

На правах рукописи



Баканов Максим Олегович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И
ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПЕНОСТЕКЛА**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Иваново – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Научный консультант: **Федосов Сергей Викторович**
Академик РААСН, д.т.н., профессор

Официальные оппоненты: **Черкасов Василий Дмитриевич**
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск

Богданов Василий Степанович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механическое оборудование» ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород

Рудобашта Станислав Павлович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплотехника, гидравлика и энергообеспечение предприятий» ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Защита состоится 25 февраля 2022 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного политехнического университета по адресу: 153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 21 и на официальном сайте университета <http://www.ivgpu.com/>

Автореферат разослан « » января 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.355.01
к.т.н., доцент



Н.В. Заянчуковская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Процессы высокотемпературной термической обработки (ВТО) играют важную роль в широком межотраслевом спектре технологических процессов, поэтому совершенствование и модернизация существующих принципов и подходов, а также разработка новых высокоэффективных режимов ВТО напрямую соответствует приоритетному направлению технологического развития не только строительной, но и смежных отраслей промышленности.

Исследования проблематики ВТО привели к разработке значительного числа моделей, описывающих динамику макрофизических параметров вследствие изменения показателей температуры, в том числе для производства стеклокристаллических материалов, например пеностекла. Учет в таких моделях различных факторов, определяющих кинетику суммарного процесса или его отдельных стадий, привел к формированию еще более широкого диапазона моделей для расчета процессов ВТО в химико-технологических процессах. Однако существующее разнообразие подходов мало продвинуло инженерные методы расчета ВТО, которые в значительной степени продолжают опираться на количественные параметры сырьевых материалов для вспенивания пеностекла и кинетику порообразования на стадии вспенивания и формирования пористой структуры. Такой подход не всегда способен обеспечить необходимую точность прогноза, особенно при изменении технологических параметров оборудования или при выходе режимных параметров за границу исследованного диапазона. Кроме того, исключается постановка и решение задач оптимального управления процессами, что может составлять значительный резерв повышения эффективности их проведения. Разнообразные модели, предлагающие более глубокий математический анализ процессов ВТО и, как правило, рассматривающие механизмы теплопереноса, могли бы дать ответы на многие вопросы, возникающие при эксплуатации и проектировании технологических линий для производства пористых стеклокристаллических материалов на примере пеностекла. Однако подобные модели практически недоступны для инженерной практики из-за сложности и вычислительной громоздкости, а главное, перегруженности многочисленными параметрами, идентификация которых затруднительна или невозможна. Таким образом, разработка эффективных математических инструментов для описания протекания процессов ВТО остается актуальной. При этом обращение к моделям, основанным на теории теплопроводности с применением метода «микропроцессов» академика С.В. Федосова, выглядит, на наш взгляд, наиболее оправданным, так как они занимают промежуточную позицию между моделями, оперирующими с бесконечно малыми промежутками времени термического воздействия на материал, и моделями, рассматривающими процесс ВТО как одно целое, что, в конечном счете, позволит рассмотреть обе эти предельные ситуации.

Степень разработанности темы. Проблемам расчета процессов ВТО посвящено значительное количество исследовательских работ, среди которых широкую известность имеют обобщающие монографии под редакцией отечественных (И.И. Китайгородского, Т.М. Кешишяна, Б.К. Демидовича, Ф. Шилла, Г.Л. Осипова, Ю.П. Горлова, А.А. Кетова, Н.И. Минько, В.С. Лесовика, В.С. Бессмертного, Е.А. Яценко, О.В. Казьминой, Л.К. Казанцевой, Б.М.

Румянцева, Р.Г. Мелконяна, Д.Р. Дамдиновой, А.И. Шутова, В.И. Заборова, Н.И. Иванова и др.) и иностранных (А.А. Аппена, А.С. Steiner, J.M. Hermans, S. Köse, С. Dreyfus, G. Dreyfus, К.Н. Karlsson, R. Backman) ученых. Поскольку такие труды являются результатом анализа большого числа более частных исследований, то итоговые выводы также остаются неоднозначными. Более того, для расчета одного параметра в подобных изданиях можно найти зависимости, дающие на порядок разнящиеся результаты. Теоретической базой для моделирования процессов термообработки, создания инженерных методов их расчета и оптимизации является теория теплопереноса, учитывающая взаимосвязь и взаимозависимость между тепловыми характеристиками обрабатываемого материала и источником высокой температуры. Значительные достижения в этой области принадлежат А.В. Лыкову, В.Ф. Фролову, С.П. Рудобаште, С.В. Федосову, Н.Ц. Гатаповой, В.Е. Румянцевой и др.

Целью работы является разработка научных основ моделирования процессов высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси для получения пористых стеклокристаллических материалов на основе пеностекла. Это включает в себя разработку общего методологического подхода к исследованию и моделированию режимов высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси для получения пористых стеклокристаллических материалов на основе пеностекла, создание рациональных технологических подходов к процессу получения блочного пеностекла в рамках концепции его производства, определение и исследование закономерностей высокотемпературных режимов термической обработки такими моделями и прогнозирование конечных эксплуатационных свойств готового материала.

Реализация цели предполагает решение следующих **задач исследования**:

1. Разработать методологию математического описания процессов высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси для получения пористых стеклокристаллических материалов на основе пеностекла.

2. Предложить универсальные методики идентификации параметров математических моделей процесса высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси для получения пористых стеклокристаллических материалов на основе пеностекла.

3. Разработать нелинейные математические модели процессов теплопереноса при высокотемпературной термической обработке пеностекла.

4. Охарактеризовать влияние макрофизических параметров теплофизических и химических процессов, протекающих в сырьевой смеси, для получения пеностекла, на физико-технические параметры готового материала.

5. Провести эмпирическую верификацию предложенных моделей теплопереноса при высокотемпературной термической обработке пеностекла на основе экспериментальных исследований.

6. Выполнить опытно-промышленную апробацию разработанных моделей теплопереноса при высокотемпературной термической обработке пеностекла и внедрение полученных результатов при решении технико-экономических задач и совершенствования режимного и аппаратурного оформления технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения.

Объектом исследования является процесс высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси для получения пористых стеклокристаллических материалов на основе пеностекла.

Предметом исследования является математическое моделирование и экспериментальное исследование взаимного влияния теплофизических и химических процессов, сопровождающихся изменением макрофизических параметров сырьевой смеси для получения пористых стеклокристаллических материалов на основе пеностекла.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Установлено, что на формирование структуры и свойств пеностекол в значительной степени оказывают влияние повышенная реакционная способность поверхности, которая проявляется как при спекании сырьевой смеси, так и при образовании собственно пористой структуры материала. Показано, что структура поверхности стекла отличается от структуры в массе стекла. Для повышения качества перемешивания компонентов газообразующей смеси можно использовать растворы веществ, повышающих смачиваемость газообразователя, что дает возможность равномерно распределить газообразователь в тонкодисперсной сырьевой смеси, а значит, позволяет создать необходимые условия для равномерного выделения газовой фазы по всему объему пеностекла.

2. Разработаны методологические основы нового подхода к моделированию и расчету процессов высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси для получения пористых стеклокристаллических материалов на основе пеностекла, отличающегося *тем, что*:

2.1 совокупность процессов, входящих в цикл высокотемпературной термической обработки, представлена в модели в виде временных стадий, формализованных временными масштабами процессов формирования необходимой высокопористой структуры, что позволяет рассмотреть весь цикл термического воздействия как систему с учетом аддитивности временных параметров в зависимости от особенностей физических процессов теплопереноса и динамики формирования пористой структуры;

2.2 в качестве основы для моделирования динамики расплава сырьевой смеси использовали уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости (Навье–Стокса) и уравнение неразрывности в сферических координатах, принимая во внимание, что скорость движения жидкости вокруг пузырька имеет только радиальную составляющую и вследствие сферической симметрии пор;

2.3 учтено, что во время реализации высокотемпературной термической обработки значительное влияние оказывают показатели коэффициента динамической вязкости расплава сырьевой смеси, установлено, что с уменьшением вязкости на процесс роста поры существенное влияние оказывает внешнее давление в камере печи вспенивания.

3. Предложена математическая модель, описывающая процессы теплопереноса в результате воздействия высокой температуры на сырьевую смесь для получения пеностекла, в частности:

3.1 разработана модель нестационарного теплопереноса в слое сырьевой смеси для расчета нестационарных температурных полей с учетом циклического изменения температурных условий в местах контакта металлической формы для вспенивания пеностекла с композитом сырьевой смеси на стадиях нагревания и охлаждения.

4. Проведено экспериментальное исследование процесса охлаждения блока пеностекла, в основе которого выявлено соответствие основных положений математического моделирования процессов теплопереноса в структуре пеностекла

и результатов натурного эксперимента. Проведен анализ показателей температуры блока из пеностекла в рассматриваемых точках контроля, который свидетельствует о достаточной сходимости экспериментальных данных и результатов математического моделирования, что обосновывает адекватность разработанной математической модели реальному физическому процессу.

5. На основе предложенного подхода разработаны нелинейные математические модели и средства их программной реализации, позволяющие осуществлять прогнозирование основных макрофизических параметров пеностекла и весь цикл высокотемпературной термической обработки:

5.1 динамические процессы термического вспенивания стекольной шихты для управления пористостью пеностекла;

5.2 моделирование и расчет температурных полей в твердых пористых теплоизоляционных материалах при различных условиях термической обработки;

5.3 временные параметры вспенивания и отжига сырьевой смеси для получения пеностекла.

6. На основе полученных и известных экспериментальных данных проведена верификация предложенных моделей процессов высокотемпературной термической обработки пеностекла.

7. Разработана математическая модель теплопереноса на стадии самопроизвольного остывания пеностекольного блока, которая позволяет провести исследование закономерностей распределения показателей температуры блока пеностекла, проведено исследование адекватности математической модели и доказана высокая сходимость результатов моделирования и экспериментальных измерений показателей температуры в заданных точках контроля.

Научная гипотеза заключается в разработке методологии научного подхода, особенностью которого является то, что весь процесс синтеза теплоизоляционного пеностекольного изделия представляется непрерывной цепью стадий: предварительной подготовки шихты; высокотемпературной обработки с регулируемой цикличностью динамики температурных полей и пористой структуры; последующими стадиями отжига и логистических операций. Отличительной особенностью является включение корректирующих операторов на каждой стадии процесса по данным перманентного контроля эксплуатационных свойств готового продукта.

Теоретическая значимость результатов работы состоит в разработке методологических основ нового подхода к моделированию и расчету процессов высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси для получения пористых стеклокристаллических материалов на основе пеностекла, основанного на моделях теплопереноса, и позволяющего учесть взаимное влияние текущих значений макрофизических параметров сырьевой смеси и физико-технических параметров готового материала. Для ряда физических процессов, в том числе сопровождающихся активным газовыделением, разработаны алгоритмические и программные средства реализации нового подхода в практике моделирования и расчета. На основе проведенных и известных экспериментальных данных установлена связь между текущими характеристиками процесса и параметрами идентификации модели.

Практическая значимость состоит в разработке инженерных методов расчета, создании для них алгоритмов и разработке эффективных программных средств реализации необходимых вычислений, позволяющих инженеру-

пользователю применить зарегистрированные в Госреестре программные продукты для расчета и проектирования нового оборудования, а также для разработки проектов модернизации действующего оборудования. Часть разработанных программных продуктов нашла практическое применение на промышленных предприятиях: ООО ТД «СЗПК», ЗАО «Сланцевский Завод Стальных Конструкций», ООО «Снабарматура СПб», ООО «ГРАНГЛАС». Общим экономическим эффектом свыше 15 млн. руб. в год.

Методология исследования. Основу методологии составляют принципы системного подхода, реализуемые через теоретическое обоснование и формулирование проблемной ситуации, рассмотрение и анализ способов решения проблемы, определение целей исследования и критериев их достижения, выбор средств достижения целей и степени декомпозиции системы, построение математической модели, планирование и выполнение экспериментов, связанных с параметрической идентификацией и верификацией математических построений.

Методы исследования. Математическое моделирование процессов высокотемпературной термической обработки выполнено на основе математического аппарата теории теплопереноса, теории «микропроцессов» академика С.В. Федосова, при исследовании динамики процесса порообразования применяли математическое моделирование с использованием численных методов и их реализации в виде программ на ЭВМ. Параметрическая идентификация моделей проведена с использованием комплекса стандартных физико-механических и физико-химических методов анализа.

Положения выносимые на защиту:

1. Математическая модель высокотемпературной термической обработки пеностекла в виде временных стадий, формализованных временными масштабами процессов формирования необходимой высокопористой структуры с учетом аддитивности временных параметров.

