

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный политехнический университет»**

На правах рукописи



Никишов Сергей Николаевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ПЕНОСТЕКЛА ПРИ РЕГУЛИРУЕМЫХ РЕЖИМАХ ПРОЦЕССОВ
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Лауреат премии Правительства РФ в
области науки и техники, заслуженный
деятель науки РФ, академик РААСН,
доктор технических наук, профессор
Федосов Сергей Викторович

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Введение.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОСТЕКЛА И МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	12
1.1. Анализ состояния технологии производства пеностекла.....	12
1.1.1. Особенности производства пеностекла.....	13
1.1.2. Одностадийный порошковый способ производства пеностекла с применением форм.....	17
1.1.3. Способ непрерывного вспенивания ленты пеностекла.....	18
1.1.4. Двухстадийный порошковый способ производства пеностекла с применением форм.....	20
1.2. Подходы к моделированию макрофизических свойств пеностекла.....	28
1.2.1. Особенности термической обработки пеностекла.....	28
1.2.2. Математические методы и модели процессов нагрева пенообразующей смеси при термической обработке материала.....	30
1.2.3. Математические методы и модели процессов вспенивания пенообразующей смеси при термической обработке материала.....	37
1.2.4. Математические методы и модели процессов отжига и остывания пенообразующей смеси при термической обработке материала.....	45
1.3. Выводы по главе 1.....	48
ГЛАВА 2. ПЛАНИРОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	50
2.1. Характеристика исходных сырьевых материалов для получения пеностекла.....	50
2.2. Описание методики экспериментальных исследований физических свойств пеностекла.....	50
2.2.1. Методика определения плотности пеностекла.....	51
2.2.2. Методика определения водопоглощения пеностекла.....	51
2.2.3. Методика определения влажности пеностекла.....	52
2.2.4. Методика определения предела прочности при сжатии.....	52
2.2.5. Методика определения предела прочности на изгиб.....	54
2.3. Описание методики экспериментальных исследований теплофизических свойств пеностекла.....	55
2.3.1. Определение коэффициента теплопроводности пеностекла (численные исследования).....	55

2.3.2. Определение коэффициента теплопроводности (экспериментальный метод).....	56
2.4. Оборудование для экспериментальных исследований и средства контроля	58
2.4.1. Аппаратурное обеспечение для измерения показателей температуры блока пеностекла	58
2.4.2. Аппаратурное обеспечение экспериментальной технологической установки для получения пеностекла	59
2.5. Математический аппарат для экспериментальных исследований	61
2.6. Выводы по главе 2	65
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЕНОСТЕКЛА	66
3.1. Математические методы моделирования тепломассопереноса в технологии пеностекла	66
3.1.1. Общая физическая постановка задачи.....	66
3.1.2. Математическая постановка задачи	70
3.1.3. Общая методика вычисления.....	71
3.2. Численные расчеты.....	77
3.2.1. Расчет температурных полей при циклических режимах	77
3.2.2. Расчет температурных полей различными способами	80
3.3. Выводы по главе 3	84
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕНОСТЕКЛА	86
4.1. Оценка динамики показателей температуры блока пеностекла при остывании	86
4.2. Моделирование динамики показателей температуры блока пеностекла при остывании	88
4.2.1. Результаты моделирования динамики показателей температуры на поверхности блока пеностекла при остывании.....	89
4.2.2. Результаты моделирования динамики показателей температуры в центре блока пеностекла при остывании.....	90
4.3. Исследование адекватности математической модели динамики распределения полей температур в структуре пеностекла.....	93
4.3.1. Подготовительный этап оценки адекватности математической модели.....	93
4.3.2. Основной этап оценки адекватности математической модели	97
4.4. Выводы по главе 4	104

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОСТЕКЛА И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	106
5.1. Определение факторов, влияющих на свойства пеностекла.....	106
5.2. Анализ и выбор целевых функций технологической системы производства пеностекла.....	107
5.3. Разработка структуры математической модели оптимального технологического процесса получения пеностекла	109
5.3.1. Построение математической модели критерия теплопроводности сырьевой смеси для получения пеностекла.....	117
5.3.2. Построение математической модели критерия плотности сырьевой смеси для получения пеностекла.....	120
5.4. Экономические критерии производства изделий из пеностекла и оценка их конкурентоспособности	122
5.5. Выводы по главе 5	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	128
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Разработка энергосберегающих технологий в современных условиях является одним из основных векторов развития как промышленного производства, так и в области научных исследований. Исходя из этого, актуальным направлением можно считать создание новых и модификацию существующих материалов для теплоизоляции различного рода зданий и сооружений.

Анализ теплофизических свойств наиболее распространенных теплоизоляционных материалов показал, что по ряду параметров наиболее перспективно применение композиционных материалов на основе пеностекла, которое имеет полностью неорганический состав (негорючий), низкие показатели теплопроводности и допустимые значения водопоглощения [84, 130]. Применение пеностекла для теплоизоляции зданий и сооружений позволяет решать не только вопросы повышения энергетической эффективности и обеспечения пожарной безопасности, но и частично проблему утилизации стеклянных отходов.

Определяющим, наиболее энергозатратным и в то же время наименее изученным в технологии пеностекла является процесс термической обработки, в ходе которого формируются окончательная структура изделия и его эксплуатационные свойства. Исследование процесса термической обработки направлено на определение оптимальных температурных режимов печи, реализация которых приведет к получению материала с требуемыми показателями качества при меньших затратах энергии.

Поэтому разработка технологии получения качественного теплоизоляционного материала, обладающего высокими эксплуатационными характеристиками, является актуальной и одной из важнейших задач, стоящих перед производителями строительных материалов.

Степень разработанности темы исследования. При выполнении диссертационного исследования был проведен анализ ранее разработанных и действующих технологических линий производства пеностекла, а также обзор патентной и научно-технической литературы по особенностям и способам изготовления блочного пеностекла, в зависимости от температурных режимов, составов и видов стекла и газообразователя, применяемых в качестве пенообразующей смеси. Теоретической базой диссертационного исследования являлись работы отечественных и зарубежных ученых, посвященные вопросам совершенствования технологии производства пеностекла, методам оптимизации процессов, протекающих при спекании, вспенивании и отжиге пенообразующей смеси, а также поискам составов и (или) специальных добавок

в стекломассы для ее модификации. Вопросы, связанные с разработкой теории теплопроводности и технологии получения теплоизоляционных материалов для строительства, нашли отражение в работах классиков – Фурье Ж.Б.Ж., Рихмана Г.В., Лыкова А.В. [49, 50] – и современных исследователей – Китайгородского А.А. [44, 45, 46], Демидовича Б.К. [30, 31, 32], Шилла Ф. [127, 149], Федосова С.В. [114, 133, 134, 135], Рудобашты С.П. [38, 56, 87, 89, 90, 91, 92, 93], Блиничева В.Н. [11, 12, 145, 151], Христофорова А.И. [16, 39, 40, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124], Щепочкиной Ю.А. [73, 75, 76].

Объектом исследования является процесс термической обработки и формирования пористой структуры пенообразующей смеси при производстве блочного пеностекла.

Предметом исследования является математическая модель теплопереноса при термической обработке пенообразующей смеси, используемой при производстве блочного пеностекла.

Цель работы: Повышение качества продукции и снижение энергозатрат при производстве пеностекла путем совершенствования режимов термической обработки на основе математического моделирования процесса теплопереноса в сырьевой смеси.

Исходя из цели работы, поставлены следующие основные **задачи:**

1. Исследование процессов высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси, исходя из условий взаимовлияния физико-технических свойств материала.
2. Исследование особенностей технологии производства пеностекла с учетом различных способов и технологических приемов оптимизации процессов термической обработки материала.
3. Исследование физических и физико-химических процессов, происходящих в пеностекле при термическом воздействии на его поверхность.
4. Разработка математической модели теплопереноса в сырьевой смеси, учитывающей особенности распределения температурных полей на участках контакта «металлическая форма – сырьевая смесь».
5. Определение технологических параметров получения пеностекла на основе метода многокритериальной оптимизации с помощью математической модели зависимости свойств готового изделия от каждого фактора в отдельности и совместно.

Методы исследования. Исследования проводились с использованием общепринятых физико-механических и физико-химических методов оценки свойств материалов, в том числе с применением стандартных методов и методик ГОСТ. Обработка экспериментальных данных осуществлялась математико-статистическими методами. При исследовании процесса

высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси применяли математическое моделирование с использованием численных методов и их реализации в виде программ на ЭВМ [112, 115].

