.Б. Строкин // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 3 (44). С. 89–98.

123. Румянцева, В. Corrosion of steel reinforcement in hydrophobized concrete under the influence of aggressive chloride-containing medium / V. Rumyantseva, V. Konovalova, B. Narmaniya, M. Korinchuk // AIP Conference Proceedings. II International scientific and practical symposium "Materials science and technology" (MST-II-2022). Dushanbe, 2023. P. 20016. <https://doi.org/10.1063/5.0163261>.

124. Румянцева, В. Corrosion of Steel Reinforcement in Hydrophobized Concrete Under the Influence of Aggressive Chloride-Containing Medium / V. Rumyantseva, V. Konovalova, B. Narmaniya, M. Korinchuk // Proceedings of MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 335. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_2.

125. Румянцева, В. Increasing the biostability of concrete by the introduction of additives / V. Rumyantseva, V. Konovalova, B. Narmaniya, M. Korinchuk // 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. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340303005>.

126. Рыжов, А.С. Влияние состава древесно-минерального композита на его прочностные показатели / А.С. Рыжов, А.А. Титунин // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 2 (51). С. 62–67. https://doi.org/10.54734/20722958_2022_2_62.

127. Сафина, А.В. Исследование эксплуатационных свойств древесно-цементных композитов на основе древесных отходов экстракционного производства / А.В. Сафина, А.А. Хаертдинова // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 5 (155). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.54>.

128. Сальникова, А.С. Высокопрочные бетоны для мелкоштучных многопустотных стеновых изделий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.1.5 / А.С. Сальникова. Белгород, 2023. 21 с.

129. Сантос, А.П.М.Д. Свойства, влияющие на долговечность легких бетонов / А.П.М.Д. Сантос, А.С. Жив // Естественные и технические науки. 2013. № 2 (64). С. 363–365.

130. Сара, Галебуй. Теплоизоляционный материал на основе отходов хлопчатника Центральной Африки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Сара Галебуй. Иваново, 2013. 21 с.

131. Селезнева, О.И. Композиционный материал на основе опаловых пород и отходов деревообработки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / О.И. Селезнева. Улан-Удэ, 2014. 20 с.

132. Сеничев, В.П. Интенсификация технологических процессов производства древесно-цементных композитов методом ультразвукового воздействия : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / В.П. Сеничев. Вологда, 2017. 148 с.

133. Сеницын, А.А. Результаты лабораторных исследований теплопроводности легких бетонов на основе диатомитовых пород / А.А. Сеницын, О.В. Соловьева, И.Г. Ахметова [и др.] // Актуальные вопросы развития строительной отрасли, экологической и промышленной безопасности : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. Вологда, 2023. С. 320–324.

134. Сеницын, А.А. Приборное исследование теплопроводности композитного материала с микрогранулами / А.А. Сеницын, О.В. Соловьева, И.Г. Ахметова [и др.] // Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2022 (ICMSSTE 2022) : материалы междунар. науч.-практ. конф. Симферополь, 2022. С. 366–373.

135. Синицын, А.А. Результаты разработки технологии лёгких бетонов на основе диатомитовых пород и приборное исследование его теплопроводности / А.А. Синицын, О.В. Соловьева, И.Г. Ахметова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 6. С. 124–132.

136. Смирнова, О.Е. Адгезионная прочность в структуре композиционных материалов на основе органического сырья / О.Е. Смирнова, А.П. Пичугин, В.Ф. Хританков // Строительные материалы. 2024. № 5. С. 17–21. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-824-5-17-21>.

137. Соломонова, Е.Б. Лигнополимерсиликатный арболит : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Е.Б. Соломонова. Новосибирск, 2004. 24 с.

138. Соловьева, О.В. Экспериментальные исследования теплофизических свойств высокопористых композитных пенобетонов с различными наполнителями / О.В. Соловьева, С.А. Соловьев, Р.З. Шакурова [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15, № 2 (58). С. 78–92.

139. Сусоева, И.В. Анализ влияния структуры композита из целлюлозосодержащих отходов на его эксплуатационные показатели / И.В. Сусоева, А.А. Титунин, Т.Н. Вахнина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. № 6 (390). С. 55–62.

140. Сусоева, И.В. Оценка стабильности эксплуатационных показателей теплоизоляционных композитов по результатам натуральных стендовых испытаний / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, Ю.Б. Грунин, А.А. Титунин // Строительные материалы. 2021. № 4. С. 58–66. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-790-4-58-66>.

141. Стельмах, С.А. Опыт применения сельскохозяйственных отходов в бетонах для экологичных конструкций, зданий и сооружений / С. А. Стельмах, Е. М. Щербань, А. Б. Паскачев [и др.] // Цемент и его применение. 2023. № 5. С. 52–54.

142. Тараканов, О.В. Применение модифицированных бетонов нового поколения в строительстве / О.В. Тараканов, Т.К. Акчурин, Е.А. Белякова //

Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 1 (86). С. 163–174.

143. Тараканов, О.В. Формирование микроструктуры цементных материалов в присутствии химических модификаторов / О.В. Тараканов, Ю.Г. Ивашенко, И.В. Ерофеева // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 2 (63). С. 31–39. https://doi.org/10.54734/20722958_2025_2_31.

144. Тараканов, О.В. Моделирование процессов раннего структурообразования и твердения цементных материалов с органоминеральными добавками / О.В. Тараканов, И.В. Ерофеева, Е.А. Белякова [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. Т. 16, № 6. С. 510–524. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-510-524>.

145. Тараканов, О.В. Снижение расхода цемента в бетонах нового поколения / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова, О.В. Суздальцев // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 1 (50). С. 18–22.

146. Ткаченко, С.Е. Оптимизация состава светопроницаемого арболита на древесном заполнителе / С.Е. Ткаченко, О.Е. Смирнова, В.Ф. Хританков, А.П. Пичугин // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 3 (795). С. 32–40. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-795-3-32-40>.