2. Математическая модель, описывающая процессы теплопереноса в результате воздействия высокой температуры на сырьевую смесь для получения пеностекла, в частности: математическая модель нестационарного теплопереноса в слое сырьевой смеси для расчёта двумерных нестационарных температурных полей с учётом изменения температурных условий в местах контакта металлической формы для вспенивания пеностекла с композитом сырьевой смеси на стадиях нагревания и охлаждения.

3. Математическая модель роста единичной поры в расплаве сырьевой смеси для получения пеностекла на основе уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости (Навье–Стокса) и уравнение неразрывности в сферических координатах.

4. Результаты численных расчетов температурных полей в сырьевой смеси для получения пеностекла при двумерной постановке задачи теплопроводности.

5. Результаты экспериментального исследования математического моделирования процессов теплопереноса в пеностекле на адекватность.

6. Логико-математическое описание технологического процесса производства пеностекла на основе методов сетевого моделирования.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования; совпадением результатов расчета макрофизических параметров сырьевой смеси и экспериментальных данных; сопоставлением полученных

результатов с опубликованными результатами исследований других авторов; проведением экспериментальных исследований в условиях промышленной эксплуатации с использованием стандартизованных методов и средств измерения параметров.

Направление исследования отвечает **паспорту специальности 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы»**. Работа выполнена в соответствии со следующими пунктами **паспорта специальности ВАК**: в части **формулы специальности** – «Решение проблем данной области знаний требует научно-технического обоснования новых эффективных методов и технологий проектирования, создания и модернизации процессов, машин и агрегатов и их эксплуатации в различных отраслях промышленности»; в части **области исследования специальности** – «Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов...»; «Разработка научных и методологических основ повышения производительности... процессов...».

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в обосновании целей и задач исследования, разработке научных основ нового подхода к моделированию и расчету процессов высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси для получения пористых стеклокристаллических материалов на основе пеностекла, составлении алгоритмов расчетов и разработке соответствующего программного обеспечения, проведении численных экспериментов, планировании и проведении натуральных экспериментов, обработке и интерпретации результатов расчетно-экспериментальных исследований, в обнародовании результатов исследования в форме публикаций, свидетельств регистрации программных средств, в реализации промышленной апробации результатов исследования.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 13 международных конференциях: XVIII Международном научно-практическом форуме «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2015)» (Иваново, 2015); Международной научной конференции «Наука – XXI век» (Москва, 2015); научно-практической конференции к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Ю.М. (Белгород, 2015); Международной on-line конференции к 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, член-корреспондента РААСН, доктора технических наук Лесовика В.С. «Интеллектуальные композиты для зеленого строительства» (Белгород, 2016); VII Международной научной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Москва, 2018); X Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск, 2018); II Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в архитектуре и дизайне» (Харьков, 2018); II Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии» (Иваново, 2018); Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2019» (ICMTMTE 2019) (Севастополь, 2019); Международной научно-технической конференции «Строительство и архитектура: теория и практика инновационного развития» (SATPID-2019) (Кисловодск, 2019); VII Международной научно-

практической конференции «Концепции и практические основания устойчивого развития города» (Тамбов, 2020); VII Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика А.В. Лыков «Современны энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2020» (Москва, 2020); VI Международной сетевой научно-практической конференции «Интеграционные процессы в научно-техническом и образовательном пространстве» вузов-участников Российско-Кыргызского консорциума технических университетов (РККТУ) (Бишкек, 2020); III Международном Косыгинском форуме «Современные задачи инженерных наук» МНТС «Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященном 110-летию А.Н. Плановского» (Москва, 2021).

Публикации. Основные положения диссертации представлены в 51 опубликованной работе, в том числе: 15 работ в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень, определенный ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук; 5 работ, входящих в научные издания, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science; получено 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 база данных и монография.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов и результатов по работе, списка использованных источников из 231 наименования. Текст диссертации изложен на 330 страницах машинописного текста, содержит 95 рисунков, 21 таблицу и 18 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена степень разработанности и обоснована актуальность темы исследования, определены цели и содержание поставленных задач научной работы, сформулирован объект, предмет и методология исследования, показана научная новизна, практическая и теоретическая значимость результатов работы, достоверность результатов, обоснована принадлежность диссертации к заявленной научной специальности, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу состояния науки и практики в области технологических подходов по производству пеностекла, особенностям получения, видам и области применения ячеистого стекла, проведен анализ проблем в области моделирования теплоизоляционных характеристик. Сформулирована цель диссертационного исследования и задачи для ее достижения, разработана структурно-логическая схема исследования (рис. 1).

Показано, что в промышленности в настоящее время пеностекло производят преимущественно порошковым методом, так как он имеет ряд преимуществ перед другими способами получения пеностекла. Использование методов его получения из расплавов позволяет получать материал плотностью 300–700 кг/м³ при температурах 1400–1450 °С, тогда как при порошковом способе при температуре вспенивания 800–900 °С и минимальная плотность готового материала при этом составляет 100–150 кг/м³. Холодный способ является трудоемким, так как отформованное, но неотожженное пеностекло является нестабильным до затвердения пены.

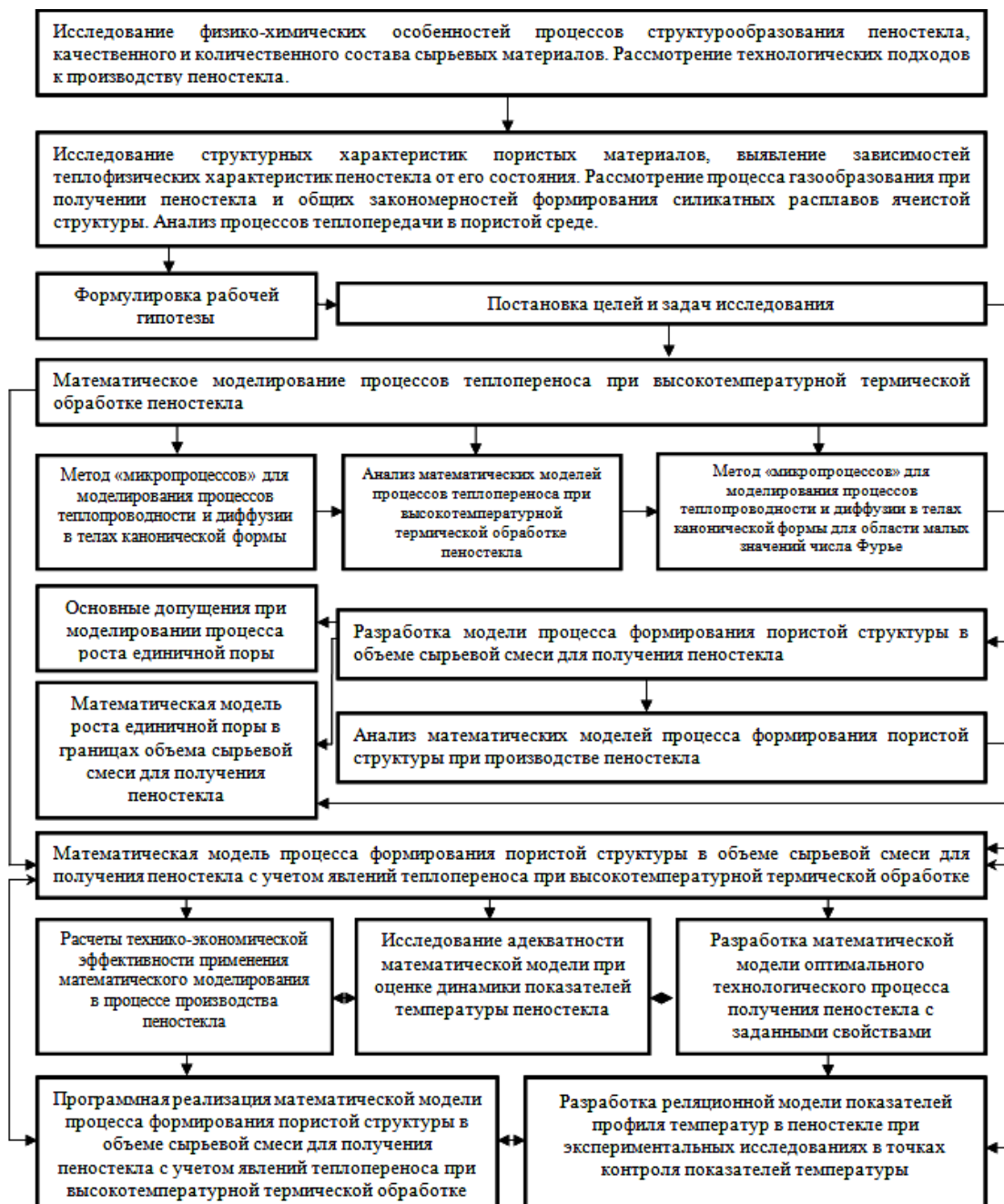


Рисунок 1 – Структурно-методологическая схема исследований

Отожженное пеностекло обладает худшими эксплуатационными характеристиками, а именно низкой прочностью и высоким водопоглощением, снижающими теплоизоляционные характеристики в процессе эксплуатации такого пеностекла в конструкциях зданий и сооружений. Таким образом, порошок является наиболее целесообразным с точки зрения энергозатрат при производстве пеностекла (рис. 2).

Порошковый метод основывается на том, что смесь тонкоизмельченного стекла и газообразователя нагревают в огнеупорных, обычно металлических формах до спекания и вспенивания. Полученные таким образом блоки пеностекла затем медленно отжигают или в формах в той же туннельной печи, в которой производилось газообразование, или же после извлечения из форм во второй туннельной печи при температуре порядка 600 ± 50 °С. Отожженные блоки обрабатывают резанием и шлифованием до точных размеров.

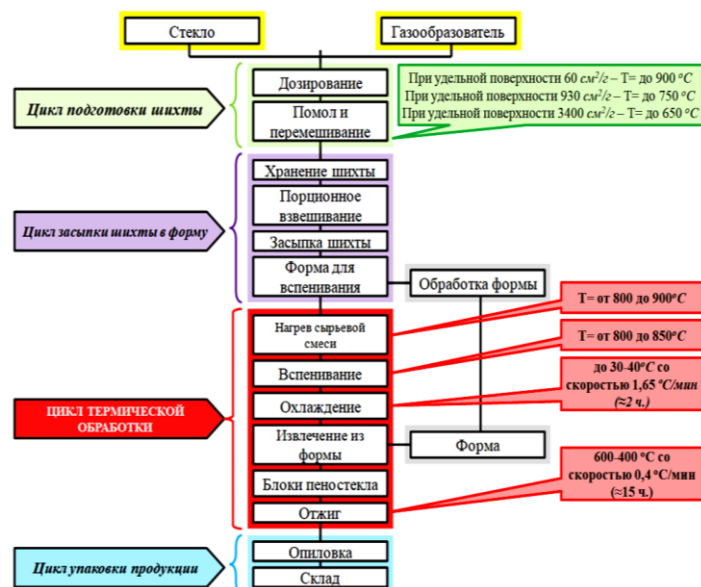


Рисунок 2 – Схема производства пеностекла по порошковой технологии

Проведен анализ количественных и качественных параметров основных компонентов сырьевой смеси для получения пеностекла, который показывает, что при образовании пеностекла решающую роль играет большая удельная поверхность сырьевой смеси. Показано, что структура поверхности стекла отличается от структуры в массе стекла. Очевидным следствием структурных изменений поверхности стекла является повышенная реакционная способность поверхности, которая проявляется как при спекании сырьевой смеси, так и при образовании пористой структуры материала.

Показано, что на развитие пористой структуры пеностекла также влияет дисперсность газообразователя и качество его перемешивания. Для повышения качества перемешивания компонентов газообразующей смеси можно использовать растворы веществ, повышающих смачиваемость газообразователя, что дает возможность равномерно распределить газообразователь в тонкодисперсной сырьевой смеси, а значит, позволяет создать необходимые условия для равномерного выделения газовой фазы по всему объему пеностекла.

Основным требованием к химическому составу стекла следует отнести его кристаллизационные и вязкостные характеристики. Устойчивость стекла к кристаллизации в температурном интервале вспенивания необходима для получения пеностекла с замкнутой и однородной пористой структурой на том основании, что при кристаллизации изменяется состав стекловидной фазы и в ее легкоплавкой, менее вязкой фазе возрастает возможность образования каналов в стенках пор пеностекла или газообразование прекращается полностью.