Достоверность результатов подтверждается применением фундаментальных законов при построении модели, корректностью численных методов, использованных при реализации модели, сравнением результатов работы с результатами расчетов и результатами проведенных экспериментов.

Научная новизна работы:

1. Впервые показано позитивное влияние технологии циклического термического воздействия на процессы структурообразования в сырьевой смеси для получения пеностекла под действием высоких температур. Обоснованы рациональные режимы циклического термического воздействия на сырьевую смесь в допустимых временных интервалах для формирования пористой структуры конечного продукта.

2. Разработан принцип регулирования процесса структурообразования применительно к строительным материалам на основе пеностекла, основанный на моделировании процесса термической обработки сырьевой смеси на различных этапах технологического процесса. В соответствии с этим принципом разработаны математические модели основных стадий процесса термообработки:

а) модель нестационарного теплопереноса в слое сырьевой смеси для расчёта нестационарных температурных полей с учётом циклического изменения температурных условий в местах контакта металлической формы для вспенивания пеностекла с композитом сырьевой смеси на стадиях нагревания и охлаждения;

б) модель изменения порозности слоя сырьевой смеси и роста размеров пор, сопровождающаяся изменением теплофизических характеристик сырьевой смеси.

3. Проведено экспериментальное исследование процесса охлаждения блока пеностекла, на основе которого выявлено соответствие основных положений математического моделирования процессов теплопереноса в структуре пеностекла и результатов натурального 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.

4. Формализован метод выбора критериев оптимальности в рамках построения оптимального технологического процесса получения пеностекла. В

качестве основного критерия оптимальности принят показатель коэффициента теплопроводности материала. Дополнительным критерием оптимизации принят показатель плотности.

Практическая значимость работы:

1. Применение разработанной математической модели распределения температурных полей при циклической термической обработке сырьевой смеси позволяет на этапах, предшествующих вспениванию пеностекляной массы, исключить или уменьшить негативное проявление неравномерного прогрева смеси.

2. Разработанная математическая модель реализована в виде прикладной программы для ЭВМ и может быть использована как на предприятиях по производству пеностекла, так и в строительной и химической технологии.

3. В ходе работы определены основные технологические режимы, обеспечивающие создание изделий из пеностекла с высокими теплоизоляционными показателями (коэффициент теплопроводности 0,061–0,099 Вт/(м·К)) и низкой плотностью (190–340 кг/м³). Рассчитано, что экономическая эффективность предложенного способа циклического подвода тепла к сырьевой смеси, по сравнению с актуальными технологиями термической обработки, составит до 127,5 руб. с одного 1 м³ производимого пеностекла.

На защиту выносятся:

1. Физическая и математическая модель процесса высокотемпературной обработки пеностекла, учитывающая особенности изменения макрофизических параметров сырьевой смеси для получения пеностекла при изменении температуры в камере печи, а также специфику распределения профиля температур в зоне контакта «металлическая форма - сырьевая смесь».

2. Механизмы роста радиуса поры при термической обработке сырьевой смеси для получения пеностекла, учитывающие влияние физико-механических параметров сырьевой смеси на процесс роста радиуса пор в зависимости от продолжительности цикла высокотемпературной термической обработки.

3. Теоретические и экспериментальные исследования физических процессов, происходящих в пеностекле при регулируемых режимах нагрева и остывания материала, учитывающие особенности распределения профиля температуры при циклическом подводе тепла к сырьевой смеси для получения пеностекла.

4. Результаты проверки адекватности математической модели при оценке сходимости результатов моделирования и практических измерений

динамики показателей температуры в блоке пеностекла, основанные на применении коэффициента детерминации Пирсона при оценке функциональной зависимости между расчетными и экспериментальными данными и критерия Стьюдента при оценке принадлежности расчетных данных доверительным интервалам, полученным в ходе проведения эксперимента.

5. Результаты оптимизации соотношения составов, условий подготовки пенообразующей смеси, процессов термической обработки для получения пеностекла с заданными свойствами, учитывающие наиболее значимые для технологии получения пеностекла параметры, которые заключались в процентном отношении газообразователя от всего объема сырьевой смеси (%), времени термической обработки при вспенивании сырьевой смеси (мин.), температурном режиме термообработки (К).

6. Результаты апробации результатов диссертационного исследования, основанные на внедрении основных положений диссертационного исследования в образовательный процесс организаций высшего образования, а также в практику производства материалов на основе пеностекла производственными предприятиями.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на 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 конференция 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» (САТРИД-2019) (Кисловодск, 2019).

Внедрение результатов исследования:

Результаты исследования связанные с совершенствованием и оптимизацией существующих режимов термической обработки сырьевой смеси при производстве теплоизоляционного материала из пеностекла и программы для ЭВМ были использованы в АО «Компания «СТЭС-ВЛАДИМИР» (г. Владимир) и ООО «ГРАНГЛАС» (г. Рыбинск).

Теоретические положения диссертационной работы, результаты экспериментальных исследований и промышленного внедрения используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва и включены в программы преподавания дисциплин «Строительные материалы» (при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 - Строительство, профиль «Промышленное и гражданское строительство»), «Строительные материалы» (при подготовке специалистов по специальности 08.05.01 - Строительство уникальных зданий и сооружений, специализация «Строительство высотных и большепролетных зданий и сооружений») и «Научные проблемы оптимизации в строительстве» (при подготовке магистров по направлению 08.04.01 - Строительство, профиль «Технология строительных материалов, изделий и конструкций»).

Личный вклад:

Личный вклад автора заключается в выборе темы диссертационной работы; сборе информации, касающейся технологии производства пеностекла, проведении лабораторных исследований; в разработке математических моделей расчета температурных полей в материале и оптимизации технологического процесса; в обработке полученных данных с последующим формированием выводов; во внедрении научных результатов в производство и учебный процесс, что подтверждается актами внедрения. Диссертант лично участвовал в апробации результатов исследования на научных конференциях различного уровня, а также в подготовке публикаций, отражающих результаты работы в изданиях, индексируемых Scopus и включенных ВАК Минобрнауки РФ в перечень рецензируемых научных изданий в соавторстве с академиком РААСН, доктором технических наук, профессором С.В. Федосовым и кандидатом технических наук, доцентом М.О. Бакановым.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе 3 научные статьи в изданиях, индексируемых Scopus, 3 научные статьи в изданиях, включенных ВАК Минобрнауки РФ в перечень

рецензируемых научных изданий, получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 152 наименования, и 12 приложений.

Во введении изложены цели и задачи диссертационного исследования, а также новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены технологии производства пеностекла и способы математического моделирования, направленные на совершенствование технологии.

Во второй главе представлено описание используемых материалов, приборов и методики проведения экспериментальных исследований.

В третьей главе описана разработанная математическая модель расчета температурных полей в материале.

В четвертой главе описаны результаты проверки адекватности математической модели относительно экспериментальных данных по значению температуры в разных точках блока из пеностекла при его остывании.

В пятой главе представлена разработанная модель по оптимизации технологического процесса производства пеностекла и предложенный способ совершенствования технологического процесса путем регулирования процесса термической обработки циклическими режимами нагрева.

В заключении представлены основные выводы по работе.

Основное содержание диссертации изложено на 142 стр., включая 56 рисунков и 17 таблиц.

Благодарности:

Автор выражает благодарность:

- доценту, кандидату техн. наук Баканову Максиму Олеговичу (ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России) за формулировку задач, ценные обсуждения и замечания;

- доктору техн. наук Тараканову Денису Вячеславовичу (ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России) за помощь в исследовании адекватности математической модели;

- кандидату техн. наук Лазареву Евгению Витальевичу (АО «Компания «СТЭС-ВЛАДИМИР») за помощь в постановке экспериментальных исследований.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОСТЕКЛА И МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. Анализ состояния технологии производства пеностекла

Первое упоминание о пеностекле в качестве строительного материала отмечается в докладе академика И.И. Китайгородского, который докладывался в рамках Всесоюзной конференции по стандартизации и производству новых материалов в г. Москве в 1932 году. Также в докладе были озвучены основные теоретические принципы технологии получения пеностекла. Первое промышленное пеностекло большого формата со стабильными физико-техническими параметрами было получено в 1939 году на заводе «Автостекло» (г. Константиновка, Украина). Патенты на получение пеностекла были получены Францией, Чехословакией, США, Англией и Германией уже в тридцатые годы XX века, но предложенные в этих патентах способы получения пеностекла до Великой Отечественной войны не получили внедрения на производстве. После 1941 года все исследования по технологии получения пеностекла были приостановлены.