147. Титунин, А.А. Сходимость расчетных и экспериментальных значений коэффициента теплопроводности композиционных материалов из целлюлозосодержащих отходов / А.А. Титунин, Т.Н. Вахнина, И.В. Сусоева // Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы) СЭТМТ-2023 : сб. науч. тр. Восьмой Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2023. С. 212–215.

148. Травуш, В.И. Бетон как экофактор стабилизации изменения климата / В.И. Травуш, Д.В. Кузеванов, С.С. Каприелов, Ю.С. Волков // Бетон и железобетон. 2024. № 1 (620). С. 34–41.

149. Тюлькин, Д.В. Расчет технологических параметров установки для производства арболита / Д.В. Тюлькин // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2019. № 2. С. 90–93.

150. Федосов, С.В. Вторичные материальные ресурсы для строительной индустрии / С.В. Федосов, Ю.А. Щепочкина, В.Е. Румянцева. Иваново : ИВГПУ, 2017. 187 с.

151. Федосов, С.В. В поиске инновационных материалов для массового строительства малоэтажных зданий в республике Чад / С.В. Федосов, Э. Кеневаи, А.А. Лapidус // Строительные материалы. 2023. № 5. С. 72–80. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-72-78>.

152. Федосов, С.В. Исследование влияния процессов массопереноса на надежность и долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, С.А. Логинова // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 52–57.

153. Федосов, С.В. Исследование диффузионных процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, Н.Л. Федосова // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2015. Т. 58, № 1. С. 99–104.

154. Федосов, С.В. Математическое моделирование начальных периодов коррозионной деструкции первого вида цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, Ю.В. Манохина, В.А. Хрунов // Архитектура. Строительство. Образование. 2013. № 2. С. 210–221.

155. Федосов, С.В. Математическое моделирование массопереноса в системе цементный бетон – жидкая среда, лимитируемого внутренней диффузией переносимого компонента при жидкостной коррозии первого вида / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, И.А. Красильникова // Строительные материалы. 2021. № 7. С. 4–9.

156. Федосов, С.В. Математическое моделирование нестационарного массопереноса в системе «цементный бетон – жидкая среда», лимитируемого внутренней диффузией и внешней массоотдачей / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, И.А. Красильникова // Строительные материалы. 2022. № 1–2. С. 134–140. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-134-140>.

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

158. Федосов, С.В. Методы теории тепломассопереноса для моделирования процессов сушки блоков арболита-сырца / С.В. Федосов, И.В. Красильников, В.Е. Румянцева, И.А. Красильникова, М.А. Коринчук // Строительные материалы. 2026. № 3. С. 60–69. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2026-844-3-60-69>.

159. Федосов, С.В. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов. Малые значения чисел Фурье с внутренним источником массы / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, И.В. Красильников // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2015. Т. 58, № 1. С. 97–99.

160. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. – Иваново: ПресСто, 2010. 364 с.

161. Федосов, С.В. Показатели технологии изготовления изделий из арболита с применением электротепловой обработки / С.В. Федосов, А.А. Лapidус, А.М. Соколов [и др.] // Строительные материалы. 2023. № 3. С. 4–11. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-4-10>.

162. Федосов, С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В. Методы математической физики в приложениях к проблемам коррозии бетона в жидких агрессивных средах. / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников // Москва. Издательство АСВ. 2021. 244 с.

163. Федосов, С.В. Физические особенности проблем жидкостной коррозии железобетона с позиций теории тепломассопереноса / С.В. Федосов, И.В. Красильников, В.Е. Румянцева, И.А. Красильникова // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19, № 4. С. 392–409. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-4-392-409>.

164. Фролов, М.В. Исследование влажностного режима в стенах из газобетона с дополнительным утеплением / М.В. Фролов, С.В. Баканова, Е.А. Журавлева // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2025. № 4 (291). С. 59–64.

165. Хазиахмедова, Р.М. Технологические подходы к повышению качества композиционных материалов / Р.М. Хазиахмедова, А.А. Макаров, А.И. Валиуллина [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 139–145.

166. Хайруллина, Э.Р. Переработка древесины мягколиственных пород в композиционные материалы для стеновых панелей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.03; 05.21.05 / Э.Р. Хайруллина. Казань, 2022. 20 с.

167. Хасаншин, Р.Р. Повышение эксплуатационных характеристик композиционных материалов, созданных на основе термически модифицированной древесины / Р.Р. Хасаншин, Р.Р. Сафин, Ф.Г. Валиев, Р.В. Данилова // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 7. С. 64–66.

168. Хасаншин, Р.Р. Термическое модифицирование древесного наполнителя в производстве композиционных материалов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.21.05 / Р.Р. Хасаншин. Казань, 2019. 40 с.

169. Хеирбеков, Р.А. Высокоэффективный поризованный арболит на основе шлакосиликатных вяжущих веществ : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.1.5 / Р.А. Хеирбеков. Москва, 2023. 23 с.

170. Хеирбеков, Р.А. Некоторые физико-химические аспекты формирования структуры композиционного шлакосиликатного поризованного арболитового материала / Р.А. Хеирбеков, С.В. Самченко // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29, № 4. С. 379–390.

171. Чернышов, Е.М. Управление реологическими и конструкционными свойствами цементного камня при наномодифицировании / Е.М. Чернышов, Г.С. Славчева, О.В. Артамонова // Нанотехнологии в строительстве : науч. интернет-журн. 2016. Т. 8, № 6. С. 87–101.

172. Шитова, И.Ю. Применение основ термодинамики в строительном материаловедении на примере выбора дисперсной фазы при изготовлении серных композитов / И.Ю. Шитова, А.В. Туманов // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2023. № 1 (16). С. 59–63.

173. Эгамов, И. Физико-химические и технологические основы разработки арболитовых материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / И. Эгамов. Душанбе, 2009. 24 с.

174. Ягубкин, А.Н. Влияние влажности на водостойкость и долговечность арболитовых изделий / А.Н. Ягубкин, В.В. Бозылев, Д.С. Зеленкевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2012. № 16. С. 60–63.