Выявленные особенности демонстрируют многофакторность взаимного влияния физико-химических показателей компонентов, входящих в состав сырьевой смеси для получения пеностекла, технологических параметров процесса высокотемпературной обработки, а также кинетики процесса термического разложения газообразователя.

Для разработки математического описания процесса ВТО в виде временных стадий, формализованных временными масштабами процессов формирования необходимой высокопористой структуры предлагается представить весь процесс как совокупность трех основных стадий (1).

$$\tau_{ВТО} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \quad (1)$$

где $\tau_{ВТО}$ – время, необходимое для высокотемпературной термической обработки пеностекла (c); τ_1 – это время первой стадии процесса ВТО, необходимое для нагрева пеностекляной шихты до температуры разложения газообразователя (c). τ_2 – характеризует время, необходимое для формирования поры размером R (c); τ_3 – соответствует времени остывания пеностекляного блока (c).

Вторая глава посвящена разработке математической модели процесса теплопереноса при высокотемпературной термической обработке пеностекла в одномерной постановке задачи. Приведены общие положения математического моделирования процессов теплопереноса при ВТО пеностекла, сформулирована физическая и математическая постановка задачи для расчета процессов теплопереноса при ВТО пеностекла (расчет одномерного поля температур).

При разработке математической модели следует учитывать тот факт, что сырьевая смесь, засыпанная в форму, представляет собой хаотическую структуру, что вызывает определенные трудности при математическом описании, поэтому необходимо эту структуру представлять как упорядоченную, которая будет отражать все основные особенности исходной структуры.

В случаях, когда время выдержки сырьевой смеси при вспенивании недостаточно для того, чтобы зерна стекла оплавившись по всему объему материала, центры сырьевой смеси не успевают оплавиться и тем самым остаются непоризованными. Однако, когда время вспенивания значительно превышает время плавления зерен стекла, происходит спекание приповерхностных слоев сырьевой смеси, т.к. источники газообразования посредством прогрева полностью выгорают, а вязкость стекла уменьшается, и поверхностное напряжение не позволяет задержать выделенную газовую фазу в образовавшихся сферах пор, которая выходит в камеру печи для вспенивания, и, таким образом, центральная часть сырьевой смеси становится более поризованной, чем в приповерхностных слоях.

Таким образом, предполагаем, что распределение температурных полей по сырьевой смеси проходит от приповерхностных областей смеси к центру.

При разработке математической модели, способной учитывать изменение физико-химических свойства сырьевой смеси, возникают затруднения, для решения которых требуется применение упрощенных (или приближенных) математических моделей переноса тепла.

В общем случае краевые задачи переноса теплоты могут быть представлены нелинейными неоднородными дифференциальными уравнениями параболического типа в частных производных.

На первых этапах моделирования задали граничные условия и решали плоскую задачу для одной из координат. На рисунке 3 представлена геометрическая модель, используемая для постановки задачи.

Краевая задача теплопроводности для координаты x :

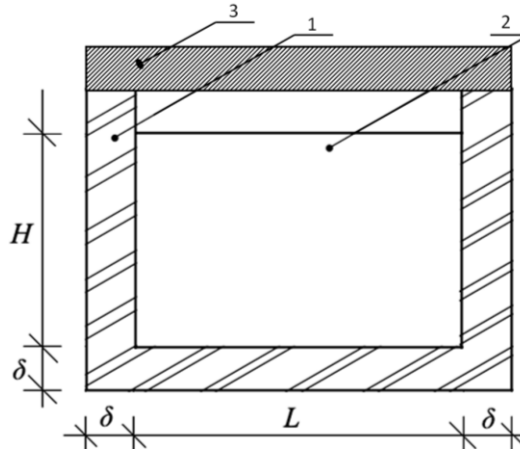
$$\rho c \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x^2} = \lambda \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad (2)$$

Начальное условие:

$$t(x, \tau)|_{\tau=0} = \tau_0(x), \quad (3)$$

Граничные условия, соответственно, первого и второго рода:

$$t(x, \tau)|_{x=0} = \tau_n, \quad (4)$$



1 – металлическая форма; 2 – сырьевая смесь; 3 – крышка для формы вспенивания

Рисунок 3 – Геометрическая модель, используемая для постановки задачи

$$\left. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=L/2} = 0. \quad (5)$$

Начальное условие (3) показывает, что в момент времени, принимаемый за начало отсчета, в слоях сырьевой смеси имеется произвольное распределение температур по координате, которое должно иметь аналитическое описание.

Граничное условие (4), как уже отмечалось, отражает тот факт, что в зоне контакта металла и сырьевой смеси, от которой отсчитывается координата x , температуры металла и сырьевой смеси одинаковы. Условие (5) показывает, что задача может рассматриваться как симметричная.

Требуется найти решение сформулированных задач (2) – (5), однако это будет лишь первым шагом к получению полной математической модели процессов теплопереноса в пеностекле. Действительно, одномерная модель недостаточна для адекватного описания температурных полей и полей в объеме пеностекла и, как показано ниже, потребуются ее дальнейшее развитие в целях достижения конечного результата.

Вводим безразмерные переменные (5). И тогда задача (2) – (5) примет вид (6)-(8):

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_n - t_0}, \quad Fo = \frac{a\tau}{(L/2)^2}, \quad \bar{x} = \frac{x}{L/2}. \quad (6)$$

Краевая задача теплопроводности для координаты x с учетом безразмерных переменных:

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}, \quad Fo > 0, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1. \quad (7)$$

Начальное условие задачи теплопроводности для координаты x с учетом безразмерных переменных:

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_n - t_0} = T_0(\bar{x}), \quad (8)$$

Граничные условия задачи теплопроводности для координаты x с учетом безразмерных переменных:

$$T(\bar{x}, Fo) \Big|_{\bar{x}=0} = \frac{t_n - t_0}{t_n - t_0} = 1, \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}} \right|_{\bar{x}=1} = 0. \quad (10)$$

Решение краевой задачи теплопроводности следует выполнить методом интегрального преобразования Лапласа. Окончательное решение краевой задачи теплопроводности представлено формулой (11):

$$T(\bar{x}, Fo) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right]. \quad (11)$$

Преобразуем уравнение (11) в размерный вид с учетом уравнения (6) и получим уравнение (12):

$$t(x, \tau) = t_n - (t_n - t_0) \cdot \left[\frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \right]. \quad (12)$$

Далее производили численное моделирование процесса термической обработки при температурах от 20 °С до 750 °С, так как большая часть применяемых газообразователей при порошковом способе производства пеностекла имеет температуру термического разложения в пределах 680–800 °С.

В диапазоне моделируемых температур значения температуропроводности изменяются, что влияет на показатели числа Фурье, тем самым предлагается производить его расчет на каждом этапе моделирования по формуле (12), при этом принимаем, что a – температуропроводность – изменяется по следующему закону (13), где t_n – температура на поверхности материала, °С:

$$a = (-3,1 \cdot 10^{-7} \cdot t_n^2 + 9,92 \cdot 10^{-4} \cdot t_n + 2,305) \cdot 10^{-7}. \quad (13)$$

Исходные данные и результаты проведенных расчетов представлены в таблице 1. Шаг по времени при расчетах нами принимался равным 20 минутам.

Таблица 1 Расчетные значения числа Фурье

№ п/п	Температура, t , °С	Температуропроводность, $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с	Число Фурье, Fo
1	20	2,32	0,112
2	50	2,35	0,113
3	150	2,44	0,117
4	250	2,53	0,122
5	350	2,61	0,125
6	450	2,68	0,129
7	550	2,75	0,132
8	650	2,81	0,135
9	750	2,87	0,138

Рассчитаем температурные поля при нагреве сырьевой смеси до температуры 750 °С по уравнению (12). Принимаем, что в начальный момент времени значение температуры $T_0(\xi) = 20$ °С, а согласно таблице 1 $Fo = 0,112$. Полученное распределение температурных полей на каждом этапе расчета аппроксимируем полиномами 2 степени и закладываем в качестве начального на следующем шаге расчетов.

На рис. 4 видно, что через 180 минут с момента начала нагрева сырьевой смеси со скоростью 5 °С в минуту температура в центре материала достигнет 452 °С. Дальнейший нагрев может привести к деструктивным процессам, поэтому моделируем ситуацию с отключением источника теплоты для равномерного

нагрева материала по всему объему и принимаем температуру на поверхности 650 °С.

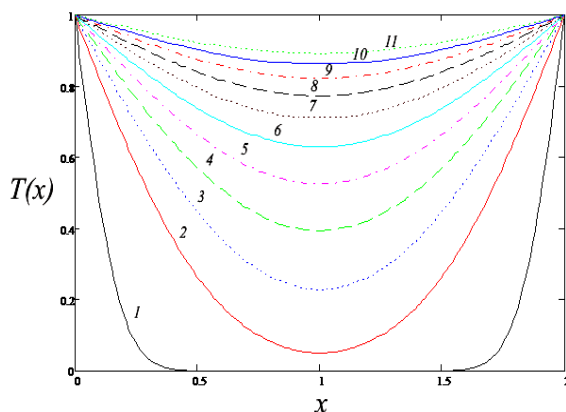


Рисунок 4 – Иллюстрация расчетов при значениях Fo : 1) 0,01; 2) 0,1; 3) 0,2; 4) 0,3; 5) 0,4; 6) 0,5; 7) 0,6; 8) 0,7; 9) 0,8; 10) 0,9; 11) 1

Представленные расчеты показали, что при понижении температуры с 750 °С до 650 °С в малых промежутках времени появляются кривые, иллюстрирующие распределение температурных полей с экстремумами (кривая 2, рис. 5). Эта особенность объясняется тем, что процесс переноса тепла в твердых телах является инерционным.

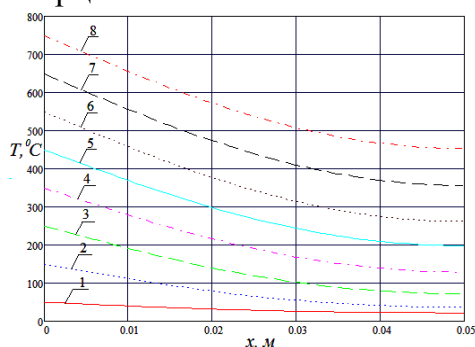


Рисунок 5 – Номограмма температурных полей от 20 °С до 750 °С

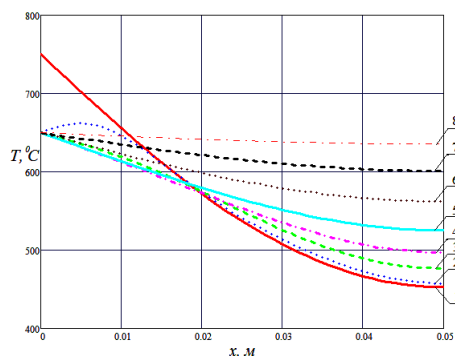


Рисунок 6 – Температурные поля после остывания до температуры на поверхности материала до 650 °С: 1 – Последний этап расчета нагрева материала; 2 – $Fo = 0,007$ (1 мин.); 3 – $Fo = 0,034$ (5 мин.); 4 – $Fo = 0,068$ (10 мин.); 5 – $Fo = 0,135$ (20 мин.); 6 – $Fo = 0,271$ (40 мин.); 7 – $Fo = 0,507$ (75 мин.); 8 – $Fo = 1$ (150 мин.)

Так, при интенсивном охлаждении сырьевой смеси приповерхностные слои засыпки (0–0,1 см), прогретые до температуры более 650 °С, не успевают передать ранее набранное тепло на поверхность и в менее прогретые слои сырьевой смеси. Выдержка при температурах 650 °С более 75 минут нецелесообразна, так как окончательное выравнивание температуры в центре материала произойдет более чем через 2 часа. Поэтому по истечении 75 минут снова повышаем температуру на поверхности до 700 °С, а затем до 750 °С, с шагом по времени 20 минут, как ранее, не опасаясь, что произойдет неравномерная поризация сырьевой смеси.

Общее расчетное время с момента начала процесса вспенивания составило 255 минут.

В границах предположения, которое заключается в том, что показатели температуры сырьевой смеси для получения пеностекла неравномерно распределены по объему засыпки и направлены от поверхности засыпки к центру в сторону уменьшения, существует вероятность того, что распределение

сферических пор в структуре материала может существенно изменяться, тем самым эксплуатационные свойства материала будут ухудшаться. Данные предположения обуславливают необходимость в прогнозировании динамики температуры в структуре материала при двумерной постановке задачи.