Несмотря на высокие теплоизолирующие и другие положительные свойства пеностекла, в Европейской части бывшего СССР оно выпускалось всего тремя заводами (Лихоборовский, г. Москва; Кучинский, г. Кучино; завод по производству пеностекла, г. Гомель). В настоящее время организовано производство пеностекла на территории Российской Федерации во Владимире, Перми, Красноярске и Новочеркасске.

На начальных этапах развитие производства пеностекла на территории бывшего СССР ограничивалось в значительной степени дефицитом сырья. Заводы производили и производят в настоящее время пеностекло из сырьевой смеси, основным компонентом которого является стекло. На начальных этапах производства блочного пеностекла в качестве основного компонента использовали специально сваренное стекло из кондиционного сырья стекольной промышленности. В настоящее время большое распространение получило использование боя стекла. Использование боя стекла (листового или производственного) решает проблему утилизации отходов из стекла, но для получения качественного готового продукта необходимо использование помола стекла с удельной поверхностью не менее $6000 \text{ см}^2/\text{г}$. Для получения помола боя стекла таких размеров требуется специальное оборудование, что влечет за собой увеличение стоимости готового материала. Еще одним недостатком боя

стекла является неоднородность химического состава и ненадежность такого источника сырья. Эту проблему частично удалось решить с помощью применения газообразователя с высокими показателями вспенивающей активности [31].

Однако отметим, что и варка стекла для производства пеностекла имеет ряд недостатков, основным из которых является высокая энергозатратность. Эти обстоятельства заставляли исследователей искать иное природное сырье, пригодное для получения пеностекла. Были сделаны попытки использования в качестве такого сырья нефелиновых сиенитов, и др. [48, 81, 94, 95, 125, 126, 128].

В зависимости от исходного сырья, применяемого в технологии производства, зачастую блочному пеностеклу дают другое название, например, неопорм, термоизол, керпен, и др. [125].

Многие разработки по подбору оптимальных составов сырьевой смеси не вышли за пределы лабораторных или полупромышленных испытаний. Анализируя результаты таких исследований, можно констатировать, что к некоторым критериям, влияющим на выбор исходного сырья, относятся:

1. Температура плавления природного сырья, она не должна быть высокой.
2. Нестабильность составов большинства пород.
3. Географическая нераспространенность на территории России определенных пород.
4. Короткий интервал вспенивания, и др.

Анализ технологий производства пеностекла показал, что порошковая технология, впервые предложенная Китайгородским И.И. и Кешишяном П.И. [31, 44, 127], характеризуется наилучшим качеством готовой продукции по сравнению с другими. Данная технология до 2016 года использовалась на Гомельском заводе по производству пеностекла, в настоящее время используется на заводе «СТЭС Владимир», являющимся самым крупным производителем блочного пеностекла в России.

1.1.1. Особенности производства пеностекла

В технологии пеностекла основным сырьевым материалом является стекло, свойства которого определяют физико-технические свойства готового материала и макрофизические параметры самого процесса производства пеностекла.

Стеклом называют твердое аморфное тело, образующееся при переохлаждении расплава в процессе нарастания его вязкости. Аморфность – важнейшая структурная характеристика стекла. Аморфным называется тело, в расположении атомов, ионов и молекул которого может быть установлен ближний порядок, но отсутствует дальний [52].

Отсюда вытекают три важнейшие особенности стеклообразного вещества:

1. Изотропность. В ненапряженном состоянии свойства вещества не зависят от направлений, по которым изменяются эти свойства.

2. Статистический характер всех структурных параметров вещества и большинства его свойств. Даже в пределах одной координационной сферы расположение частиц в стекле не столь упорядоченно, как в кристалле. Каждая координационная сфера каким-то образом искажена, и каждая искажена по-разному. Поэтому расстояния между однотипными парами атомов, углы между связями, координационные числа и т.д. не являются для данного стекла строго постоянными.

3. Постепенность и непрерывность перехода из жидкого состояния в твердое и обратно. Постепенное изменение вязкости при изменении температуры сопровождается постепенным изменением всех других свойств. Резких скачков свойств, характерных для процессов кристаллизации расплавов или плавления кристаллов, здесь не наблюдается.

В настоящее время сложные температурно-временные изменения свойств стекол во время термообработки наилучшим образом описываются при помощи кинетической теории стеклования. Сущность её изложена в работе [34]. Современное состояние теории рассмотрено в работах [36, 51].

Теория базируется на двух основных положениях:

1. Равновесная структура любой жидкости изменяется при изменении температуры этой жидкости. Заданной температуре всегда соответствует определенная равновесная структура.

2. После изменения температуры новая структура жидкости устанавливается не сразу. Скорость достижения структурного равновесия зависит от степени неравновесности структуры (это движущая сила процесса) и от вязкости жидкости, определяющей способность частиц жидкости к перемещению относительно друг друга.

Под структурой жидкости здесь понимается полная характеристика взаимного расположения центров атомов или ионов, составляющих стекло, т.е. то же, что понимают под термином «структура кристалла». Помимо происходящего при изменении температуры изменения расстояний между частицами при практическом сохранении их взаимного расположения

(характерного для кристаллов), в жидкостях и расплавах имеет место еще и изменение взаимного расположения частиц. На свойства вещества влияет как тот, так и другой фактор. Изменение свойства ρ в условиях сохранения структуры вещества происходит одновременно с изменением температуры, и описывающий это изменение температурный коэффициент:

$$\alpha_{\rho T} = \Delta\rho/\Delta T. \quad (1.1)$$

Если же при изменении температуры вещество изменяет свою структуру, следует учитывать также роль второго, структурного температурного коэффициента $\alpha_{\rho S}$.

Таким образом, свойства стекла довольно сильно изменяются при изменении структуры [37]. Это обуславливает сложность процесса получения пеностекла.

Главная задача процесса изготовления пеностекла заключается в получении материала, равномерно пронизанного порами одинакового диаметра [111, 113].

Обычно в процессе производства стекла стремятся удалить из стекломассы все видимые газовые включения, при получении же пеностекла преследуется обратная цель – получить стекломассу с возможно большим количеством пор, заполненных газом.

Используя наблюдающееся в вакууме явление нарушения равновесия между стекломассой и растворенными в ней газами, некоторые исследователи помещали расплавленное при 1200 °С стекло в вакуум, что вызывало интенсивное газовыделение, вспенивание и шестикратное увеличение объема массы [13]. Пористая стекломасса может быть получена также путем введения в расплавленное стекло газов или паров воды [21]. Однако это не обеспечивает получения пеностекла равномерной и, главное, заданной структуры. В настоящее время некоторые исследователи занимаются изучением «холодного» способа получения пеностекла из стекольных суспензий [24], но полученных результатов пока недостаточно для освоения технологии в промышленном масштабе. Поэтому основным способом производства пеностекла, обеспечивающим получение равномерной заданной структуры, следует считать так называемый порошковый способ [7, 8, 10, 13, 20].

Основу порошкового способа производства пеностекла составляет следующее: молотое стекло и газообразователь (0,5–3% от массы стекла) засыпают в формы, нагревают до вспенивания и охлаждают [101].

При увеличении температуры частицы стекла размягчаются. Для большинства стекол активация происходит при температурах порядка 600 °С.

Показатели вязкости измельченного стекла в этот период остаются высокими. При дальнейшем нагревании происходит термическое разложение газообразователя, а показатели вязкости начинают снижаться. Газы при начале термического разложения газообразователя формируют в расплаве стекла поры. Такая кинетика процесса приводит к росту диаметра поры за счет растяжения оболочки из стекломассы. При достижении заданных размеров процесс нагрева останавливается, и происходит снижение температуры для стабилизации структуры пеностекла.

Процесс порообразования в технологии пеностекла играет важную роль. Масса сырьевой смеси в пределах температур размягчения измельченного стекла и термического разложения газообразователя представляет собой пластичную вязкую систему, в которой равномерно распределен газообразователь, выделяющий газ и создающий устойчивую и равномерную пену стекла. При образовании пористой структуры основное значение имеют показатели вязкости расплавленных частиц стекла и их поверхностное натяжение на границе «расплав стекла – газ». Вязкость препятствует разрыву стеклянной пленки, а низкое поверхностное натяжение способствует уменьшению толщины пленки. При высоком поверхностном натяжении пористая структура не образуется [20].

Таким образом, вспенивающая способность сырьевой смеси зависит от:

1. Вязкости расплава измельченного стекла.
2. Поверхностного натяжения измельченного стекла.
3. Давления газовой фазы, развивающейся при термическом разложении газообразователя.