175. Ягубкин, А. Maximizing Strength and Durability in Wood Concrete (Arbolite) via Innovative Additive Control and Consumption / A. Yagubkin, D. Shabanov, A. Niyakovskii, V. Romanovski // Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. Vol. 15, № 9. P. 13365–13379. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06071-6>.

176. Яковенко, С.М. Арболит, пенобетон и газобетон: технические характеристики в сравнительном анализе / С.М. Яковенко, В.П. Данько // Components of Scientific and Technological Progress. 2024. № 12 (102). С. 15–19.

177. Akulich, P.V. Heat and mass transfer in cylindrical porous bodies with account of nonstationarity of parameters of deepening evaporation / P.V. Akulich // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics-Technical Series. 2016. № 3. P. 71–75.

178. Ahmed, W. Effective use of sawdust for the production of eco-friendly and thermal-energy efficient normal weight and lightweight concretes with tailored fracture properties / W. Ahmed, R.A. Khushnood, S.A. Memon [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 184. P. 1016–1027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.009>.

179. Agaesse, T. Validation of pore network simulations of ex-situ water distributions in a gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cells with X-ray

tomographic images / T. Agaesse, A. Lamibrac, F.N. Büchi [et al.] // *Journal of Power Sources*. 2016. Vol. 331. P. 462–474. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.076>.

180. Al-Kaseasbeh, Q. Valorization of hydrophobic wood waste in concrete mixtures: investigating the micro and macro relations / Q. Al-Kaseasbeh, M. Al-Qaralleh // *Results in Engineering*. 2023. Vol. 17. Art. 100877. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100877>.

181. Alireza, A. Evaporation in Capillary Porous Media at the Perfect Piston-Like Invasion Limit: Evidence of Nonlocal Equilibrium Effects / A. Alireza, M.P. Moghaddam, T. Evangelos [et al.] // *Water Resources Research*. 2017. Vol. 53. P. 10433–10449.

182. Allam, R. Hygrothermal behavior for a clay brick wall / R. Allam, N. Issaadi, R. Belarbi [et al.] // *Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 54. P. 1579–1591. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2271-5>.

183. Basok, B. Numerical Network Modeling of Heat and Moisture Transfer through Capillary-Porous Building Materials / B. Basok, B. Davydenko, A.M. Pavlenko // *Materials*. 2021. Vol. 14, № 8. Art. 1819. <https://doi.org/10.3390/ma14081819>.

184. Bederina, M. Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modelling / M. Bederina, L. Marmoret, K. Mezreb [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21, Issue 3. P. 662–668. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.008>.

185. Bennamoun, L. Modeling and simulation of drying kinetics/curves: application to building materials / L. Bennamoun, M.C. Ndukwu // *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2021. Vol. 6, № 1.

186. Benmahiddine, F. Accelerated Aging Effects on the Hygrothermal Behaviour of Hemp Concrete: Experimental and Numerical Investigations / F. Benmahiddine, R. Belarbi, J. Berger [et al.] // *Energies*. 2021.

187. Berger, F. The recycling potential of wood waste into wood-wool/cement composite / F. Berger, F. Gauvin, H.J.H. Brouwers // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. Art. 119786. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119786>.

188. Bourzik, O. Study of the effect of wood waste powder on the properties of concrete / O. Bourzik, N. Akkouri, K. Baba, A. Nounah // *Materials Today: Proceedings*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.518>.
189. Bultreys, T. Imaging and image-based fluid transport modeling at the pore scale in geological materials: A practical introduction to the current state-of-the-art / T. Bultreys, W. De Boever, V. Cnudde // *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 155. P. 93–128. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.02.001>.
190. Chu, S.-S. Modelling of coupled heat and moisture transfer in porous construction materials / S.-S. Chu, T.-H. Fan, W.-J. Chang // *Mathematical and Computer Modelling*. 2009. Vol. 50. P. 1195–1204. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2009.06.008>.
191. Defraeye, T. Advanced computational modelling for drying processes — a review / T. Defraeye // *Applied Energy*. 2014. Vol. 131. P. 323–344. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.027>.
192. Dias, S. Physical, mechanical, and durability properties of concrete containing wood chips and sawdust: an experimental approach / S. Dias, A. Tadeu, J. Almeida [et al.] // *Buildings*. 2022. Vol. 12, Issue 8. Art. 1277. <https://doi.org/10.3390/buildings12081277>.
193. Dias, S. Lightweight cement composites containing end-of-life treated wood – leaching, hydration and mechanical tests / S. Dias [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 317. Art. 125931. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125931>.
194. Dias, S. Steel-concrete bond behaviour of concrete mixes with wood waste: pull-out and bending tests of full-scale beams and columns / S. Dias, A. Tadeu, J. Almeida [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 383. Art. 131343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131343>.
195. Dias, S. Alternative concrete aggregates – Review of physical and mechanical properties and successful applications / S. Dias, J. Almeida, A. Tadeu, J. de Brito // *Cement and Concrete Composites*. 2024. Vol. 152. Art. 105663. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105663>.

196. El Moumen, A. Computational thermal conductivity in porous materials using homogenization techniques: Numerical and statistical approaches / A. El Moumen, T. Kanit, A. Imad [et al.] // *Computational Materials Science*. 2015. Vol. 97. P. 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.09.043>.

197. Fadiel, A.A.M. Mechanical properties of concrete including wood shavings as fine aggregates / A.A.M. Fadiel, T. Abu-Lebdeh // *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021. Vol. 14, Issue 4. P. 478–487. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2021.478.487>.

198. Faez, A. From micro-scale to macro-scale modeling of solute transport in drying capillary porous media / A. Faez, R. Arman, T. Evangelos [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 165. Art. 120722.

199. Faez, A. Non-local equilibrium continuum modeling of partially saturated drying porous media: Comparison with pore network simulations / A. Faez, T. Marouane, P. Marc [et al.] // *Chemical Engineering Science*. 2020. Vol. 228. Art. 115957.

200. Fedosov, S. Research of the engagement of liquid aggressive environment and concrete / S. Fedosov, V. Roumyantseva, I. Krasilnikov, I. Krasilnikova // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 403 LNNS. P. 1362–1370. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5_152.