В третьей главе разработана математическая модель процесса теплопереноса при ВТО пеностекла в двумерной постановке задачи. Представлены общие положения математического моделирования процессов теплопереноса при ВТО пеностекла, сформулирована физическая и математическая постановка задачи для расчета процессов теплопереноса при ВТО пеностекла (расчет двумерного поля температур).

На основе существующих представлений о процессах в системах, подобных представленной на рис. 7, динамику полей температур в рассматриваемом объекте можно качественно представить зависимостями параболического вида, как показано на рис. 7–10.

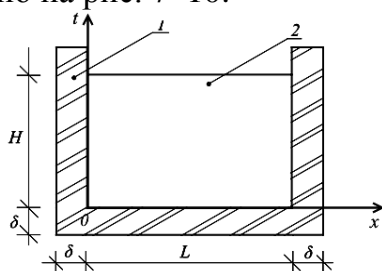


Рисунок 7 – Геометрическая модель, используемая для постановки задачи: сырьевая смесь (2) – металлическая форма (1)

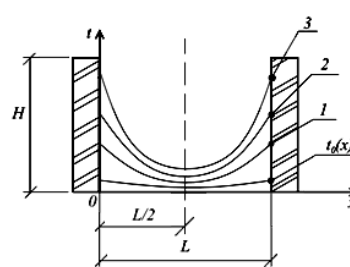


Рисунок 8 – Динамика полей температур на стадии нагревания сырьевой смеси для получения пеностекла: $t_0(x)$ – начальное распределение температур; 1 – τ_1 ; 2 – τ_2 ; 3 – τ_3 ; учтем, что $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$

Обращаем внимание на тот факт, что при ВТО сырьевой смеси при циклически меняющихся параметрах температуры конечное распределение температур после завершения стадии нагревания $t_0^*(x)$ принимается в качестве начального распределения для стадии охлаждения. Этот факт иллюстрируется кривыми на рис. 9.

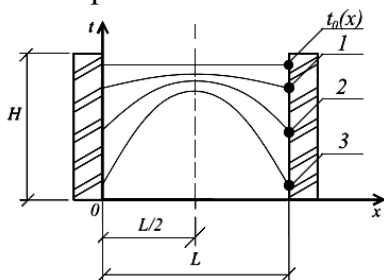


Рисунок 9 – Динамика полей температур на стадии охлаждения сырьевой смеси для получения пеностекла: $t_0(x)$ – начальное распределение температур; 1 – τ_1 ; 2 – τ_2 ; 3 – τ_3 ; учтем, что $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$

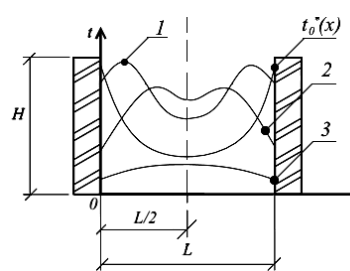


Рисунок 10 – Динамика полей температур на этапе охлаждения сырьевой смеси после нагрева: $t_0^*(x)$ – конечное распределение температур на стадии нагревания сырьевой смеси, принимаемое за начальное для стадии охлаждения; 1 – τ_1 ; 2 – τ_2 ; 3 – τ_3 ; учтем, что $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$

Кривые на рис. 10 показывают, что динамика температур в сырьевой смеси при циклическом изменении параметров температуры могут иметь достаточно сложный вид. Ни один из существующих методов решения краевых задач математической физики не позволяет получить аналитические решения задач теплопереноса для такого вида начальных условий. И только применение метода

«микрпроцессов» (зонального метода) дает возможность получить необходимые расчетные выражения.

Для полного учета геометрии формы для вспенивания необходимо внести ряд изменений в математическую формулировку задачи, а именно необходимость учета явлений переноса тепла по двум направлениям координат x и y . С учетом принятых допущений краевые задачи теплопроводности по оси x остаются в форме выражений (2)-(5), а для координаты y они приобретают следующий вид, формулы (14)-(17).

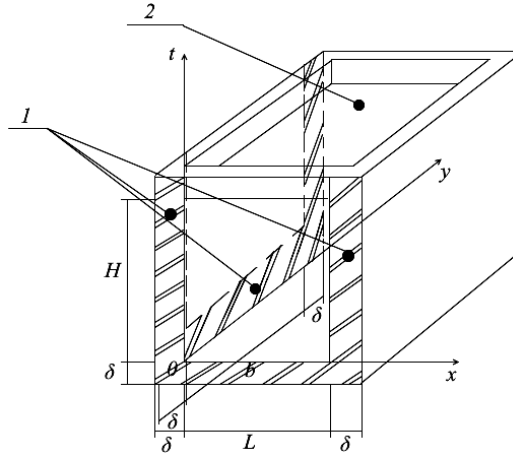


Рисунок 11 – Расчетная схема, используемая для постановки задачи теплопроводности для координаты y : сырьевая смесь (2); металлическая форма (1)

Краевая задача теплопроводности для координаты y :

$$\rho c \frac{\partial t(y, \tau)}{\partial y^2} = \lambda \frac{\partial^2 t(y, \tau)}{\partial y^2}, \tau > 0, 0 \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad (14)$$

Начальное условие:

$$t(y, \tau)|_{\tau=0} = \tau_0(y), \quad (15)$$

Граничные условия, соответственно, первого и второго рода:

$$\left. \frac{\partial t(y, \tau)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad (16)$$

$$t(y, \tau)|_{y=b/2} = \tau_n = t_n. \quad (17)$$

Здесь b – ширина засыпки сырьевой смеси для пеностекла в форме для вспенивания.

Для данного случая безразмерные переменные аналогично формулам (6) и (7) запишутся следующим образом, формулы (18)-(19):

$$T(\bar{y}, Fo) = \frac{t(y, \tau) - t_0}{t_n - t_0}, \quad Fo = \frac{\alpha \tau}{(b/2)^2}, \quad \bar{y} = \frac{y}{b/2}. \quad (18)$$

Краевая задача теплопроводности для координаты y с учетом безразмерных переменных:

$$\frac{\partial T(\bar{y}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{y}, Fo)}{\partial \bar{y}^2}, \quad Fo > 0, \quad 0 \leq \bar{y} \leq 1. \quad (19)$$

Начальное условие задачи теплопроводности для координаты y с учетом безразмерных переменных принимает вид:

$$T(\bar{y}, Fo) = \frac{t(y, \tau) - t_0}{t_n - t_0} = T_0(\bar{y}), \quad (20)$$

Граничные условия задачи теплопроводности для координаты y с учетом безразмерных переменных:

$$\left. \frac{\partial T(\bar{y}, Fo)}{\partial \bar{y}} \right|_{\bar{y}=0} = 0, \quad (21)$$

$$T(\bar{y}, Fo) \Big|_{\bar{y}=1} = 1. \quad (22)$$

Окончательное решение краевой задачи теплопроводности при ВТО пеностекла для координаты y :

$$T(\bar{y}, Fo) = 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{y} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{y} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right]. \quad (23)$$

В соответствии с принципом наложения решений для задач нестационарного теплопереноса, решение задач в двумерной постановке возможно представить следующим образом:

$$T(\bar{x}, \bar{y}, Fo_x, Fo_y) = \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_x \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_x \right] \right\} \times \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{y} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_y \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{y} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_y \right] \right\}. \quad (24)$$

Представленные зависимости составляют полный набор инструментов для определения параметров нестационарных полей температуры в любой точке объема сырьевой смеси для пеностекла и в любой момент времени при ВТО.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что эти результаты соответствуют качественным представлениям о процессах теплопереноса в стеклокристаллических материалах, к которым можно отнести пеностекло. Эти зависимости позволяют заключить, что как предполагалось, самые прогретые области пеностекла при его нагреве являются места контакта сырьевой смеси с гранями формы для вспенивания, далее идет прогрев, ориентированный к центру засыпки сырьевой смеси.

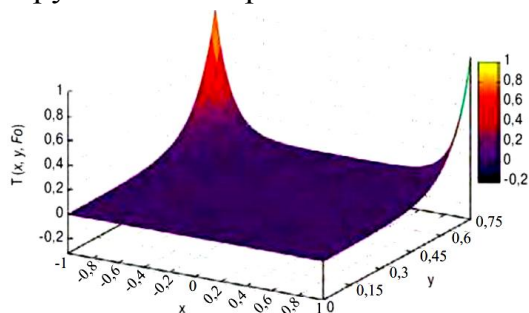


Рисунок 12 – Температурное поле при значении числа Фурье $Fo = 0,01$

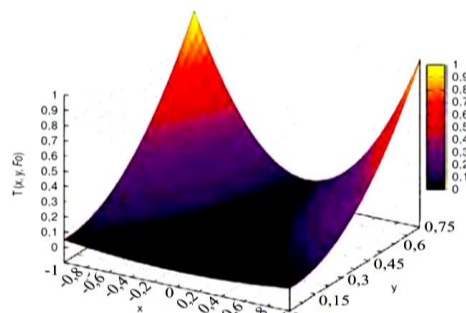


Рисунок 13 – Температурное поле при значении числа Фурье $Fo = 0,1$

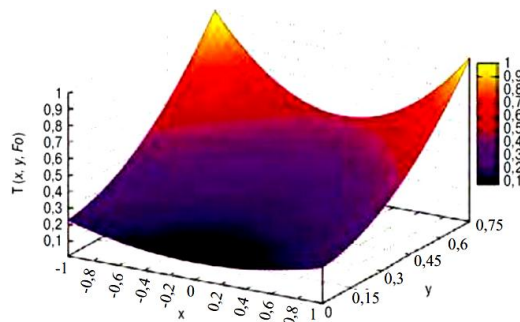


Рисунок 14 – Температурное поле при значении числа Фурье $Fo = 0,2$

Таким образом, уравнения (12), (23), (24) позволяют производить оценку временных параметров первой стадии процесса ВТО при нагреве пеностекольной шихты до температуры разложения газообразователя (τ_1).

В четвертой главе рассматриваются феноменологические особенности теплопереноса в зависимости от пористости материала, проанализированы геометрические модели пространственного расположения пор в теплоизоляционных материалах. Приведена физическая и математическая постановка задачи для моделирования процесса формирования пористой структуры в объеме сырьевой смеси для получения пеностекла.

На втором этапе моделирования (τ_2) процессов ВТО пеностекла необходимо разработать математическую модель, которая позволит рассчитать время формирования поры размера R .

На рис. 15 изображена пора с источником газообразования на ее поверхности. Окружающее пространство – расплав стекла, который входит в состав сырьевой шихты. Задача состоит в том, чтобы найти зависимость изменения радиуса поры от времени, тогда появляется возможность рассчитывать время необходимое для формирования пор необходимого радиуса.

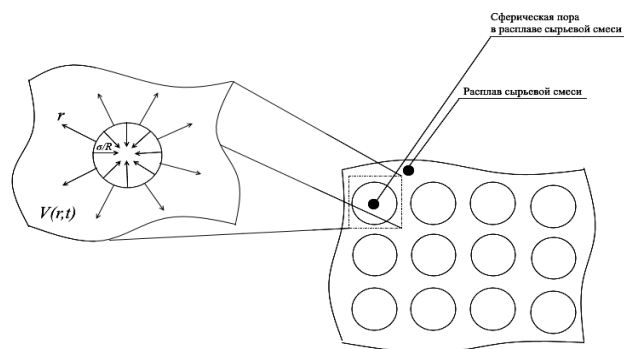


Рисунок 15 – Единичная пора с радиальным полем скоростей течения расплава вокруг него

Введем функцию роста радиуса поры со временем – $R(t)$. Расплав пеностекольной шихты характеризуется плотностью ρ ($г/см^3$) и коэффициентом динамической вязкости μ .

Также введем параметр источника газообразования – интенсивность источника газообразования j . Считаем, что смесь шихты с газообразователем однородна по составу, источники распределены равномерно по объему и имеют одинаковую и постоянную интенсивность, j – скорость производства массы газа в единицу времени ($г/с$).

Учитывая тот факт, что в области высоких температур расплавы силикатных стёкол подчиняются закону Ньютона. Используем уравнение движения вязкой несжимаемой жидкости (Навье–Стокса) и уравнение неразрывности в сферических

координатах, принимая во внимание, что скорость движения жидкости вокруг пузырька поры имеет только радиальную составляющую и вследствие сферической симметрии зависит только от r – расстояния от центра поры и t – времени процесса – $v=v(r,t)$, получим выражение (25) и (26).

Уравнение движения вязкой несжимаемой жидкости (Навье–Стокса):

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial v}{\partial r} \right). \quad (25)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v) = 0. \quad (26)$$

Граничные условия: на поверхности поры скорость движения его границы – $V(R)$, давление на поверхности – $P(t)$, на бесконечности давление равно атмосферному – P_0 , а скорость движения расплава шихты равна 0.