Вязкость и поверхностное натяжение измельченного стекла зависят от химического состава стекла, давления газовой фазы и вида газообразователя.

Качество пеностекла также зависит от размера зерен стекла, чем меньше их размер, тем равномернее формируемая структура материала.

Увеличение времени процесса вспенивания при постоянной температуре способствует уменьшению объемной массы пеностекла, так как образуется большое количество продуктов газовой фазы. При увеличении времени спекания сырьевой смеси при низких температурах можно получить те же результаты, что и при кратковременном спекании, но при более высоких показателях температуры.

К преимуществам порошкового способа необходимо отнести еще и тот факт, что корректировать температурно-временной режим в камере печи можно в зависимости от геометрического размера форм для вспенивания сырьевой смеси, учитывая плотность теплового потока и скорость прогревания материала внутри формы. Появляется необходимость в разработке математических

методов, позволяющих моделировать процессы тепломассопереноса в камере печи для вспенивания, которые помогут адекватно и с высокой степенью объективности спрогнозировать динамику профиля температуры на различных стадиях высокотемпературной обработки сырьевой смеси.

1.1.2. Одностадийный порошковый способ производства пеностекла с применением форм

Особенности технологии производства пеностекла по одностадийному способу достаточно подробно описаны в работах [32, 41, 42, 127, 131, 140, 142].

В настоящее время технология производства не претерпела существенных изменений. Разработка данной технологии начиналась и затем активно велась в СССР на Гомельском стеклозаводе в 1953 г. [14, 32].

Суть технологии в следующем: осуществлялась засыпка сырьевой смеси в металлические формы, которые затем подвергали термической обработке в одной туннельной печи. Увеличение производительности происходило за счет увеличения количества ярусов для размещения форм.

Температурный режим Гомельских туннельных печей отображен на рисунке 1.1.

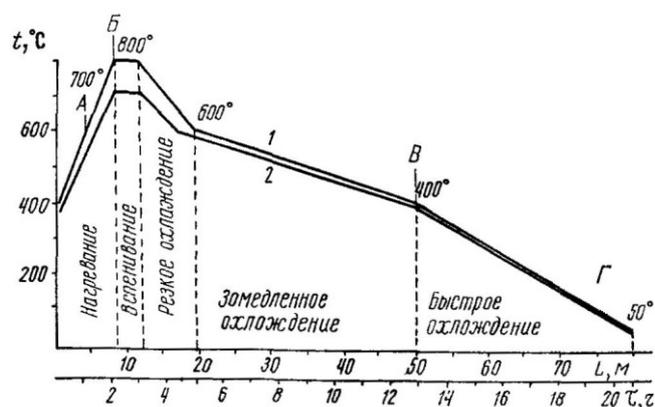


Рисунок 1.1 – Температурные кривые туннельной печи Гомельского стеклозавода (1957 г.):
1 – газообразователь – антрацит; 2 – торфяной полукокс

На выходе получалось пеностекло с достаточно высокими теплофизическими свойствами: γ – 170–240 кг/м³; λ – 0,08 ккал/(м·ч·°С); ρ – 8–10 кгс/см²; W – до 10%.

Недостатки одностадийной технологии [32]:

- поддержание заданного температурного режима в печи;
- большая инерционность печи;
- отсутствие изотермии по сечению канала печи;

- отсутствие стабильного положительного градиента температуры между низом и верхом форм;
- невозможность уравнивания гидростатического давления на этапах вспенивания;
- в отдельных случаях кристаллизация стекла и снижение показателей основных свойств.

В целом, использование одностадийной технологии, несмотря на ряд недостатков, допустимо лишь при одноярусном или двухъярусном размещении форм, но в этом случае увеличивается стоимость готовой продукции при сохранении свойств и требуется поиск компромиссов.

1.1.3. Способ непрерывного вспенивания ленты пеностекла

Способ непрерывного вспенивания ленты пеностекла был разработан под руководством И.И. Китайгородского и Б.И. Борисова [41]. В предложенной ими технологии можно было производить пеностекло толщиной до 6 см. Внешне (рисунок 1.2) конструкция конвейера для вспенивания очень проста, но техническое исполнение отдельных элементов не позволило реализовать ее на практике в промышленных масштабах.

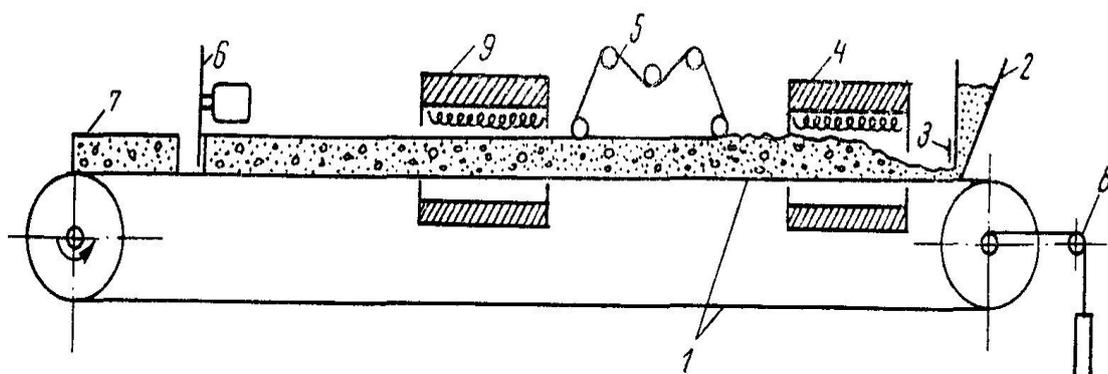


Рисунок 1.2 – Схема конвейерной установки для непрерывного вспенивания ленты пеностекла: 1 – стальная лента; 2 – расходный бункер; 3 – питатель; 4 – печь вспенивания электрическая; 5 – устройство для выравнивания наружной поверхности ленты пеностекла; 6 – отрезной механизм; 7 – блок пеностекла; 8 – натяжной механизм; 9 – печь отжига

Температурные кривые опытных режимов производства показаны на рисунке 1.3.

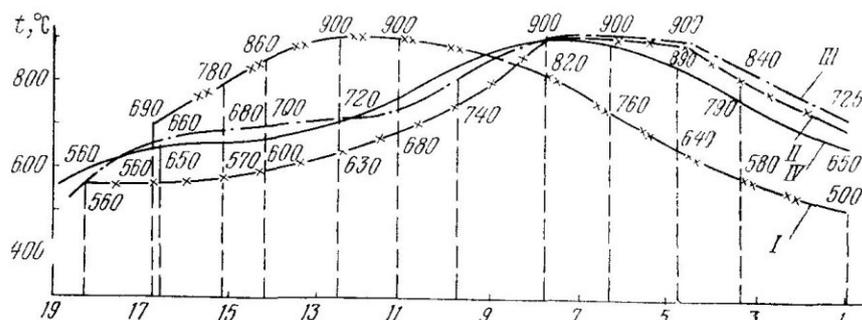


Рисунок 1.3 – Температурные кривые печи вспенивания при разных режимах

Для уменьшения влияния гидростатического давления столбика расплава стекломассы, образующегося в результате неравномерности прогрева слоя по высоте, осуществлялось повышение градиента температуры по вертикали [32, 127].

Самым существенным недостатком непрерывного способа вспенивания является фактор регулирования показателей температуры на разных участках ленты для вспенивания. В различных концах ленты наблюдались эффекты термической деструкции материала и образование внутренних напряжений, приводивших к хрупкости материала и его разрушению. Отсутствие зоны стабилизации в печи приводило к трудностям при распиловке бесконечной ленты на блоки и снятии их с поддонов.

Еще один способ непрерывного вспенивания описан в работе [31]. Сущность данного способа заключается во вспенивании сырьевой смеси за счет тепла раскаленного металла (рисунок 1.4).