201. Fedosov, S.V. Research of physical and chemical processes in the system "cement concrete – liquid aggressive environment" / S.V. Fedosov, V.E. Romyantseva, I.V. Krasilnikov, I.A. Krasilnikova // *ChemChemTech*. 2022. Vol. 65, № 7. P. 61–70. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226507.6606>.

202. Firesenay Zerabruk Gigar. From Portland cement to alkali-activated system: advances in wood-cement composites for sustainable building applications / Firesenay Zerabruk Gigar, A. Khennane, J.-L. Liow [et al.] // *Cleaner Materials*. 2026. Vol. 19. Art. 100365. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100365>.

203. Fu, Q. Interfacial bond behavior between wood chip concrete and engineered timber glued by various adhesives / Q. Fu, L. Yan, T. Ning [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 238. Art. 117743. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117743>.

204. Gasparin, S. An adaptive simulation of nonlinear heat and moisture transfer as a boundary value problem / S. Gasparin, J. Berger, D. Dutykh, N. Mendes // *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 133. P. 120–139. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.013>.

205. Gayvas, B.I. Solving Stefan's linear problem for drying cylindrical timber under quasi-averaged formulation / B.I. Gayvas, V.A. Dmytruk, M.M. Semerak, T.I. Rymar // *Mathematical Modeling and Computing*. 2021. Vol. 8, № 2. P. 150–156. <https://doi.org/10.23939/mmc2021.02.150>.

206. Giorgio, P. Advances in Modelling of Heat and Mass Transfer in Porous Materials / P. Giorgio, C. Jianchao, Z. Zhien [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7089718>.

207. Hafidh, S.A. Effect of adding sawdust to cement on its thermal conductivity and compressive strength / S.A. Hafidh, T.A. Abdullah, F.G. Hashim, B.K. Mohmoud // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1094, Issue 1. Art. 012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1094/1/012047>.

208. Ilmaliyev, Zh. Research and development of wood-cement composites as sustainable building materials based on secondary resources / Zh. Ilmaliyev, Ye.Ye. Zhatkanbayev, K.A. Kurtibay // *Комплексное использование минерального сырья*. 2025. № 4 (335). С. 34–41. <https://doi.org/10.31643/2025/6445.37>.

209. Ilmaliyev, Zh. Создание и изготовление композитов на основе отходов древесины / Zh. Ilmaliyev, Қ. Kurtibay, Ә. Қаппасұлы [et al.] // *Вестник КазУТБ*. 2025. Т. 2, № 27. <https://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.27-704>.

210. Isakulov, B.R. Increase of physical and mechanical parameters of arbolite-concrete composites by deep impregnation with liquid sulfur / B.R. Isakulov, F.T. Balmaganbetova, A.R. Sundetova [et al.] // *Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии*. 2025. № 2 (151). С. 59–76. <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-151-2-59-76>.

211. Isakulov, B.R. Investigations of the influence of organic aggregate on physical mechanical and adhesion properties of sulfur-containing arbolite / B.R. Isakulov, Z.B. Tukashev, H.T. Abdullaev, A.B. Isakulov // *Вестник Евразийского*

национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. 2024. № 3 (148). С. 154–166. <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-148-3-154-166>.

212. Isakulov, B. Investigation of the formation of microstructure and strength characteristics of slag-alkaline arbolite / B. Isakulov, H. Abdullaev, A. Mukasheva [et al.] // Eureka: Physics and Engineering. 2023. № 2. С. 209–221. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002814>.

213. Isakulov, B. Structure formation and curing stage of arbolite–concrete composites based on iron-sulfur binders / B. Isakulov, A. Issakulov, A. Dąbska // Infrastructures. 2025. Vol. 10, № 7. Art. 179. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10070179>.

214. Jan, C. A Multiscale Network Model for Simulating Moisture Transfer Properties of Porous Media / C. Jan, D. Filip, H. Geert // Transport in Porous Media. 1999. Vol. 35. P. 67–88.

215. Janetti, B.M. Effect of evaporation cooling on drying capillary active building materials / B.M. Janetti, L.P.M. Colombo, F. Ochs, W. Feist // Energy and Buildings. 2018. Vol. 166. P. 550–560. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.048>.

216. Jiang, P.X. Numerical simulation of fluid flow and convection heat transfer in sintered porous plate channels / P.X. Jiang, X.C. Lu // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 49. P. 1685–1695. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.10.026>.

217. Junfeng, L.U. Review: Heat and mass transfer in porous medium, mathematic/numerical models and research directions / L.U. Junfeng, L.U. Wen-qiang // International Journal of Petrochemical Science and Engineering. 2018. Vol. 3. P. 97–100.

218. Kadem, S. 3d-Transient modeling of heat and mass transfer during heat treatment of wood / S. Kadem, A. Lachemet, R. Younsi [et al.] // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 38. P. 717–722. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.03.026>.

219. Karima, S. Numerical Study of Heat and Mass Transfer during the Evaporative Drying of Porous Media / S. Karima, F. M'barek, L. Nabila [et al.] // MATEC Web of Conferences. 2020. Vol. 307. Art. 01050.
220. Khodaei, H. Multi-objective utilization of wood waste recycled from construction and demolition (C&D): products and characterization / H. Khodaei, C. Olson, D. Patino [et al.] // Waste Management. 2022. Vol. 149. P. 228–238. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.021>.
221. Klemczak, B. Modeling of Heat and Mass Transfer in Cement-Based Materials during Cement Hydration — A Review / B. Klemczak, A. Smolana, A. Jędrzejewska // Energies. 2024. Vol. 17, № 11. Art. 2513. <https://doi.org/10.3390/en17112513>.
222. Klemczak, B. Multi-Step Procedure for Predicting Early-Age Thermal Cracking Risk in Mass Concrete Structures / B. Klemczak, A. Smolana // Materials. 2024. Vol. 17, Issue 15. Art. 3700. <https://doi.org/10.3390/ma17153700>.
223. Kolesnikov, G. Modeling the Drying of Capillary-Porous Materials in a Thin Layer: Application to Thin-Walled Building Blocks / G. Kolesnikov, T. Gavrilov // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, № 19. Art. 6953. <https://doi.org/10.3390/app10196953>.
224. Kubis, M. Preliminary mathematical and numerical transient models of convective heating and drying of a brick / M. Kubis, T.S. Wisniewski, M. Jaworski // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 240. Art. 01022.
225. Kurata, Y. Concentrations of organic wood preservatives in wood chips produced from wood wastes / Y. Kurata, Y. Watanabe, Y. Ono, K. Kawamura // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2005. Vol. 7, Issue 1. P. 38–47. <https://doi.org/10.1007/s10163-004-0124-z>.
226. Lin, Q.H. Inhomogeneity in pore size appreciably lowering thermal conductivity for porous thermal insulators / Q.H. Lin, D.T. Zouab, W. Dongsheng [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 130. P. 1004–1011.
227. Liu, J.Y. Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies / J.Y. Liu, S. Cheng // International Journal of Heat and Mass