Интегрируя уравнения (25), (26) по r от ∞ до $R(t)$, получим (27).

$$-\rho \cdot \left(\frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + R(t) \cdot \frac{d^2 R}{dt^2} \right) = P_0 - P(t) + \mu \cdot \left(\frac{d^2 R}{dt^2} \frac{1}{dR} + \frac{2}{3R} \cdot \frac{dR}{dt} \right). \quad (27)$$

Давление на поверхности сферической поры $P(t)$ следует дополнить т.к. кроме положительного давления со стороны газа на поверхность также действует отрицательное Лапласово давление. С учетом этого искомое давление на границе поры имеет вид (28).

$$P(t) = P_r(t) - \frac{\sigma}{R}, \quad (28)$$

где $P_r(t)$ – давление газовой фазы; σ/R – Лапласово давление (σ – коэффициент поверхностного натяжения расплава сырьевой смеси).

Используя модель идеального газа находим зависимость давления газа в поре как функцию времени процесса. Учитывая, что давление смеси газов, а именно оставшегося воздуха в поре и источника углекислоты, есть сумма их парциальных давлений получим (29).

$$P_r(t)V(R) = \frac{m_0}{M_1} \check{R}T + \frac{m(t)}{M_2} \check{R}T, \quad (29)$$

где $V(R)=4/3 \cdot \pi R^3$ – объем поры; M_1 – молярная масса воздуха; M_2 – молярная масса диоксида углерода; \check{R} – газовая постоянная = 8,31 (Дж/моль·К); T – температура среды; $m(t)$ – масса газа в поре вследствие работы источника (она является функцией времени); m_0 – первоначальная масса газа (воздух, оставшийся в поре).

Учтем, что до окончания процесса работы источника, его интенсивность j постоянна, тогда получим (30):

$$P_r(t) = \frac{m_0}{\frac{4}{3} \pi R^3 M_1} \check{R}T + \frac{m(t)}{\frac{4}{3} \pi R^3 M_2} \check{R}T. \quad (30)$$

Введем следующие обозначения (31), где α' – коэффициент мощности источника газообразования (Дж/с):

$$\alpha' = \frac{j \check{R}T}{\frac{4}{3} \pi M_2}. \quad (31)$$

β' - коэффициент начальных условий (Дж) (32). Тогда (30) преобразуется к виду (32):

$$\beta' = \frac{m_0 R_0 \gamma}{\frac{4}{3} \pi M_1} \quad (32)$$

$$P(t) = \frac{\beta' + \alpha' t}{R^3} - \frac{\sigma}{R} \quad (33)$$

Таким образом, модель второй стадии процесса ВТО (τ_2) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение для $R(t)$ роста радиуса поры со временем, формула (34):

$$-\frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 - R(t) \frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{1}{\rho} \left(P_0 + \frac{\sigma}{R} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\beta' + \alpha' t}{R^3} + \nu \left[\frac{1}{\left(\frac{dR}{dt} \right)} \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{4}{3R} \left(\frac{dR}{dt} \right) \right] \quad (34)$$

Для установления степени значимости каждого слагаемого применяли инспекционный анализ. Сразу понятно, что слагаемое $\frac{\beta' + \alpha' t}{R^3}$ является в уравнении значимым т.к. в противном случае не было бы образования поры.

При проведении инспекционного анализа установили:

1. Поскольку величина атмосферного давления на три порядка выше Лапласового давления, то поверхностное натяжение в формировании поры не играет роли и им можно пренебречь.

2. На рассматриваемой стадии процесса (с невысоким коэффициентом вязкости) время определяется атмосферным давлением P_0 , интенсивностью источника, начальным количеством газа в поре и необходимыми размером поры R .

Учитывая, проведенный инспекционный анализ, получим (35):

$$\left(P_0 - \frac{\alpha' t}{R^3} \right) + \mu \left[\frac{1}{\frac{dR}{dt}} \cdot \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{2}{3R} \cdot \frac{dR}{dt} \right] = 0 \quad (35)$$

Распишем уравнение в обозначениях операторов производной, $R' = dR/dt$; $R'' = d^2 R/dt^2$. Получим следующее уравнение (36):

$$R^3 R'' + \frac{2}{3} (R R')^2 + \frac{P_0}{\mu} R^3 R' = \frac{\alpha'}{\mu} R' t \quad (36)$$

Начальные условия (37):

$$t = 0: R(0) = R_0, R'(0) = 0 \quad (37)$$

где R_0 – начальный размер поры, а $R'(0)$ – скорость роста поры в начальный момент времени. По данным источников начальный размер поры составляет $R(0) = R_0 = 0,1$ мм. Следует также учесть, что коэффициент динамической вязкости меняется с температурой и, следовательно, со временем $\mu(t)$, тогда получим (38):

$$R^3 R'' + \frac{2}{3} (R R')^2 + \frac{P_0}{\mu(t)} R^3 R' = \frac{\alpha'}{\mu(t)} R' t \quad (38)$$

Коэффициент динамической вязкости в процессе находится довольно в широком диапазоне изменения: $10^3 \leq \mu \leq 10^8$ (Па·с), $\tau_2 \approx 1000$ (с). С уменьшением вязкости на процесс роста поры существенное влияние оказывает внешнее давление.

В итоге уравнение (38) преобразуется к виду (39):

$$R'' + \frac{2(R')^2}{3R} = R' \left(\frac{c \cdot t + k}{R^3} - b \right), \quad (39)$$

где $c = \frac{\alpha'}{\mu}$; $b = \frac{P_0}{\mu}$; $k = \frac{\beta'}{\mu}$; $R' = \frac{dR}{dt}$; $R'' = \frac{d^2R}{dt^2}$.

Исследуем уравнение (39) на этапе работы источника: $T \geq 800$ °C. Будем считать, что активность источника высока и выполняется неравенство $c \cdot t \gg k$. Такое упрощение вполне оправдано, т.к. активный рост пор начинается именно благодаря включению источника. С начальными условиями (41) уравнение (39) примет следующий вид (40):

$$R'' + \frac{2(R')^2}{3R} = R' \left(\frac{c \cdot t}{R^3} - b \right), \quad (40)$$

$$t = 0: R(0) = R_0 = 10^{-1} \text{ мм}, R'(0) = 0. \quad (41)$$

Исследование уравнения (38) численными методами с помощью программной среды Maple 7.5 помогает получить следующие графические зависимости для различных значений активности источника при $b=100 \text{ с}^{-1}$.

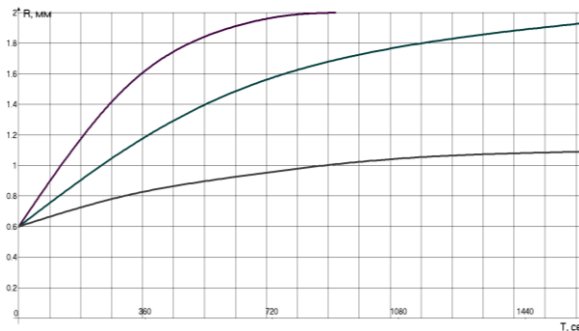


Рисунок 16 – Графические зависимости для различных значений активности источника при $b=100 \text{ с}^{-1}$, $C_1=1 (\text{мм}^3/\text{с}^2)$; $C_2=0,5 (\text{мм}^3/\text{с}^2)$; $C_3=0,1 (\text{мм}^3/\text{с}^2)$

Как видно из рисунка 16 при скорости газообразования источника ($C=1 \text{ мм}^3/\text{с}^2$) формирование пор размером в 2 мм наступит через 800 с. На рис. 16 видно, как при скорости газообразования источника $0,5 \text{ мм}^3/\text{с}^2$, формирование поры 2 мм необходимо время 1600 с. А при скорости газообразования источника $0,1 \text{ мм}^3/\text{с}^2$ формирование пор не наступит.

Пятая глава посвящена совершенствованию технологии получения пеностекла на основе теории графов с использованием методов сетевого моделирования.

Сетевое планирование (сетевые методы планирования и управления) – совокупность методов, использующих сетевую модель, как основную форму представления информации об исследуемом (управляемом) процессе.

Среднее время t_{cp} и дисперсию времени выполнения технологической операции $\sigma^2(t)$ рассчитывали по формулам (42) и (43).

$$t_{cp} = \frac{3t_{\min} - 2t_{\max}}{5}. \quad (42)$$

$$\sigma_t^2 = \left(\frac{t_{\min} - t_{\max}}{5} \right)^2. \quad (43)$$

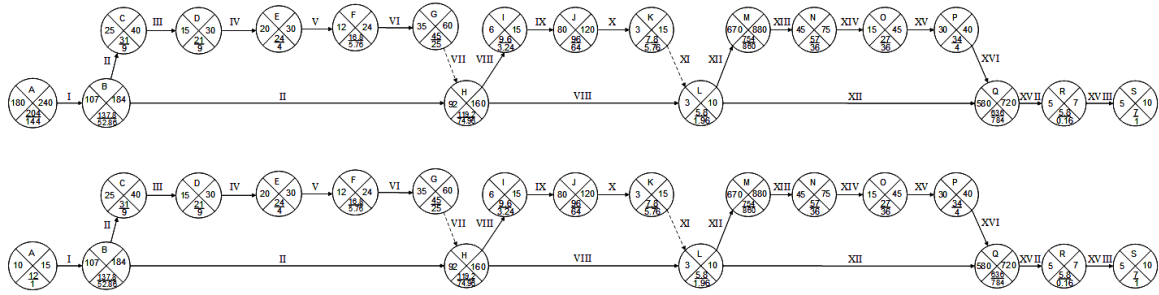


Рисунок 17 – Рабочий и модернизированный сетевой график технологического производства пеностекла

В качестве функции принадлежности в сетевом моделировании при переходе технологических операций может быть использована плотность нормально-распределенной случайной величины.

Учитывая аналогию между плотностью распределения случайной величины и функцией принадлежности. Поэтому при выполнении комплекса технологических операций необходимо рассматривать экспоненциальную функцию.

На рисунке 18 представлены функции распределения времени реализации исходного и модернизированного сетевого графика технологического процесса производства пеностекла.

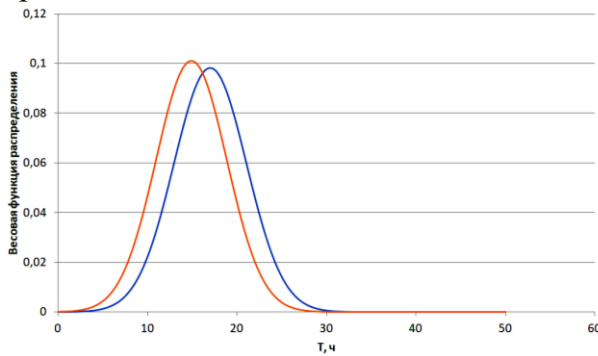


Рисунок 18 – Функции распределения времени реализации исходного и модернизированного сетевого графика технологического процесса производства пеностекла

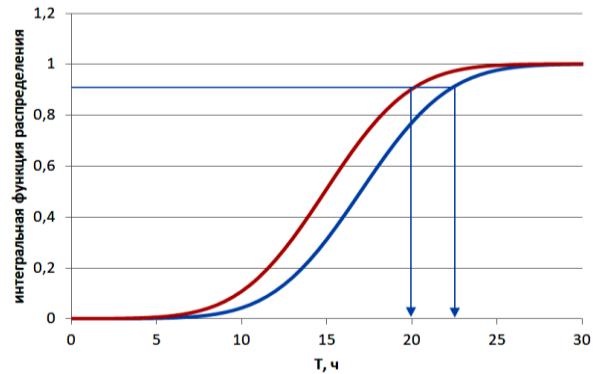


Рисунок 19 – Интегральная функция распределения времени выполнения цикла технологического процесса производства пеностекла

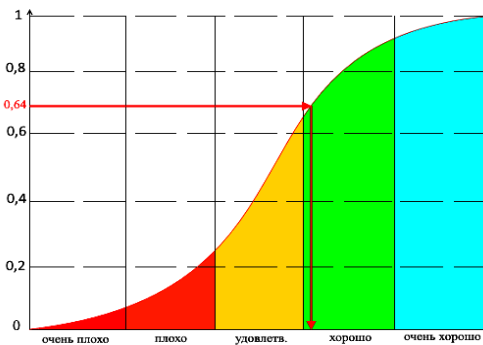


Рисунок 20 – Значения D функции Харрингтона

Анализируя данные представленные на рисунке 18, можно сделать вывод, что существенного изменения разброса данных по времени реализации сетевого графика не наблюдается, однако, явно прослеживается смещение в меньшую сторону среднего времени необходимого для реализации сетевого графика с использованием математической модели (красная линия) в сравнении с исходным сетевым графиком (синяя линия).