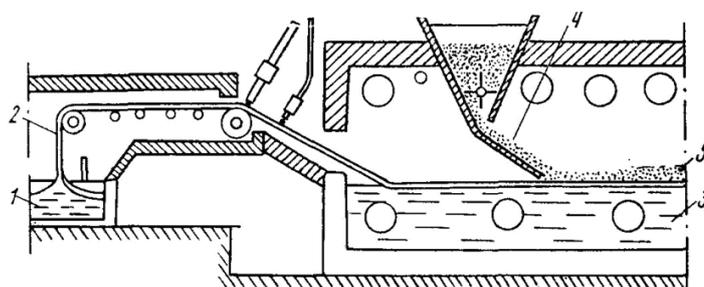


Рисунок 1.4 – Схема получения пеностекла методом плавающей ленты:
1 – емкость для стекломассы; 2 – лента стекла; 3 – расплавленный металл;
4 – пенообразующая смесь; 5 – пеностекло

По конвейерной ленте идет слой стекломассы по поверхности раскаленного металла с добавлением газообразователя. После вспенивания стекломассы происходит уменьшение температуры, что приводит к стабилизации структуры материала. В конечном итоге получается листовое пеностекло толщиной до 6 см, соединенное с подложкой из плотного стекла толщиной менее 1 см.

Недостатком данного способа является получение пеностекла небольшой толщины, так как подвод тепла осуществляется снизу, и прогреть слой большой толщины проблематично без ущерба для структуры пеностекла. Однако механическая обработка пеностекла меньшей толщины менее трудоемка и более экономична.

Для развития способа непрерывного получения пеностекла требуется совершенствование конструктивного оформления тепловых установок с учетом закономерностей изменения реологических свойств пеномасс в зависимости от их структуры, давления газов внутри ячеек и температуры, а также характера температурной кривой вспенивания и формования пеностекла, конфигурации ленты и ее оптимальных линейных размеров по сечению [32, 41, 43, 127, 149].

1.1.4. Двухстадийный порошковый способ производства пеностекла с применением форм

Сущность производства блочного пеностекла порошковым двухстадийным способом заключается в следующем: в туннельную печь по керамическим роликам подается пенообразующая смесь, находящаяся в форме (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Загрузка пенообразующей смеси в формы

В первой печи происходит нагрев, спекание, вспенивание и стабилизация (рисунок 1.6), затем происходит извлечение из форм блоков из пеностекла (рисунок 1.7). Пустые формы по конвейерной ленте возвращаются на этап разгрузки пенообразующей смеси (рисунок 1.8), а извлеченные блоки перемещаются в печь отжига (рисунок 1.9).



Рисунок 1.6 – Элемент печи нагрева, спекания, вспенивания и стабилизации



Рисунок 1.7 – Этап извлечение блоков пеностекла из форм



Рисунок 1.8 – Общий вид конвейерной ленты, необходимой для возвращения форм на этап разгрузки пенообразующей смеси



Рисунок 1.9 – Общий вид печи отжига

Образование пеностекла в оптимальных условиях происходит в течение весьма короткого времени, примерно, 80–90 мин. По технологии образование пеностекла можно разделить на три фазы в зависимости от распределения температур вдоль печи: подогрев и спекание пенообразующей смеси, собственно вспенивание и, наконец, стабилизация готового пеностекла. После окончания стабилизации формы открывают и блоки перекладывают в туннельную печь с транспортером для отжига.

Подогрев и спекание. Пенообразующая смесь в форме обладает небольшой теплопроводностью, вследствие чего нагрев до температуры спекания продолжается относительно длительное время, например, в форме с площадью поверхности около $0,25 \text{ м}^2$ примерно 10 мин. Как только пенообразующая смесь достигнет температуры около $600 \text{ }^\circ\text{C}$, она начинает спекаться при сильном уменьшении объема. При этом в спекающейся массе образуются трещины. Усадка начинается в местах максимальных температур, т.е. по направлению от стен формы.

Несколько позднее весь слой стекла в форме растрескивается на куски неправильной формы и величины, которые после окончания спекания начинают самостоятельно спекаться. Чем более неравноценны по своей форме и величине эти куски, тем более неравномерно происходит образование ячеек пеностекла.

Поскольку вспенивание наступает после полного спекания стекла, оказывается целесообразным поддерживать температуру спекания ниже температуры вспенивания до тех пор, пока вся масса в форме полностью не спечется. После повышения температуры вспенивание опять начинается в местах максимальных температур, т.е. по краям отдельных блоков, благодаря чему объем кусков увеличивается и они соединяются. Если между ними имеются трещины больших размеров, то в этих местах в пеностекле могут образовываться пустоты, если же эти куски оказываются слишком близко друг к другу, то ячейки, образовавшиеся по краям кусков, могут перекрыть их центр, доступ тепла оказывается ограниченным, и тем самым в этих местах может образоваться более плотное пеностекло.

Из этого всего вытекает, что пеностекло будет более однородным, чем лучше и, главным образом, однороднее спечется пенообразующая смесь.

Оригинальное решение этого вопроса описано в работе [31]. Пенообразующая смесь сразу же после заполнения формы разделяется вдавливанием специального шаблона на большое число однородных отделенных друг от друга частей. Последние легче прогреваются и равномернее спекаются, а позднее и вспениваются. Для того чтобы смесь была более

плотной и могла легче формироваться, форму с пенообразующей смесью рекомендуют подвергать короткой вибрации.

Процесс вспенивания. Образование пеностекла из спекшейся смеси – процесс спонтанный и протекает практически изотермически. Выделение при этом теплоты реакции внутри блока не удалось до сих пор однозначно доказать, так как результаты всех испытаний, например дифференциального термического анализа, в значительной степени зависят от изменения теплопроводности образца при нагревании и вспенивании. Кроме того, и само проведение подобных испытаний чрезвычайно затрудняется тем, что исследуемый образец в процессе эксперимента увеличивает свой объем приблизительно в семь раз. Бесспорно, однако, что как при лабораторных экспериментах, так и при испытании в производственном масштабе процесс вспенивания можно проводить при постоянной температуре в печи.

Окончательное качество пеностекла зависит от состава пенообразующей смеси и в значительно большей степени от предварительного спекания и последующей стабилизации готовой пены, чем от самого процесса вспенивания. Однако в соответствии с [30, 31] форму при вспенивании необходимо нагревать больше снизу, чем сверху, чтобы крышка формы всегда была холоднее дна на 10–30 °С. В противном случае диаметр ячеек пеностекла под крышкой окажется намного большим, чем у дна (рисунок 1.10).

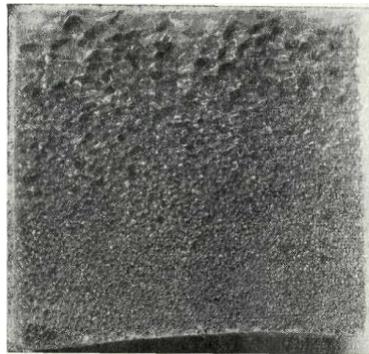


Рисунок 1.10 – Неоднородные по величине ячейки пеностекла, полученного в печи без вертикального температурного градиента

Различный разогрев дна и крышки формы, по всей вероятности, связан с гидростатическим давлением столбика расплава стекла: для расширения газов в ячейках у дна потребуется несколько большее давление, чем в ячейках под крышкой. Эту разность гидростатического давления можно компенсировать вышеприведенным температурным градиентом [30, 31]. Однако нельзя и слишком перегревать дно по сравнению с крышкой. При слишком большом температурном градиенте между крышкой и дном в непосредственной близости

от дна формы под влиянием низкой вязкости стекла образуются крупные полости, возникающие в результате соединения отдельных ячеек пеностекла.

Следует отметить, что высокие температуры не являются желательными, особенно с точки зрения повышенного расхода тепла и снижения срока службы форм. Нежелательны они также и с точки зрения технологии, поскольку при более высоких температурах вязкость стекла оказывается значительно меньше необходимой для стабилизации пены. Кроме того, в этом случае в большей степени происходит соединение отдельных ячеек с образованием соединенных друг с другом каналов, обуславливающих повышенное водопоглощение конечного продукта. Однако с точки зрения технологии непригодны и слишком низкие температуры вспенивания, хотя экономически они были бы весьма желательны. При низких температурах под влиянием слишком высокой вязкости стекло спекается не полностью, в результате чего снова возникают соединяющиеся каналы, приводящие к повышению водопоглощения пеностекла.

Стабилизация пеностекла. Правильно стабилизированный блок всегда характеризуется определенной усадкой, однако она происходит настолько равномерно, что блок при этом практически совершенно не изменяет своей формы. Равномерная усадка блока даже желательна для его более легкого извлечения из формы. При этом блок отделяется от стенок формы, что при ее открывании выпадает из нее сам без особого подогрева, как это описано в некоторых патентах зарубежных исследователей. Например, в [32] предлагается между зонами вспенивания и стабилизации создать промежуточную необогреваемую зону, в которой прекращается процесс вспенивания и происходит охлаждение внешнего слоя блока. Для это туннельная печь должна иметь три самостоятельно управляемые и регулируемые зоны, связанные друг с другом только роликовым транспортером форм. Это зона собственно вспенивания, в начале которой проводится также и подогрев и спекание пенообразующей смеси, зона охлаждения и зона стабилизации с постоянной температурой, в которой весь блок термостатируется при температуре, когда он уже не может деформироваться.