Transfer. 1991. Vol. 34, № 7. P. 1747–1754. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(91\)90264-V](https://doi.org/10.1016/0017-9310(91)90264-V).

228. Loganina, V. Humidity in the walls from aerated concrete for conditions Northeast Asia / V. Loganina, M. Frolov, E. Zhuravleva // E3S Web of Conferences. XXVI International Scientific Conference "Construction the Formation of Living Environment" (FORM-2023). EDP Sciences, 2023. Art. 04012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341004012>.

229. Loganina, V. Regularities of mass transfer in the finishing layer on the basis of a heat-insulating dry construction mixture in the process of moistening / V. Loganina, M. Frolov, G. Fokin, B.S.D. Al Saedi // Key Engineering Materials. 2022. Vol. 910 KEM. P. 592–597. <https://doi.org/10.4028/p-1q1714>.

230. Maaroufi, M. Experimental and numerical highlighting of water vapor sorption hysteresis in the coupled heat and moisture transfers / M. Maaroufi, F. Bennai, R. Belarbi, K. Abahri // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 40. Art. 102321.

231. Maier, D. Building materials made of wood waste a solution to achieve the sustainable development goals / D. Maier // Materials. 2021. Vol. 14, Issue 24. Art. 7638. <https://doi.org/10.3390/ma14247638>.

232. Mirosław, S. Analysis of Non-Equilibrium and Equilibrium Models of Heat and Moisture Transfer in a Wet Porous Building Material / S. Mirosław, W. Michał, Ł. Piotr [et al.] // Energies. 2020. Vol. 13. Art. 214. <https://doi.org/10.3390/en13010214>.

233. Moghaddam, A. A pore network study of evaporation from the surface of a drying non-hygroscopic porous medium / A. Moghaddam, K.A. Attari, E. Tsotsas [et al.] // AIChE Journal. 2018. Vol. 64. P. 1435–1447. <https://doi.org/10.1002/aic.16004>.

234. Morales-Conde, M.J. Composite mortars produced with wood waste from demolition: assessment of new compounds with enhanced thermal properties / M.J. Morales-Conde, P. Rubio-de-Hita, F. Pérez-Gálvez // Journal of Materials in Civil Engineering. 2018. Vol. 30, Issue 2. Art. 04017273. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002148](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002148).

235. Ndukwu, M.C. Influence of drying applications on wood, brick and concrete used as building materials: a review / M.C. Ndukwu, L. Bennamoun, M. Simo-Tagne [et al.] // *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2021. Vol. 6, № 1. Art. 24.

236. Nicole, V. Drying with Formation of Capillary Rings in a Model Porous Medium / V. Nicole, Y.J. Wang, K. Abdolreza [et al.] // *Transport in Porous Media*. 2015. Vol. 110. P. 197–223.

237. Nicole, V. On the Influence of Temperature Gradients on Drying of Pore Networks / V. Nicole, M. Thomas, T. Evangelos // *Proceedings of the European Drying Conference — EuroDrying'2011*. Palma, Spain, 2011. 26–28 October.

238. Pescari, S. Sustainability study of concrete blocks with wood chips used in structural walls in Seismic areas / S. Pescari, L. Budau, R. Ciubotaru, V. Stoian // *Materials*. 2022. Vol. 15, Issue 19. Art. 6659. <https://doi.org/10.3390/ma15196659>.

239. Quiroga, A. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood-cement composites and of *Populus Euroamericana* wood fibers / A. Quiroga, V. Marzocchi, I. Rintoul // *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 84. P. 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.069>.

240. Raoof, A. Pore Flow: A complex pore-network model for simulation of reactive transport in variably saturated porous media / A. Raoof, H.M. Nick, S.M. Hassanizadeh [et al.] // *Computers & Geosciences*. 2013. Vol. 61. P. 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.08.005>.

241. Robey, N.M. Metals content of recycled construction and demolition wood before and after implementation of best management practices / N.M. Robey, H.M. Solo-Gabriele, A.S. Jones [et al.] // *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 242. P. 1198–1205. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.134>.

242. Seredynski, M. Investigation of the equilibrium and non-equilibrium models of heat and moisture transport in a wet porous building material / M. Seredynski, M. Wasik, P. Łapka [et al.] // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 128. Art. 06008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912806008>.

243. Smith, D. Sawdust concrete: researchers in quest to replace gravel with wood // *Construction Research and Innovation*. 2017. Vol. 8, Issue 3. P. 91–94. <https://doi.org/10.1080/20450249.2017.1367170>.

244. Sokolova, Y.A. The study of creep and deformation properties of sulfur-containing arbolit exposed to various compression stresses / Y.A. Sokolova, A.G. Sokolova, M.V. Akulova [et al.] // *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 899 KEM. P. 137–143. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.899.137>.

245. Sosoi, G. Experimental investigation on mechanical and thermal properties of concrete using waste materials as an aggregate substitution / G. Sosoi [et al.] // *Materials*. 2022. Vol. 15, Issue 5. Art. 1728. <https://doi.org/10.3390/ma15051728>.