Это факт определяет отсутствие влияния внедрения модели на возможную неопределенность необходимого времени работы, т.е. вероятностные характеристики каждого из укрупненных этапов работ остаются неизменными за исключением этапа, на котором применяется математическое моделирование физико-технических параметров конечного продукта.

В этой ситуации необходимо оценить, на сколько улучшается процесс получения пеностекла за счет совершенствования этапа «Проектирование технологического процесса». Данную оценку необходимо представить в количественном и качественном виде, где количественный критерий - вероятность отклонения распределения времени работ двух сетевых графиков, а качественный критерий - интервальное значение D-функции Харрингтона, границы интервалов которой представлены на рисунке 20.

В выбранной постановке задачи сетевого моделирования на основе статистики распределения временных показателей отдельных технологических операций можно заключить, что при достоверности 0,9 - наперед заданной вероятности время реализации рассматриваемого цикла технологического процесса без применения результатов математического моделирования составляет 22,2 часа (рисунок 19 синяя линия) и с применением результатов математического моделирования 19,9 часа.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что время реализации технологического процесса снижается более чем на 10%. Полученная процентная характеристика является количественной оценкой повышения эффективности реализации технологического процесса по критерию времени выполнения. Для качественной оценки применим D функцию Харрингтона.

Анализируя результаты, представленные на рисунке 20, можно сделать вывод, что интегральный показатель эффективности технологического процесса производства пеностекла с учетом использования на этапе планирования технологии математического моделирования макрофизических параметров процессов ВТО пеностекла составляет значение 0,64, что соответствует уровню «хорошо» по шкале D функции Харрингтона.

В **шестой главе** представлены результаты моделирования процесса теплопереноса в рассматриваемых точках контроля пеностекла при самопроизвольном остывании (τ_3). Выполнено исследование адекватности математической модели теплопереноса при высокотемпературной термической обработке пеностекла.

Для проведения вычислительного и натурного эксперимента блок из пеностекла был снят с конвейера на стадии извлечения блоков из форм (станция извлечения) и размещен на поддоне (на воздухе).

На рисунке 21 схематично показано размещение термопар в блоке из пеностекла.

В дальнейшем будем рассматривать изменение температуры в точках №1 и №2 соответственно центр и поверхность пеностеклового блока, так как их расположение может дать максимально близкое описание особенностей изменения показателей температуры на границе взаимодействия блока, а именно поверхность его граней и центр материала (рис. 22).

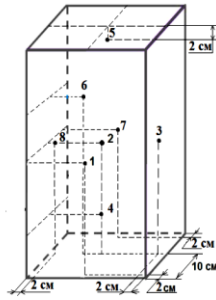


Рисунок 21 – Распределение термопар на исследуемом блоке

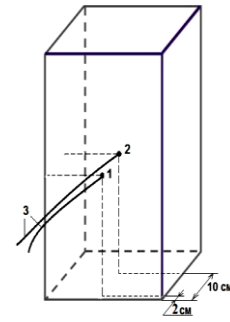


Рисунок 22 – Распределение термопар в точках №1 и №2 соответственно центр и поверхность пеностеклянного блока

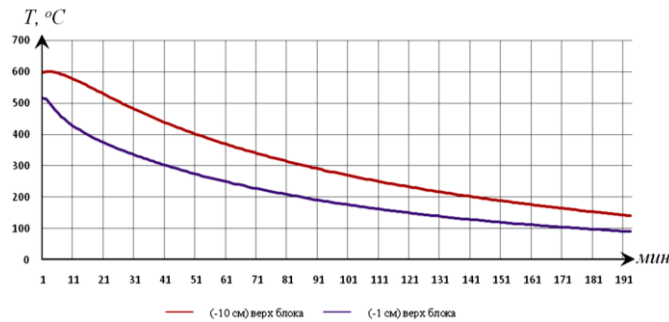


Рисунок 23 – Значение температур в центре и на поверхности блока

Как показано на графиках (рис. 23), в процессе самопроизвольного остывания пеностеклянного блока показатели температур на поверхности и в центре демонстрируют схожую динамику с наличием устойчивой разностной привязкой. Данный факт свидетельствует о том, что имеет место быть сложный процесс переноса тепла. Также следует учитывать пористую структуру самого материала, что способствует задержке тепла внутри пеностеклянного блока. Исходные условия остывания и взаимодействие внешних границ пеностеклянного блока с окружающим воздухом не привели к резкому понижению температуры на его границах вследствие замкнутой структуры пор, что можно сказать и о показателях температуры в центре блока.

Для проверки адекватности математической модели проведем расчет значений температур в центре и на поверхности пеностеклянного блока. Для расчетов используем модель (44).

$$T(\bar{x}, Fo) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right]. \quad (44)$$

Для реализации численного моделирования принимаем, что начальная температура пеностеклянного блока 600 ± 10 °C. Температура поверхности 25 ± 5 °C соответствует температуре воздуха в цехе в момент проведения эксперимента.

Расчеты для точки контроля №1 проводим на момент времени 1 минута, расчетное значение числа Фурье в указанный момент времени принимаем равным 0,001. По результатам расчетов строим графическую зависимость распределения показателей температуры в пеностеклянном блоке.

Для наглядности строим общую функциональную зависимость распределения температурных полей с 1 по 90 минуты (рисунок 24).

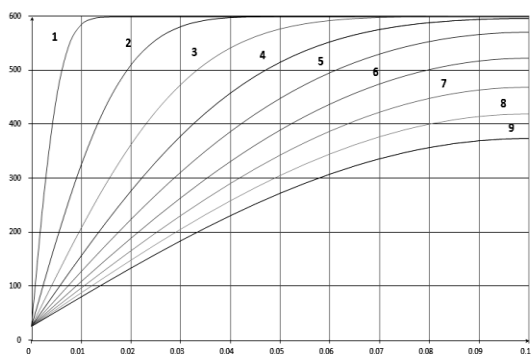


Рисунок 24 – График распределения температурных полей на поверхности пеностекла при его охлаждении с учетом данных, полученных термоэлектрическим преобразователем в точке контроля №1

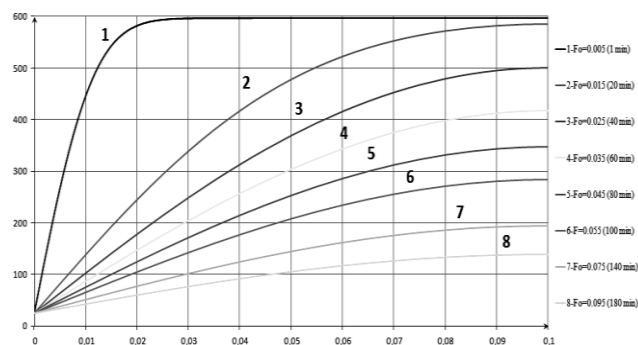


Рисунок 25 – График распределения температурных полей в центре пеностекла при его охлаждении с учетом данных, полученных термоэлектрическим преобразователем в точке контроля №2

Расчеты для точки контроля №2 проводим на момент времени 1 минута, расчетное значение числа Фурье в указанный момент времени равен 0,005. Отличие значений числа Фурье, по сравнению с поверхностью, связано с тем, что градиент температур направлен от центра не только в рассматриваемом направлении, но и еще в трех других направлениях, поэтому в отличие от поверхности, скорость изменения температуры будет выше. В наших расчетах мы принимали его выше в 3 раза. По результатам расчета строим график распределения показателей температуры в пеностекляном блоке (рисунок 25).

Как видно из графиков изменения расчетных и экспериментальных значений показателей температуры при остывании блока в точке контроля 2 см от поверхности в течение 190 мин. (рис. 26) динамика показателей температуры имеет нелинейный вид, что свидетельствует о наличии области интенсивного остывания и области стабилизации температуры. Наиболее интенсивное остывание наблюдается в промежутках времени от 0 до 50 секунд, далее наблюдается относительная стабилизация температуры.

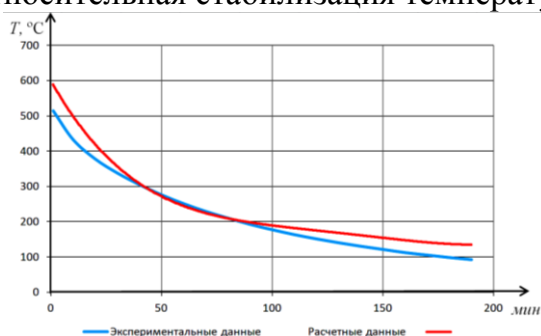


Рисунок 26 – График изменения расчетных и экспериментальных значений показателей температуры при остывании блока в точке контроля для центра в течение 190 мин

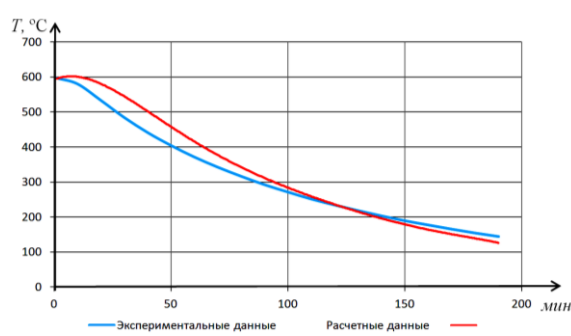


Рисунок 27 – График изменения расчетных и экспериментальных значений показателей температуры при остывании блока в точке контроля для поверхности в течение 190 мин

На графиках изменения расчетных и экспериментальных значений показателей температуры при остывании блока в точке контроля для центра в течение 190 мин. (рис. 27) динамика показателей температуры также носит нелинейный характер, что свидетельствует о сложном теплообмене в центре пеностеклянного блока. Наблюдается передача тепла теплопроводностью (стенки пор), а также конвекцией (газовая фаза внутри пор). Ключевое влияние на особенности теплообмена в центре пеностеклянного блока оказывает замкнутая структура пор внутри материала.

Оценка адекватности математической модели включает в себя подготовительный, основной и заключительный этапы.

На подготовительном этапе проводится оценка степени валидации модели, функциональных зависимостей с результатами экспериментального исследования на основе коэффициента детерминации Пирсона.

Основной этап включает в себя оценку доверительных интервалов экспериментальных данных и обсуждение схождения результатов аналитического расчета с результатами экспериментальных данных.

Заключительный этап, на котором дается комплексная оценка адекватности математической модели, включает в себя как результаты подготовительного, так и основного этапов.

По данным, представленные на рис. 28 можно сделать следующие выводы:

- расчетные данные по модели близки по значениям средним оценкам экспериментальных данных и по всей временной оси содержатся в доверительном интервале;

- максимальное отклонение расчетных данных наблюдаются в начале и в конце временной оси, что демонстрирует правильный выбор модели рассеивания экспериментальных данных;

- отклонение расчетных данных от экспериментальных направлены в сторону верхней точной границы, что обеспечивает необходимый запас при моделировании процесса остывания пеностекольного блока.

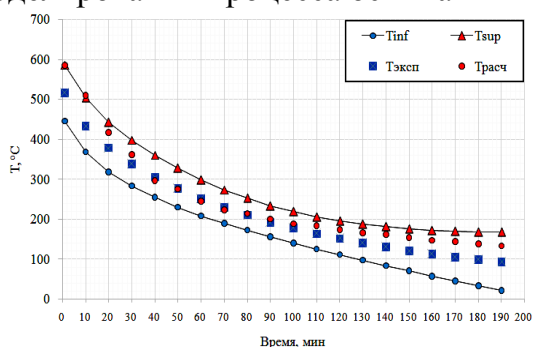


Рисунок 28 – Сопоставление расчетных и экспериментальных значений температуры при остывании блока на поверхности

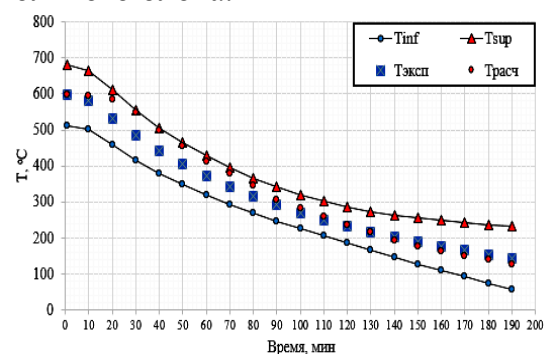


Рисунок 29 – Сопоставление расчетных и экспериментальных значений температуры при остывании блока в центре

Данные, представленные на рис. 28, 29 демонстрируют следующие выводы:

- расчетные данные по модели близки по значениям средним оценкам экспериментальных данных и по всей временной оси содержатся в доверительном интервале;

- максимальное отклонение расчетных данных наблюдаются в начале и временной оси, что аналогично результатам оценки на поверхности, также демонстрирует правильный выбор модели рассеивания экспериментальных данных;

- отклонение расчетных данных от экспериментальных направлены в сторону верхней точной границы, что обеспечивает необходимый запас при моделировании процесса остывания пеностекольного блока.