По окончании стабилизации формы из стабилизационной части туннельной печи для вспенивания попадают на так называемую рабочую площадку. Здесь их открывают, извлекают блоки пеностекла и подают к отжигательной печи. При правильном конструктивном решении этого узла раскрытие форм и перенесение блоков в отжигательную печь не превышает 1 мин, а все операции с формой и блоком не являются особенно трудоемкими. Более длительное пребывание блока на воздухе после извлечения из горячей формы имеет своим следствием образование поверхностных трещин. С этой

точки зрения пеностекло является гораздо более чувствительным, чем изделия из обычного массивного стекла, главным образом потому, что под влиянием низкой теплопроводности пеностекла и большой поверхности его при малом весе (и тем самым небольшой теплоемкости) поверхность пеностекла остывает весьма быстро.

Отжиг пеностекла. Несмотря на весьма незначительную толщину стенок отдельных ячеек, блок пеностекла следует рассматривать с технологической точки зрения в качестве компактного целого. Перепады температуры, появляющиеся при охлаждении между поверхностными и внутренними частями блока, вызывают появление напряжений того же вида, которые возникают в блоке из обычного стекла. Следовательно, между способом отжига пеностекла и массивного обычного стекла не существует принципиального различия, так как изменение температурного градиента при отжиге, а тем самым и распределение напряжений должно быть у блока пеностекла качественно таким же, как у аналогичного по размерам блока массивного стекла. Однако эти напряжения отличаются друг от друга количественно, причем эти различия соизмеримы с различиями между физическими свойствами пеностекла и массивного стекла, прежде всего, между упругими свойствами (модуль Юнга, коэффициент Пуассона), термическими свойствами (удельная теплоемкость, теплопроводность) и, наконец, объемным весом.

Следовательно, для расчета процесса отжига пеностекла можно было бы воспользоваться соотношениями, которые используются для обычного стекла, подставляя в них лишь другие значения физических констант. Например, при отжиге пластинок или плоских блоков можно было бы с весьма хорошими результатами воспользоваться соотношением, выведенным Адамсом, Вильямсоном или Даувальтером для отжига обычного стекла [31, 32].

Однако определение некоторых физических констант, особенно упругих, для такого физически неомогенного материала, каким является пеностекло, оказывается настолько ненадежным, что все вышеприведенные соотношения могут иметь лишь теоретическое значение. Их большое практическое значение состоит в том, что в соответствии с ними скорость охлаждения пропорциональна квадрату половинной толщины блока:

$$h = \frac{k}{\alpha^2}, \quad (1.2)$$

где α – половинная толщина блока в мм; h – максимально допустимая скорость охлаждения в $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Значение константы k определяется либо опытами на моделях, либо непосредственно в условиях производства. Это значение будет, естественно, справедливо только для пеностекла такого же типа, как и образец или изделие, на котором константа k определялась. В общем, можно сказать, что значение k будет тем большим, чем большей теплопроводностью и большей прочностью будет обладать пеностекло, другими словами, чем более высоким будет объемный вес пеностекла. Для высококачественного пеностекла с замкнутыми ячейками с объемным весом около $140\text{--}180\text{ кг/м}^3$ величина k составляет приблизительно $30\text{ }^\circ\text{С см}^2/\text{мин}$.

Вышесказанное справедливо при соблюдении условия, что в распоряжении имеется идеальная отжигательная печь, в которой разница температур вдоль блока в горизонтальном или вертикальном направлении не превышает $5\text{--}10\text{ }^\circ\text{С}$. Горизонтальный градиент легко ограничить увеличением длины отжигательной печи, однако вертикальный градиент при высоте блоков более 50 см уже трудно устранить. В случае наиболее употребительных муфельных печей, применяемых для отжига обычного стекла, величина этого градиента для блока такой высоты составила бы минимально $50\text{ }^\circ\text{С}$. Это совершенно недопустимо для отжига пеностекла: в такой печи невозможно получить ни одного целого блока пеностекла. Поэтому для отжига пеностекла необходимо применять наиболее современные отжигательные печи, в которых вентиляторами осуществлена принудительная циркуляция в вертикальном направлении. Воздух или продукты сгорания, отсасываемые из-под свода печи, проходят через боковые ее стенки и нагревательную систему и снова продуваются через конвейер печи. По длине отжигательная печь разделяется на отдельные зоны длиной $0,75\text{--}1,5\text{ м}$, каждая из которых оборудуется собственным вентилятором, отопительной системой и самостоятельной системой регулирования.

Вихревая печь для отжига пеностекла весьма подробно описана в работе [31], согласно которой рекомендуется система регулирования температуры не только в самой отжигательной печи, но и во всем помещении цеха. Такое регулирование необходимо для того, чтобы воспрепятствовать сквознякам у обоих ворот печи, которые могли бы нарушить условия отжига. Помимо исключения вертикальных перепадов отдельные зоны печи нужно рассчитать таким образом, чтобы температурная кривая на всем протяжении печи была бы непрерывной, совершенно без скачков и разрывов, так как для пеностекла самым негативным является воздействие переменных скоростей отжига или повторного нагревания в местах, уже подвергшихся охлаждению.

Значение максимальной температуры отжига пеностекла определяется теми же зависимостями, что и любого стекла. Следовательно, температура

отжига соответствует температуре, при которой основное стекло имеет вязкость около 10^{13} пз. Учитывая необходимость выравнивания температур вне и внутри блока, пеностекло при температуре отжига необходимо выдерживать в течение определенного времени. Это время, как правило, больше времени, необходимого для выдержки блока из массивного стекла такой же толщины и составляет приблизительно 1–2 ч.

Дальнейшее охлаждение проще всего осуществляется при охлаждении с постоянной скоростью до температуры $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Некоторые авторы рекомендуют вести охлаждение в пределах интервала отжига при значении температур на $100\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже температуры отжига, медленнее и только потом несколько быстрее. В обоих случаях важно, чтобы охлаждение производилось действительно до температуры $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а не до температуры $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$, как это принято для обычных стеклоизделий. Некачественный отжиг пеностекла проявляется в виде растрескивания блоков или же невидимых без увеличительных приборов микроскопических трещинок. Наличие такого дефекта в готовом материале проявляется при обработке его на пилах и шлифовальных кругах, а также при контроле прочности пеностекла. Снижение прочности изделия на изгиб почти всегда является следствием некачественного отжига. Для того чтобы избежать описанные негативные последствия, необходимо контролировать температуру непосредственно в отжигательной печи. Поэтому отжигательная печь для пеностекла оборудуется намного большим числом пирометров, чем это обычно принято в печах для отжига на стекольных заводах. При этом пирометры должны размещаться по всей длине печи вплоть до ее холодного конца. Хорошо также себя зарекомендовал периодический контроль с помощью передвижного пирометра и автоматическое регулирование печи.

Блоки пеностекла ставятся на конвейер печи на свои более узкие грани, и между ними оставляются зазоры 3–5 см. Общее время отжига пеностекла намного больше времени отжига обычного стекла и в зависимости от толщины блоков составляет 10–24 ч. Нельзя забывать, что общее время отжига пропорционально квадрату половинной толщины блока, т.е. с возрастанием толщины блока время отжига быстро увеличивается.

Наибольший интерес в технологии получения пеностекла представляет термическая обработка материала, поэтому более детально необходимо рассмотреть имеющиеся работы в области технологии термической обработки пенообразующей смеси и определить недостатки и возможные направления совершенствования и развития процессов термической обработки.

1.2. Подходы к моделированию макрофизических свойств пеностекла

При разработке и совершенствовании технологии производства пеностекла с учетом особенностей высокотемпературной обработки и временных параметров его получения исследователи работают в двух основных направлениях. Первое заключается в экспериментальном определении возможных составов сырьевых смесей для получения пеностекла [57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 67, 69, 70, 73, 78] и режимов термообработки методом корректировки количественных показателей составов сырьевой смеси [65, 66, 68, 71, 72, 74, 77, 79]. Второе направление исследований базируется на разработке теоретических и численных методов моделирования теплофизических процессов, происходящих при получении пеностекла. Второе направление представляется наиболее перспективным в части исследования технологии получения пеностекла, так как позволяет раскрыть закономерности формирования структуры материала, учесть внешние и внутренние факторы, способствующие оптимизации процесса его получения. Однако стоит отметить, что без результатов, полученных исследователями, применяющими в своих работах первый экспериментальный подход, было бы практически невозможно развитие теоретических основ, поэтому необходимо, чтобы теория и практика были в симбиозе и дополняли, а также подтверждали полученные результаты. Ниже проведен анализ наиболее актуальных исследований в области моделирования динамики теплофизических параметров в процесс получения пеностекла.