246. Surasani, V.K. Drying Simulations of Various 3D Pore Structures by a Nonisothermal Pore Network Model / V.K. Surasani, T. Metzger, E. Tsotsas // *Drying Technology*. 2010. Vol. 28. P. 615–623. <https://doi.org/10.1080/07373931003788676>.

247. Thandavamoorthy, T.S. Wood waste as coarse aggregate in the production of concrete / T.S. Thandavamoorthy // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2016. Vol. 20, Issue 2. P. 125–141. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1016631>.

248. Verma, A. Fractal description of microstructures and properties of dynamically evolving porous media / A. Verma, R. Pitchumani // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 81. P. 51–55. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.11.008>.

249. Wang, C.-C. Application of the maximum principle for differential equations in combination with the finite difference method to find transient approximate solutions of heat equations and error analysis / C.-C. Wang // *Numerical Heat Transfer, Part B*. 2009. Vol. 55, № 1. P. 56–72. <https://doi.org/10.1080/10407790802557524>.

250. Wasik, M. Initial credibility analysis of a numerical model of heat and moisture transfer in porous building materials / M. Wasik, Ł. Cieslikiewicz, P. Łapka [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2078. Art. 020106.

251. Whitaker, S. Coupled transport in multiphase systems: A theory of drying / S. Whitaker // *Advances in Heat Transfer*. 1998. Vol. 31. P. 1–104.

252. Xiang, L. The Brooks and Corey Capillary Pressure Model Revisited from Pore Network Simulations of Capillarity-Controlled Invasion Percolation Process / L. Xiang, K. Abdolreza, A. Hadi [et al.] // *Processes*. 2020. Vol. 8. Art. 10.
253. Xiang, L. Transport parameters of macroscopic continuum model determined from discrete pore network simulations of drying porous media / L. Xiang, K. Abdolreza, T. Evangelos // *Chemical Engineering Science*. 2020. Art. 115723. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115723>.
254. Yıldız, S. A. Optimization of concrete with human hair using experimental study and artificial neural network via response surface methodology and ANOVA / S. A. Yıldız, M. Karalar, C. Aksoylu [et al.] // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, no. 1. P. 27215. DOI 10.1038/s41598-025-12782-1.
255. Yingying, W. Effect of moisture migration and phase change on effective thermal conductivity of porous building materials / W. Yingying, M. Chao, L. Yanfeng [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 125. P. 330–342.
256. Yuan, Y. Pore Network Analysis of Zone Model for Porous Media Drying / Y. Yuan, Z. Zhao, J. Nie [et al.] // *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. Vol. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/624145>.
257. Zilong, D. Heat Conduction in Porous Media Characterized by Fractal Geometry / D. Zilong, L. Xiangdong, H. Yongping [et al.] // *Energies*. 2017. Vol. 10. Art. 1230.
258. Zwicky, D. Mechanical properties of organic-based lightweight concretes and their impact on economic and ecological performances / D. Zwicky // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 245. Art. 118413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118413>.