Комплексная оценка адекватности модели проведена на основе обработки экспериментальных данных с использованием критерия Пирсона и критерия Стьюдента с учетом разброса данных относительно центра. Данные для проведения комплексной оценки представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты оценки адекватности математической модели

Точки контроля измерения температуры	ЭТАПЫ ОЦЕНКИ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ				
	Кр. Пирсона, R^2	Кр. Стьюдента, t_p (P, k)	Комплексная ошибка данных, S_e max	Макс. разброс экспериментальных данных, ΔT_{max}	Вывод
на поверхн.	$R^2=0,969$	$P=0,2; k=19;$ $t_p=1,33$	$S_{e,max}=52,82\text{ }^{\circ}\text{C}$ $S_{e,min}=27,68\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{max}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{min}=37\text{ }^{\circ}\text{C}$	адекватно
в центре	$R^2=0,985$	$P=0,2; k=19;$ $t_p=1,33$	$S_{e,max}=63,91\text{ }^{\circ}\text{C}$ $S_{e,min}=33,50\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{max}=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{min}=44\text{ }^{\circ}\text{C}$	адекватно

Для оценки интервалов в дальнейших инженерных расчетах необходимо учитывать тот факт, что оценкой экспериментального исследования является верхняя точная грань (T_{sup}).

По данным таблицы 2 оценим фактический разброс экспериментальных данных температура-время по формуле $P_{\text{empir}}=\Delta T_{\text{max}}/T_{\text{max}}$:

- в точке контроля №1 пеностеклового блока $P_{\text{empir}}=\Delta T_{\text{max}}/T_{\text{max}}=0,13$;
- в точке контроля №2 пеностеклового блока $P_{\text{empir}}=\Delta T_{\text{max}}/T_{\text{max}}=0,14$.

Полученные данные показывают верный выбор доверительной вероятности $P=0,2$ при оценке квантиля распределения Стьюдента.

С учетом близких к единице значений критерия Пирсона и максимальной доверительной вероятности при расчете критерия Стьюдента можно заключить, что расчетные данные имеют достаточную сходимость с экспериментальными данными и свидетельствуют об адекватности разработанной математической модели.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе решена важная народно-хозяйственная проблема, заключающаяся в формировании научных основ, методов расчетных и экспериментальных обоснований, технологий обеспечения процессов ВТО стеклокристаллических материалов на основе пеностекла с учетом феноменологического подхода и влияния ключевых макрофизических параметров процесса для достижения не только нормативных, но и более высоких эксплуатационных показателей теплоизоляционного пеностекла.

Выявленные механизмы теплопереноса и формирования пористой структуры пеностекла подтвердили возможность рассматривать процесс ВТО обработки пеностекла как комплекс временных стадий, характеризующийся временем реализации каждой операции процесса. В результате исследований получены следующие наиболее важные результаты.

1. На основании выполненного обзора и анализа технологических параметров процесса получения пеностекла показано, что наиболее исследованными являются направления, которые отражают физико-химические особенности процессов формирования пористой структуры пеностекла на стадиях термической обработки сырьевой смеси, а также на этапах отжига готового материала, что в значительной степени регулируется режимными параметрами технологического процесса, вместе с тем, при моделировании и расчете процесса, макрофизические параметры принимаются как постоянные величины, что не в полной степени отражает специфику формирования необходимой пористой структуры материала при нестационарных режимах теплопереноса.

2. Разработана математическая модель, описывающая процессы теплопереноса в результате воздействия высокой температуры на сырьевую смесь для получения пеностекла, в частности: разработана модель нестационарного теплопереноса в слое сырьевой смеси для расчета нестационарных температурных

полей с учетом циклического изменения температурных условий в местах контакта металлической формы для вспенивания пеностекла с композитом сырьевой смеси на стадиях нагревания и охлаждения.

3. Разработаны принципы управления процессами ВТО технологического процесса производства пеностекла на основе теории теплопереноса с применением метода «микропроцессов», заключающиеся: в представлении совокупности процессов ВТО в математической модели в виде временных стадий, формализованных временными масштабами процессов формирования необходимой высокопористой структуры, что позволяет рассмотреть весь цикл термического воздействия как систему с учетом аддитивности временных параметров.

4. На основе разработанной математической модели произведен расчет температурных профилей в материале с учетом эффектов теплопроводности. Установлено, что скорость изменения показателей температуры в центре засыпки сырьевой смеси при $\lambda=0,047$ Вт/(м·°С), $\tau = 90$ мин. (5400 с) и $t = 750$ °С в два раза меньше расчетных показателей на поверхности, что подтверждает предположение об инерционности процесса термической обработки сырьевой смеси для получения пеностекла.

5. Зависимости, полученные при моделировании динамики распределения температурных полей в пеностекле при одномерной постановке задачи, демонстрируют наличие кривых с экстремумами в интервалах показателей температуры от 750 ± 20 °С до 650 ± 20 °С в сторону ее понижения, что объясняется инерционностью процесса теплопереноса в твердых телах. Показано, что, при интенсивном охлаждении сырьевой смеси, участки засыпки, находящиеся на расстоянии от ее граней порядка $0,03 \pm 0,01$ м, прогретые до температуры выше 650 ± 20 °С, не успевают передать ранее набранное тепло на грани засыпки. Выдержка материала при температурах порядка 650 ± 20 °С более 75 минут (4500 с) нецелесообразна, в виду того, что окончательная стабилизация температуры в центре материала произойдет более чем через 120 минут (7200 с). Предложен принцип циклического термического воздействия на пеностекольную форму для вспенивания, предусматривающий механизм периодического подвода тепла, что предусматривает минимизацию эффекта неравномерного распределения пор в структуре материала.

6. Разработаны методы математического моделирования и получены номограммы, позволяющие исследовать функциональные зависимости температуры на поверхности тел канонической формы в зависимости от значений чисел Био и Фурье при малых значениях числа Фурье, что способствует исключению ошибок при реализации методов расчета с использованием «зонального» метода и метода «микропроцессов», что позволяет учитывать периодичность воздействия температуры на материал.

7. Разработан новый математический метод определения необходимого времени для формирования заданной пористой структуры, где в качестве описания расплава сырьевой смеси адаптированы уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости (Навье-Стокса) и уравнение неразрывности в сферических координатах, учитывая, что скорость движения жидкости вокруг поры имеет только радиальную составляющую и вследствие сферической симметрии пор зависит только от r – расстояния от центра пузырька и t – времени процесса.

8. Показана зависимость разработанного коэффициента активности источника газообразования α' от массы газообразного продукта и его интенсивности, что отражает физико-химическую картину процесса формирования пористой структуры пеностекла. Установлено, что повышение активности источника газообразования снижает время процесса формирования поры, в соответствии с этим при изменении параметра C ($\text{мм}^3/\text{с}^2$), который учитывает влияние активности источника газообразования от вязкости расплава сырьевой смеси, изменяется время формирования поры с заданным радиусом. Так при увеличении радиуса поры до 2 мм (0,002 м) необходимо затратить в 8 раз больше времени, чем для формирования поры в 1 мм (0,001 м), а для формирования поры 3 мм (0,003 м) – в 27 раз.

9. Доказана эффективность внедрения на этапе планирования технологического процесса производства пеностекла математического моделирования макрофизических параметров процессов ВТО пеностекла, что повышает эффективность всего технологического процесса на 10%. Повышение эффективности процесса получения пеностекла представлено в количественном и качественном виде, где количественный критерий – вероятность отклонения распределения времени работ двух сетевых графиков, а качественный критерий – интервальное значение D-функции Харрингтона.

10. Разработана математическая модель теплопереноса на стадии самопроизвольного остывания пеностеклового блока, которая позволяет провести исследование особенностей распределения показателей температуры блока пеностекла и оценить сходимость функциональной зависимости между временем и температурой в заданных точках контроля по результатам экспериментальных данных, проведено исследование адекватности математической модели и доказана высокая сходимость результатов моделирования и экспериментальных измерений показателей температуры в заданных точках контроля. Полученные расчетные значения коэффициента детерминации Пирсона 0,969 для точки контроля №1 и 0,985 для точки контроля №2 демонстрируют наличие устойчивой функциональной связи между показателями динамики температуры, полученными в результате расчета по разработанной математической модели, и данными, полученными в результате экспериментального измерения показателей температуры с помощью средств контроля.

11. Разработанные в диссертации математические модели и методы моделирования макрофизических параметров процессов высокотемпературной обработки пеностекла, составляющие теоретические основы технологического процесса производства пеностекла, позволяют исследовать широкий класс задач при планировании технологии производства стеклокристаллических материалов на основе пеностекла, так и при прогнозировании конечных свойств готовой продукции, отвечающей актуальным показателям цены и качества. Практическое применение теоретических результатов в виде компьютерных программ и баз данных позволяет снизить временные затраты при реализации отдельных технологических этапов и повысить оперативность процесса прогнозирования макрофизических параметров технологического процесса производства пеностекла.

Экспериментальные результаты и теоретические рекомендации диссертационной работы *рекомендованы* для внедрения на предприятиях по

производству строительных теплоизоляционных и акустических неорганических материалов в различных регионах РФ, а именно на ЗАО «Сланцевский Завод Стальных Конструкций», ООО «Снабарматура СПб», ООО «АТА-Дефи», ООО «Абада Групп». Общим экономическим эффектом свыше 15 млн. руб. в год. Вместе с тем результаты работы могут быть предложены для апробации и внедрения при проектировании композитов для создания комфортной среды обитания человека, в первую очередь, при освоении Севера и Арктики, для строительства объектов МО РФ. Также результаты работы использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по специальностям и направлениям подготовки «Строительство», «Техника и технология строительства», «Строительство уникальных зданий и сооружений» в ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» и ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева» по учебным дисциплинам «Строительные материалы», «Научные проблемы оптимизации в строительстве», «Современные методы исследования материалов и конструкций», «Механизация и автоматизация в строительстве» и «Технологические процессы в строительстве».

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении: исследование динамики процессов формирования термической деструкции в пеностекле при резком изменении температурного воздействия на материал в процессе термического воздействия; разработка математического описания и аппаратурного оформления технологической стадии отжига стеклокристаллических материалов на основе пеностекла с учетом физико-химического гранулометрического состава материала; разработка технологии импульсного подвода тепла и расчет энергозатрат для ее реализации с учетом различных энергоносителей и конструктивного исполнения печей для термической обработки материала. Разработка математического описания процесса теплопереноса в трехмерных координатах с целью определения напряженно-деформационных состояний в приповерхностных слоях пеностекла.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень, определенный ВАК при Минобрнауки России:

1. Щепочкина, Ю.А. Технология получения композиционного теплоизоляционного материала с защитно-декоративным покрытием / Ю.А. Щепочкина, **М.О. Баканов** // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 3 (41). – С. 73-76.
2. Федосов, С.В. Композиционный материал на основе пеностекла с защитно-декоративным покрытием / С.В. Федосов, Ю.А. Щепочкина, **М.О. Баканов** // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 6 (44). – С. 109–114.
3. Федосов, С.В. Особенности получения композиционного строительного материала на основе пеностекла с защитно-декоративным покрытием / С.В. Федосов, Ю.А. Щепочкина, **М.О. Баканов** // Строительство и реконструкция. – 2013. – №3 (47). – С. 77–80.
4. Федосов, С.В. Математическая модель динамики процесса порообразования при термической обработке пеностекольной шихты / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, А.В. Волков [и др.] // Известия вузов. Серия: Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57, № 3. – С. 73–79.