1.2.1. Особенности термической обработки пеностекла

Основными операциями при производстве пеностекла являются спекание, вспенивание и отжиг [30].

От режимов термической обработки зависят характеристики и качество готовой продукции, а также параметры используемого оборудования (например, длина печи вспенивания и отжига). По этой причине, при разработке технологии получения пеностекла необходимо уделять основное внимание режимам термической обработки.

На процесс вспенивания пеностекла, в основном, влияют три фактора: химический состав применяемого для приготовления смеси стекла, используемый газообразователь и температурный режим.

Для получения равномерно распределенной закрытой пористости и необходимой плотности материала (очевидно, зависящей от толщины стенок

пор) необходимо оптимальным образом подобрать к каждому конкретному составу стекла необходимый газообразователь и температурный режим. Это должно быть сделано таким образом, чтобы на момент порообразования стекло имело минимально возможную вязкость, а давление выделенного газа внутри пор не превышало максимально допустимого, при котором сила поверхностного натяжения размягченного стекла не будет превышать предел прочности на растяжение для данной вязкости.

От приведенных факторов также будет зависеть и размер ячеек пеностекла, так как они будут увеличиваться до тех пор, пока внутреннее давление не станет равным атмосферному (с учетом дополнительного давления, создаваемого силой поверхностного натяжения стекла), либо не произойдет разрыв стеклянных стенок между порами.

Таким образом, очевидна необходимость тщательного рассмотрения всех процессов, протекающих во время вспенивания пеностекла, однако даже при получении идеального по всем параметрам образца некачественный отжиг может привести к резкому увеличению брака в готовой продукции. Это связано с тем, что при изменении температуры среды, окружающей образец, имеет место не мгновенное изменение температуры образца по всему сечению, а постепенная передача тепла от одного слоя к другому в связи с ограниченной теплопроводностью материала. Поэтому в образце будет наблюдаться разница температур между наружным и внутренним слоями.

С другой стороны, стекло при изменении температуры меняет свои линейные размеры (при нагревании расширяется), а, следовательно, его слои будут стремиться принять определяемые температурой границы, что приведет к образованию напряжений, разрушающих образец.

Этот факт более актуален для пеностекла по причине его низкой теплопроводности. Вместе с тем, в стеклянной матрице пеностекла могут возникать так называемые напряжения второго рода, связанные с появлением кристаллической фазы.

К напряжениям второго рода относятся такие напряжения, появление которых зависит от наличия процесса кристаллизации в стекле. Образовавшаяся в результате кристаллическая фаза имеет отличный от стекла коэффициент термического расширения. В силу этого будет иметь место разница между величинами сжатия кристалла и стеклянной матрицы, что приведет к возникновению напряжений на границе контакта.

Совместное влияние обоих видов напряжений и является причиной разрушения полученного блока. Мало того, при неправильном охлаждении пеностекла могут появляться остаточные напряжения, снижающие прочность готовой продукции и приводящие к последующему разрушению (возможно,

через большой промежуток времени).

Во избежание подобных результатов проводят отжиг пеностекла, целью которого ставится стабилизация структуры материала и снижение возникающих напряжений до допустимых значений.

1.2.2. Математические методы и модели процессов нагрева пенообразующей смеси при термической обработке материала

Впервые попытка формализовать процесс термической обработки пеностекла была осуществлена И.И. Китайгородским [46]. Его математическая модель заключалась в решении одномерной задачи теплопроводности, в которой учитывается только конвективная составляющая подвода тепла от газа печного пространства к поверхности сырьевой смеси (рисунок 1.11):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad 0 < x < L; \quad (1.3)$$

$$\tau = 0 : T = T_0, 0 < x < L; \quad (1.4)$$

$$x = 0 : -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_2 - T), \tau > 0; \quad (1.5)$$

$$x = L : \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_2 - T), \tau > 0, \quad (1.6)$$

где T_2 , T – температуры омывающего газа и сырьевой смеси соответственно, К; T_0 – начальная температура сырьевой смеси, К; ρ – плотность сырьевой смеси, кг/м³; c – теплоемкость сырьевой смеси, Дж/(кг·°С); λ – теплопроводность сырьевой смеси, Вт/(м·°С); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С), L – толщина нагреваемого слоя, м, τ – время, с.



Рисунок 1.11 – Схема подвода тепла к сырьевой смеси

Окончательное решение задачи выражено следующими уравнениями:

$$T_{нов}(\tau) = T_2 + (T_0 - T_2) \cdot f_3; \quad (1.7)$$

$$T_u(\tau) = T_2 + (T_0 - T_2) \cdot f_4, \quad (1.8)$$

где $T_{нов}$ – температура на поверхности, T_u – температура в центре, f_3, f_4 – функции вида [45]:

$$f_3 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\mu_n) \exp(-\mu_n^2 \cdot F_0); \quad (1.9)$$

$$f_4 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2 \cdot F_0); \quad (1.10)$$

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}, \quad (1.11)$$

где μ_n – корни характеристического уравнения $\operatorname{ctg} \mu = \frac{1}{Bi} \mu$; $F_0 = a\tau/L^2$ – число Фурье, $Bi = (\alpha L)/\lambda$ – критерий Био.

Предложенный И.И. Китайгородским подход математического моделирования процессов термической обработки сырьевой смеси не учитывает подвода тепла излучением, который согласно [23] преобладает в туннельных печах при производстве блочного пеностекла. Пренебрегать без существенных ошибок подводом тепла излучением допустимо при низких температурах на начальных этапах термической обработки, а также при скоростях движения теплового потока до 3...5 м/с [22].

В работе [22] предлагается учитывать подвод тепла за счет конвекции, излучения и одновременно конвекции и излучения. При этом рассматривается двумерная модель нагрева с учетом реальной геометрии форм для производства пеностекла (рисунок 1.12) [23].



Рисунок 1.12 – Нагрев сырьевой смеси с учетом реальной геометрии формы

Подвод тепла к сырьевой смеси осуществляется за счет теплопроводности от металлических стенок формы и за счет конвективно-лучистого переноса тепла дымовых газов [20]:

1) металлическая форма

$$\begin{aligned}
 \tau > 0, 0 \leq y \leq y_1, \quad -\frac{x_1}{y_3} \cdot y + x_1 \leq x \leq \frac{x_3 - x_2}{y_3} \cdot y + x_2; \\
 y_1 < y < y_3, \quad -\frac{x_1}{y_3} \cdot y + x_1 \leq x \leq -\frac{x_1}{y_3} \cdot y + x_1 + \frac{y_1}{\cos(\gamma)}; \\
 \frac{x_3 - x_2}{y_3} \cdot y + x_2 - \frac{y_1}{\cos(\gamma)} \leq x \leq \frac{x_3 - x_2}{y_3} \cdot y + x_2; \\
 C_{cm} \cdot \rho_{cm} \cdot \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{cm} \cdot \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_{cm} \cdot \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial y} \right]; \quad (1.12)
 \end{aligned}$$

2) сырьевая смесь

$$\begin{aligned}
 y_1 \leq y \leq y_2, \quad -\frac{x_1}{y_3} \cdot y + x_1 + \frac{y_1}{\cos(\gamma)} \leq x \leq \frac{x_3 - x_2}{y_3} \cdot y + x_2 - \frac{y_1}{\cos(\gamma)}; \\
 C_{cm} \cdot \rho_{cm} \cdot \frac{\partial T_{cm}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{cm} \cdot \frac{\partial T_{cm}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_{cm} \cdot \frac{\partial T_{cm}}{\partial y} \right]. \quad (1.13)
 \end{aligned}$$