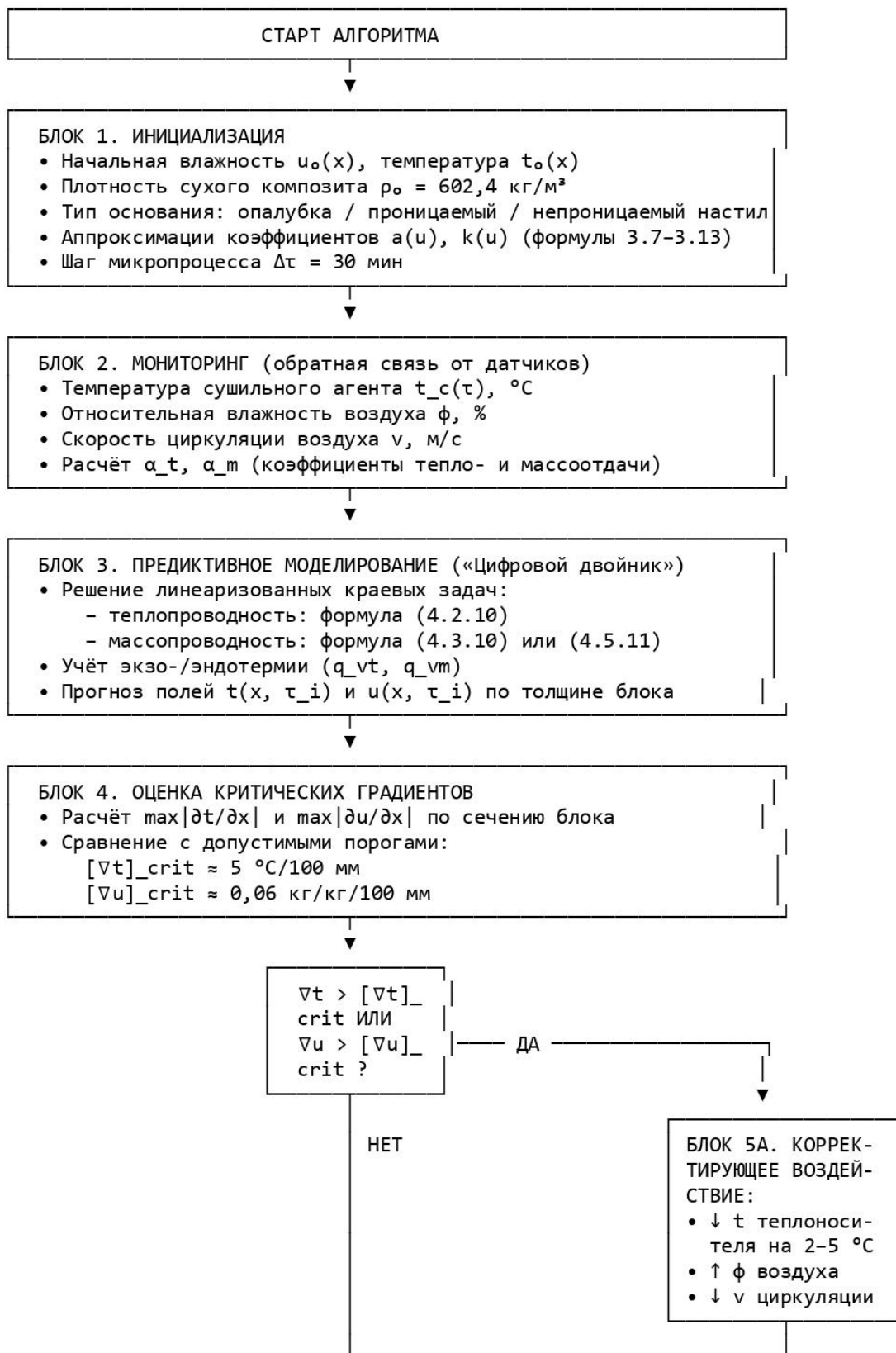
Список нормативной литературы

1. "ГОСТ 19222-2019. Межгосударственный стандарт. Арболит и изделия из него. Общие технические условия" (введен в действие Приказом Росстандарта от 06.06.2019 N 295-ст)
2. "ГОСТ 21523.3.1-93. Межгосударственный стандарт. Древесина модифицированная. Метод определения теплоемкости" (введен в действие Постановлением Госстандарта России от 02.06.1994 N 160)
3. "ГОСТ 23250-78. Материалы строительные. Метод определения удельной теплоемкости." (утв. Постановлением Госстроя СССР от 14.07.1978 N 130)
4. "ГОСТ Р 54854-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Бетоны легкие на органических заполнителях растительного происхождения. Технические условия" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 15.12.2011 N 1559-ст)
5. "ГОСТ Р 57712-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Композиты полимерные. Метод определения удельной теплоемкости" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 26.09.2017 N 1239-ст)
6. "ГОСТ Р 57969-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Композиты полимерные. Определение удельной теплоемкости методом дифференциальной сканирующей калориметрии с температурной модуляцией" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 21.11.2017 N 1787-ст)
7. "ГОСТ Р 70007-2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Блоки опалубки из арболита. Технические условия" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 11.02.2022 N 65-ст)
8. "ГОСТ Р 70007-2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Блоки опалубки из арболита. Технические условия" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 11.02.2022 N 65-ст)
9. "ГОСТ Р 71023-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Изделия теплоизоляционные древесноволокнистые, применяемые в строительстве. Технические условия" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 19.10.2023 N 1201-ст)
10. "РД 153-34.0-20.364-00. Руководящий документ. Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования" (утв. РАО "ЕЭС России" 26.04.2000)
11. "Рекомендации по расчету и изготовлению изделий из поризованного арболита" (утв. НИИЖБ Госстроя СССР 27.12.1982)

12. "Рекомендации по ускоренному определению токсичности антисептиков, биостойкости древесины и древесных пластиков, с применением радиоактивных изотопов. 2-е издание, переработанное и дополненное"
13. "СН 549-82. Инструкция по проектированию, изготовлению и применению конструкций и изделий из арболита" (утв. Постановлением Госстроя СССР от 04.05.1982 N 116)
14. ВСН 43-96. Ведомственные строительные нормы по теплотехническим обследованиям наружных ограждающих конструкций зданий с применением малогабаритных тепловизоров" (утв. Управлением развития Генплана 01.07.1996)
15. ГОСТ 10180-2012. "Межгосударственный стандарт. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам" (введен в действие Приказом Росстандарта от 27.12.2012 N 2071-ст)
16. ГОСТ 12730.0-2020. "Межгосударственный стандарт. Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости" (введен в действие Приказом Росстандарта от 22.12.2020 N 1340-ст)
17. ГОСТ 12730.1-2020. "Межгосударственный стандарт. Бетоны. Методы определения плотности" (введен в действие Приказом Росстандарта от 22.12.2020 N 1341-ст)
18. ГОСТ 12730.1-2020. "Межгосударственный стандарт. Бетоны. Методы определения плотности" (введен в действие Приказом Росстандарта от 22.12.2020 N 1341-ст)
19. ГОСТ 12730.2-2020. "Межгосударственный стандарт. Бетоны. Метод определения влажности" (введен в действие Приказом Росстандарта от 22.12.2020 N 1342-ст)
20. ГОСТ 12730.3-2020. "Межгосударственный стандарт. Бетоны. Метод определения водопоглощения" (введен в действие Приказом Росстандарта от 22.12.2020 N 1343-ст)
21. ГОСТ 23732-2011. "Межгосударственный стандарт. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия" (введен в действие Приказом Росстандарта от 31.05.2012 N 97-ст)
22. ГОСТ 24211-2008. "Межгосударственный стандарт. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия" (введен в действие Приказом Ростехрегулирования от 29.04.2010 N 70-ст) (ред. от 27.11.2015)
23. ГОСТ 25192-2012. "Межгосударственный стандарт. Бетоны. Классификация и общие технические требования" (введен в действие Приказом Росстандарта от 27.12.2012 N 2003-ст) (ред. от 21.06.2023)

24. ГОСТ 28840-90. "Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования" (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 29.12.1990 N 3530)
25. ГОСТ 3044-84 (СТ СЭВ 1059-85) Преобразователи термоэлектрические. Номинальные статические характеристики преобразования (с Изменениями N 1-3)
26. ГОСТ 30515-2013. "Межгосударственный стандарт. Цементы. Общие технические условия" (введен в действие Приказом Росстандарта от 11.06.2014 N 654-ст) (ред. от 18.05.2021)
27. ГОСТ 31108-2020. "Межгосударственный стандарт. Цементы общестроительные. Технические условия" (введен в действие Приказом Росстандарта от 04.08.2020 N 453-ст) (ред. от 15.09.2023)
28. ГОСТ 8.140-2009. Межгосударственный стандарт. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений теплопроводности твердых тел в диапазоне от 0,02 до 20 Вт/(м x К) при температуре от 90 до 1100 К" (введен в действие Приказом Ростехрегулирования от 10.12.2009 N 665-ст)
29. ГОСТ Р 53228-2008. "Национальный стандарт Российской Федерации. Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания" (утв. Приказом Ростехрегулирования от 25.12.2008 N 739-ст) (ред. от 25.04.2013)
30. ГОСТ Р 54855-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Материалы и изделия строительные. Определение расчетных значений теплофизических характеристик" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 15.12.2011 N 1560-ст) (ред. от 17.09.2021)
31. ГОСТ Р 55134-2012 (ИСО 11357-1:2009). Национальный стандарт Российской Федерации. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 1. Общие принципы" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 16.11.2012 N 923-ст)
32. ГОСТ Р 56722-2015 (ИСО 11358-2:2014). Национальный стандарт Российской Федерации. Пластмассы. Термогравиметрия полимеров. Часть 2. Определение энергии активации" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 19.11.2015 N 1873-ст)
33. ГОСТ Р 57700.43-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Численное моделирование полимерных композиционных материалов. Верификация программного обеспечения" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 17.11.2023 N 1426-ст)
34. ГОСТ Р 57967-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Композиты. Определение теплопроводности твердых тел методом