5. Федосов, С.В. Пеностекло: особенности производства, моделирование процессов теплопереноса и газообразования / С.В. Федосов, **М.О. Баканов** // Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – № 1. – С. 108–113.
6. Федосов, С.В. Разработка комплексного подхода к математическому моделированию процесса термической обработки пеностекольной шихты. Часть 1: Физические представления о процессе / С.В. Федосов, **М.О. Баканов** // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – № 2. – С. 95–100.
7. Федосов, С.В. Моделирование распределения температурных полей пеностекольной шихты в условиях термической обработки пеностекла / С.В. Федосов, **М.О. Баканов** // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. – 2017. – Т. 13, № 3. – С. 112–118.
8. Федосов, С.В. Вариативность подходов к математическому моделированию процессов термической обработки пеностекольной шихты / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 11. – С. 110–116.
9. Fedosov, S.V. Kinetics of structural transformations at pores formation during hightemperature treatment of foam glass / S.V. Fedosov, **M.O. Bakanov**, S.N. Nikishov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2018. – Vol. 14, № 2. – P. 158–168.
10. Fedosov, S.V. Study and simulation of heat transfer processes during foam glass high temperature processing / S.V. Fedosov, **M.O. Bakanov**, S.N. Nikishov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2018. – Vol. 14, № 3. – P. 153–160.
11. Федосов, С.В. Разработка комплексного подхода к математическому моделированию процесса термической обработки пеностекольной шихты. Часть 2. Динамика теплопереноса при термической обработке сырьевой смеси / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2020. – № 2. – С. 20–29.
12. Федосов, С.В. Применение метода «микропроцессов» для моделирования процессов теплопроводности и диффузии в телах канонической формы / С.В. Федосов, **М.О. Баканов** // Известия вузов. Серия: Химия и химическая технология. – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 90–95.
13. Баканов, М.О. Моделирование высокотемпературных процессов в технологии пеностекла. Часть 1: Формирование динамики циклических нестационарных двумерных температурных полей // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2021. – № 2 (18) – С. 87-102.
14. **Баканов, М.О.** Моделирование высокотемпературных процессов в технологии пеностекла. Часть 2: Формирование пористой структуры на стадии вспенивания / М.О. Баканов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2021. – № 3 (19). – С. 89–102.
15. Федосов, С.В. Моделирование процессов теплопроводности и диффузии в телах канонической формы с применением метода «микропроцессов» для области малых значений числа Фурье / С.В. Федосов, **М.О. Баканов** // Известия вузов. Серия: Химия и химическая технология. – 2021. – Т. 64, № 10. – С. 78–83.

Публикации, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:

16. Fedosov, S.V. Kinetics of cellular structure formation at thermal treatment processes simulation in the cellular glass technology / S.V. Fedosov, **М.О. Баканов**, S.N. Nikishov // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 931. – P. 628–633. (*Scopus*)
17. Fedosov, S.V. Modeling of macro-physical parameters of foam glass under exposure of cyclic thermal effects / S.V. Fedosov, **М.О. Баканов**, S.N. Nikishov // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 974. – P. 464–470. (*Scopus*)
18. Fedosov, S.V. Parametric optimization of the thermal processing of foam glass on basis of heat transfer models / S.V. Fedosov, **М.О. Баканов**, S.N. Nikishov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709. – P. 044–047. (*Scopus*)
19. Fedosov, S.V. An integrated model of the raw material mixture hightemperature treatment process to produce foam glass. problem statement / S.V. Fedosov, **М.О. Баканов**, S.N. Nikishov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 913. – P. 2–7. (*Scopus*)
20. Fedosov, S.V. Modeling of the heat dissipation process of composite materials during stabilization of the structure using the example of non-autoclaved foam concrete / S.V. Fedosov, K.L. Domnina, M. Soldan, **М.О. Баканов** // MM Science Journal. – 2020. – Vol. 3. – P. 4052–4056. (*Scopus*)

Монография:

21. Федосов, С.В. Модели и методы высокотемпературной термической обработки в технологии пеностекла / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**. – Москва: Издательство «Спутник +», 2021. – 300 с. – ISBN 978-5-9973-6096-2.

Прочие публикации:

22. Fedosov, S.V. Modeling of thermal processes in the production of foam glass / S.V. Fedosov, **М.О. Баканов**, S.N. Nikishov // Yale Review of Education and Science. – 2015. – Vol. 1(16). – P. 752–757.
23. **Баканов, М.О.** Моделирование размеров пор при производстве пеностекла / М.О. Баканов, С.Н. Никишов // Наука современности – 2015: Сборник материалов международной научной конференции (Россия, г. Москва, 29-30 января 2015 г.) / Под ред. проф. П.М. Саламахина, А.Н. Квитко, Н.А. Алексеевой [и др.]. – Киров: МЦНИП, 2015. – С. 94–100.
24. **Баканов, М.О.** Моделирование процессов теплообмена при термической обработке пеностекла / М. О. Баканов, С. Н. Никишов // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2015): сборник материалов XVIII Международного научно-практического форума (26-29 мая 2015 года). – Иваново: ИВГПУ, 2015. – С. 270–273.
25. Федосов, С.В. Основные принципы технологии получения теплоизоляционного пеностекла, подходы к моделированию / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Эффективные строительные композиты: научно практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича. сборник трудов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. – С. 690–699.
26. Федосов, С.В. Тепловые процессы при термической обработке пеностекольной шихты / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия: сборник материалов XIII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Educatio, 2015. – С. 160–162.

27. Федосов, С.В. Подходы к моделированию процессов термической обработки пеностеклянной шихты. Постановка задачи / С.В. Федосов, Н.Л. Федосова, **М.О. Баканов** [и др.] // Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений: сборник научных трудов. – Иваново: ИВГПУ, 2015. – Вып. 1. – С. 10–19.
28. **Баканов, М.О.** О необходимости комплексного подхода к математическому моделированию процессов термической обработки пеностеклянной шихты на всех стадиях его производства / М.О. Баканов, С.Н. Никишов // Интеллектуальные композиты для зеленого строительства: Международная научно- практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика: сборник докладов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – Ч. 1. – С. 56–60.
29. **Баканов, М.О.** Особенности теплообмена в теплоизоляционных материалах / М.О. Баканов, С.Н. Никишов // Актуальные вопросы естествознания: материалы I Межвузовской научно-практической конференции (Иваново, 21 апреля 2016 года) / Сост.: Н.Е. Егорова, Д. А. Ульев. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 51–56.
30. **Баканов, М.О.** Определение граничных условий при математическом моделировании процессов термической обработки пористых материалов / М.О. Баканов, С.Н. Никишов // Актуальные вопросы естествознания: материалы II Межвузовской научно-практической конференции (Иваново, 12 апреля 2017 года) / Сост.: Н. Е. Егорова. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 192–195.
31. Федосов, С.В. Повышение эффективности процесса формирования пор в технологии пеностекла с применением математического моделирования / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Новые материалы и технологии в машиностроении: сборник научных трудов / Под общ. ред. Е.А. Памфилова. – Брянск: БГИТУ, 2018. – Вып. 27. – С. 95–101.
32. Федосов, С.В. Способы моделирования процессов термической обработки в технологии пеностекла / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Инновационные технологии в архитектуре и дизайне: тезисы докладов II Международной научно-технической конференции / Под общ. ред. д-ра техн. наук В.П. Сопова. – Харьков: ХНУСА, 2018. – С. 117.
33. Федосов, С.В. Динамика макрофизических параметров получения пеностекла при высокотемпературной термической обработке / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной Году культуры безопасности (Иваново, 19 сентября 2018 г.). – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – Часть I. – С. 174–183.
34. Федосов, С.В. Процессы тепломассопереноса в системах защиты техносферы: производственные, противопожарные и экологические аспекты / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Современные инженерные проблемы ключевых отраслей промышленности. Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума и Международного Косыгинского форума. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. – С. 213–217.
35. **Баканов, М.О.** Модель прогнозирования физико-технических параметров пористого теплоизоляционного материала на основе пеностекла / М.О. Баканов, С.Н. Никишов // Современные пожаробезопасные материалы и технологии. Сборник

- материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 370-й годовщине образования пожарной охраны России. – Иваново, 2019. – С. 37–43.
36. Федосов, С.В. Математическое моделирование процессов теплопереноса в технологических линиях производства пеностекла / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ – 2020. Сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика А.В. Лыкова. – Москва, 2020. С. 69–74.
37. Баканов, М.О. Способы совершенствования технологии производства блочного пеностекла / **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2020. – № 1. – С. 23–26.
38. Баканов, М.О. Технология получения пеностекла. теоретические основы / **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Современные пожаробезопасные материалы и технологии. Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России. – Иваново, 2020. – С. 10–13.
39. Баканов, М.О. Разработка математической модели высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси в технологии производства пеностекла / **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов // Современные пожаробезопасные материалы и технологии. Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России. – Иваново, 2020. – С. 14–17.
40. Федосов, С.В. Теоретические и прикладные основы процессов высокотемпературной термической обработки при производстве теплоизоляционного пеностекла / С.В. Федосов, **М.О. Баканов** // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт. Материалы VII-ой Международной научно-практической конференции. – Иваново, 2020. – С. 40–43.
41. Суруевгин, А.В. Технологические методы повышения надежности / А.В. Суруевгин, Г.В. Кувшинов, **М.О. Баканов** [и др.] // Надежность и долговечность машин и механизмов. Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России и 75-й годовщине Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 годов. – Иваново, 2020. – С. 108–111.
42. **Баканов, М.О.** Разработка модели оптимизации технологического процесса производства пеностекла / М.О. Баканов, С.Н. Никишов // Пожарная и аварийная безопасность. Сборник материалов XV международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России. – Иваново, 2020. – С. 310–315.
43. Федосов, С.В. Математическое моделирование технологических процессов получения теплоизоляционных ячеистых композитов / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, К.Л. Домнина // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2020. – № 3 (55). – С. 207–213.
44. Федосов, С.В. Метод «микропроцессов» при моделировании процессов теплопроводности и диффузии в телах канонической формы. Обобщенные граничные условия III рода / С.В. Федосов, **М.О. Баканов** // Умные композиты в строительстве. – 2021. – Т. 2, № 2. – С. 7–15.
45. Федосов, С.В. Моделирование процессов нестационарной теплопроводности и диффузии в телах канонической формы с использованием метода «микропроцессов» / С.В. Федосов, **М.О. Баканов** // Современные инженерные проблемы ключевых отраслей промышленности. Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума и Международного Косыгинского форума. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021. – Т. 1. – С. 25–30.

46. Федосов, С.В. Совершенствование технологического процесса получения пеностекла на основе методов математического моделирования / С.В. Федосов, С.Н. Никишов, **М.О. Баканов** // Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященного 110-летию А.Н. Плановского (ISTS «EESTE-2021»). – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2021. – Т. 1. – С. 23–28.

Свидетельства на программы ЭВМ и БД:

47. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611857. Моделирование и визуализация динамических процессов термического вспенивания стекольной шихты с целью управления пористостью декоративного пеностекла / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**. – Заявка № 2013661909. Дата поступления от 16.12.2003. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.02.2014 г.

48. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661062. Программное средство для оценки динамики параметров формирования пористой структуры сырьевой смеси для получения пеностекла в процессах высокотемпературной термической обработки / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов. – Заявка № 2018618396. Дата поступления 31.07.2018. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 31.08.2018 г.

49. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614723. Программное средство для моделирования и расчета температурных полей в твердых пористых теплоизоляционных материалах при различных режимах термической обработки / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**, С.Н. Никишов. – Заявка № 2019612716. Дата поступления от 28.03.2019. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.04.2019 г.

50. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620664. Реляционная модель данных экспериментального исследования динамики профиля температуры в блоках пеностекла / **М.О. Баканов**. – Заявка № 2021620531. Дата поступления от 23.03.2021. Зарегистрировано в Реестре баз данных 07.04.2021 г.

51. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021618301. Моделирование и расчет процессов высокотемпературной термической обработки пористых стеклокристаллических материалов / С.В. Федосов, **М.О. Баканов**. – Заявка № 2021614421. Дата поступления от 23.03.2021. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.05.2021 г.

*Автор выражает глубокую признательность научному консультанту – Лауреату премии Правительства РФ в области науки и техники, заслуженному деятелю науки РФ, академику РААСН, доктору технических наук, профессору **Сергею Викторовичу Федосову**, доктору технических наук, профессору **Юлии Алексеевне Щепочкиной** за определение тематики научных исследований в области получения стеклокристаллических материалов на основе пеностекла, а также доктору технических наук **Денису Вячеславовичу Тараканову** и всем соавторам исследований, представленных в данной работе.*

Подписано в печать 23.11.2021. Формат 60x84 1/16. Бумага писчая.

Усл.печ.л. 2,09. Уч.-изд.л. 2,32. Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано на полиграфическом оборудовании
редакционно-издательского центра ФГБОУ ВО «ИГХТУ»
153000, г. Иваново, Шереметьевский пр., 7