- стационарного одномерного теплового потока с охранным нагревателем" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 21.11.2017 N 1785-ст)
35. ГОСТ Р 58949-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Бетоны и растворы строительные. Методы определения, правила контроля и оценки влажности в конструкциях" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 04.08.2020 N 459-ст)
 36. ТОСТ 6616-94. Межгосударственный стандарт. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия" (введен в действие Постановлением Госстандарта России от 23.04.1998 N 143)
 37. ГОСТ Р 70109-2022. "Национальный стандарт Российской Федерации. Защита от коррозии в строительстве. Бетоны. Общие требования к проведению испытаний" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 19.05.2022 N 338-ст)
 38. ГОСТ Р 8.736-2011. "Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 13.12.2011 N 1045-ст)
 39. ГОСТ Р ИСО 10456-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Материалы и изделия строительные. Тепловлажностные характеристики. Табличные значения расчетных теплотехнических характеристик и методы определения декларируемых и расчетных теплотехнических характеристик" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 31.08.2021 N 866-ст)
 40. Распоряжение Правительства РФ от 10.05.2016 N 868-р (ред. от 23.11.2016) <О Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу до 2030 г.>
 41. ТОСТ 12966-85. Межгосударственный стандарт. Алюминия сульфат технический очищенный. Технические условия" (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 30.09.1985 N 3183) (ред. 01.04.1998)
 42. ТОСТ 15815-83. Государственный стандарт союза ССР. Щепа технологическая. Технические условия" (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 24.08.1983 N 3948) (ред. от 01.10.1988)







ИП СОСНОВИКОВ И.И. (АРБОГРАД)
 ИНН 370649243601 ОГРНИП 321370200011034 ОКПО 2006250647
 БАНК Тульское отделение № 8604 ПАО СБЕРБАНК
 Р/счёт 40802810617000020702 Кор/счёт 30101810000000000608
 БИК 047003608

Юридический адрес: 155900, Ивановская область, г. Шуя, ул. 5-я Пушкинская, д. 3
 Фактический адрес: 153020, г. Иваново, ул. Окуловой, д. 61, лит. А56
 Почтовый адрес: 153020, г. Иваново, ул. 12-я Сосневская, д. 3 А.
 Эл. почта: arbograd37@mail.ru mail@arbograd.ru
 Тел. +7 996 354 92 07, +7 910 668 99 49
 Сайт www.arbograd.ru

**В диссертационный совет
 по присуждению ученых степеней**

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы
 г. Иваново 02.04.2026

Настоящий акт подтверждает внедрение в производственный процесс ИП Сосновиков И.И. (АРБОГРАД) результатов диссертационных исследований, изложенных в научных публикациях и диссертации Коринчука Михаила Александровича.

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.

Полученные практические результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения методов теории тепломассопереноса при проектировании и эксплуатации технологических линий производства арболита.

Дальнейшее развитие сотрудничества в части цифровизации производственных процессов и создания цифрового двойника участка сушки позволит обеспечить дополнительный резерв повышения конкурентоспособности продукции ИП Сосновиков И.И. (Арбоград) на рынке строительных материалов.

Руководитель



Сосновиков Илья Игоревич

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ивановский государственный политехнический университет»

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по образовательной
деятельности и воспитательной работе,
д.т.н., профессор
А.Ю. Матрохин



12 февраля 2026 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы
Коринчука Михаила Александровича на тему
«Разработка адаптивных технологий производства строительных
изделий из арболита методами цифровизации регулирования режимов
термовлажностной обработки»
в учебный процесс

Комиссия ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» в составе:

- проректор по образовательной деятельности и воспитательной работе, д.т.н., профессор Матрохин Алексей Юрьевич;
- начальник учебно-методического управления, к.т.н., доцент Дрягина Людмила Валерьевна;
- директор института архитектуры, строительства и транспорта, к.т.н., доцент Кормашова Елена Руфимовна;
- заведующий кафедрой строительства и инженерных систем, к.т.н., доцент Крушнов Евгений Иванович

составили настоящий акт о том, что результаты научных исследований, представленные в диссертационной работе Коринчука Михаила Александровича на тему «Разработка адаптивных технологий производства строительных изделий из арболита методами цифровизации регулирования режимов термовлажностной обработки» 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 теплообмен»; «Композиционные материалы» для обучения бакалавров направления 08.03.01 Строительство и магистров направления 08.04.01 Строительство.

Результаты научных исследований, представленные в диссертационной работе Коринчука Михаила Александровича на тему «Разработка адаптивных технологий производства строительных изделий из арболита методами цифровизации регулирования режимов термовлажностной обработки» заслушаны и обсуждены на заседании научно-методического совета Ивановского государственного политехнического университета, протокол № 2 от 12 февраля 2026 г.

Начальник учебно-методического управления,
к.т.н., доцент

Директор ИАСиТ,
к.т.н., доцент

Заведующий кафедрой СиИС,
к.т.н., доцент


Дрягина Л.В.


Кормашова Е.Р.


Крупнов Е.И.