Начальные условия:

$$T_{\partial H} = T_{cm} = T_0 = const. \quad (1.14)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned}
 \tau > 0, y = 0, x_1 \leq x \leq x_2; \\
 -\lambda_{cm} \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial y} = \alpha(T_{\partial z} - T_{\partial H}) + \varepsilon_{\partial z}^{cm} \sigma(T_{\partial z}^4 - T_{\partial H}^4); \quad (1.15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau > 0, 0 < y \leq y_3, \quad x = \frac{x_1}{y_3} \cdot (-y + y_3); \\
 -\lambda_{cm} \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial \vec{n}} = \alpha(T_{\partial z} - T_{\partial H}) + \varepsilon_{\partial z}^{cm} \sigma(T_{\partial z}^4 - T_{\partial H}^4); \quad (1.16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau > 0, 0 < y \leq y_3, \quad x = \frac{x_1}{y_3} \cdot (y + y_3) + (x_2 - x_1); \\
 -\lambda_{cm} \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial \vec{n}} = \alpha(T_{\partial z} - T_{\partial H}) + \varepsilon_{\partial z}^{cm} \sigma(T_{\partial z}^4 - T_{\partial H}^4); \quad (1.17)
 \end{aligned}$$

$$\tau > 0, y = y_1, \quad x_1 + \frac{y_1}{\cos(\gamma)} \leq x \leq x_3 - \frac{y_1}{\cos(\gamma)};$$

$$-\lambda_{cm} \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial y} = -\lambda_{cm} \frac{\partial T_{cm}}{\partial y}; \quad (1.18)$$

$$T_{\partial H} = T_{cm}; \quad (1.19)$$

$$\tau > 0, y_1 < y \leq y_2, \quad x = \frac{x_1}{y_3} \cdot (-y + y_3) + \frac{y_1}{\cos(\gamma)};$$

$$-\lambda_{cm} \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial \bar{n}} = -\lambda_{cm} \frac{\partial T_{cm}}{\partial \bar{n}}; \quad (1.20)$$

$$T_{\partial H} = T_{cm}; \quad (1.21)$$

$$\tau > 0, y = y_2, \quad x_1 \left(1 - \frac{y_1}{y_3}\right) + \frac{y_1}{\cos(\gamma)} \leq x \leq x_2 \left(1 - \frac{y_1}{y_3}\right) + x_3 - \frac{y_1}{\cos(\gamma)};$$

$$\lambda_{uu} \frac{\partial T_{uu}}{\partial y} = \alpha(T_{\partial z} - T_{uu}) + \varepsilon_{\partial z}^{uu} \sigma(T_{\partial z}^4 - T_{uu}^4); \quad (1.22)$$

$$\tau > 0, y_2 < y \leq y_3, \quad x = \frac{x_1}{y_3} \cdot (-y + y_3) + \frac{y_1}{\cos(\gamma)};$$

$$-\lambda_{cm} \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial \bar{n}} = \alpha(T_{\partial z} - T_{\partial H}) + \varepsilon_{\partial z}^{cm} \sigma(T_{\partial z}^4 - T_{\partial H}^4); \quad (1.23)$$

$$\tau > 0, y_2 < y \leq y_3, \quad x = \frac{x_1}{y_3} \cdot (y + y_3) + (x_2 - x_1) - \frac{y_1}{\cos(\gamma)};$$

$$-\lambda_{cm} \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial \bar{n}} = \alpha(T_{\partial z} - T_{\partial H}) + \varepsilon_{\partial z}^{cm} \sigma(T_{\partial z}^4 - T_{\partial H}^4); \quad (1.24)$$

$$\tau > 0, y = y_3, \quad 0 \leq x \leq \frac{y_1}{\cos(\gamma)};$$

$$\lambda_{cm} \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial \bar{n}} = \alpha(T_{\partial z} - T_{\partial H}) + \varepsilon_{\partial z}^{cm} \sigma(T_{\partial z}^4 - T_{\partial H}^4); \quad (1.25)$$

$$\tau > 0, y = y_3, \quad x_3 - \frac{y_1}{\cos(\gamma)} \leq x \leq x_3;$$

$$\lambda_{cm} \frac{\partial T_{\partial H}}{\partial \bar{n}} = \alpha(T_{\partial z} - T_{\partial H}) + \varepsilon_{\partial z}^{cm} \sigma(T_{\partial z}^4 - T_{\partial H}^4), \quad (1.26)$$

где x, y – координаты; ε – приведенная степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана; ∂H – днище; ∂z – дымовые газы; cm – сырьевая смесь; st – сталь; 0 – начальный момент времени.

Применение данной математической модели возможно только на этапах спекания, так как в модели нет возможности применения изменяющихся граничных условий вследствие изменения размера рассматриваемой системы на этапе вспенивания пенообразующей смеси, когда происходит увеличение объема, и на этапах отжига, когда происходит уменьшение размеров системы в результате уменьшения размеров пор.

Попытка унификации математической модели сделана в работе [33], в которой особое внимание уделяется выбору метода решения и построению алгоритма расчета. Аналитическое решение поставленной задачи ввиду её нелинейности практически невозможно, поэтому предлагается численное решение задачи. При решении используется конечно-разностный подход, реализуемый методом двуциклического покомпонентного расщепления.

Исходное дифференциальное уравнение представляется в операторной форме, где производные по пространственным переменным заменяются операторами A_1, A_2, A_3 , после чего уравнение принимает следующий вид:

$$C_{eff}(T)\rho_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial t} + (A_1 + A_2 + A_3)T = 0; \quad (1.27)$$

$$A_1 T = -\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial x});$$

$$A_2 T = -\frac{\partial}{\partial y}(\lambda_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial y}); \quad (1.28)$$

$$A_3 T = -\frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial z}).$$

Эффективная теплопроводность представляется кусочно-линейной функцией, имеющий вид:

$$\lambda_{eff}(T) = a_n T + b_n, \quad n=1, 2, \dots, N, \quad (1.29)$$

где a_n, b_n – коэффициенты регрессии; N – количество линейных участков; n – номер участка.

Уравнения (1.27–1.29) представляется в дискретном виде:

$$C_{eff}(T_{m,l,k}^j)\rho_{eff}(T_{m,l,k}^j)\frac{T_{m,l,k}^{j+1} - T_{m,l,k}^j}{t} + (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3)T = 0; \quad (1.30)$$

$$\Lambda_1 T = -\frac{1}{h_x^2}((a_n T_{m,l,k}^j + b_n)T_{m,l,k}^{j+1} - (a_n T_{m,l,k}^j + a_n T_{m-1,l,k}^j + 2b_n)T_{m,l,k}^{j+1} + (a_n T_{m-1,l,k}^j + b_n)T_{m-1,l,k}^{j+1});$$

$$\Lambda_2 T = -\frac{1}{h_y^2}((a_n T_{m,l,k}^j + b_n)T_{m,l,k}^{j+1} - (a_n T_{m,l,k}^j + a_n T_{m-1,l,k}^j + 2b_n)T_{m,l,k}^{j+1} + (a_n T_{m-1,l,k}^j + b_n)T_{m-1,l,k}^{j+1}); \quad (1.31)$$

$$\Lambda_3 T = -\frac{1}{h_x^2}((a_n T_{m,l,k}^j + b_n)T_{m,l,k}^{j+1} - (a_n T_{m,l,k}^j + a_n T_{m-1,l,k}^j + 2b_n)T_{m,l,k}^{j+1} + (a_n T_{m-1,l,k}^j + b_n)T_{m-1,l,k}^{j+1}),$$

где $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$ – дискретные аналоги операторов A_1, A_2, A_3 соответственно; h_x, h_y, h_z – шаги расчетной сетки по направлениям x, y, z соответственно; τ – шаг по времени; m, l, k – координаты узлов расчетной сетки по направлениям x, y, z соответственно; j – номер шага по времени.

Решение уравнения (1.30) сводится к последовательному решению уравнения (1.31), при этом аппроксимация производной осуществляется по одной из пространственных переменных:

$$\begin{aligned}
C_{eff}(T_{m,l,k}^j) \rho_{eff}(T_{m,l,k}^j) \frac{T_{m,l,k}^{j+1/6} - T_{m,l,k}^j}{t} + \Lambda_1 \frac{T_{m,l,k}^{j+1/6} - T_{m,l,k}^j}{2} &= 0; \\
C_{eff}(T_{m,l,k}^{j+1/6}) \rho_{eff}(T_{m,l,k}^{j+1/6}) \frac{T_{m,l,k}^{j+2/6} - T_{m,l,k}^{j+1/6}}{t} + \Lambda_2 \frac{T_{m,l,k}^{j+2/6} - T_{m,l,k}^{j+1/6}}{2} &= 0; \\
C_{eff}(T_{m,l,k}^{j+2/6}) \rho_{eff}(T_{m,l,k}^{j+2/6}) \frac{T_{m,l,k}^{j+3/6} - T_{m,l,k}^{j+2/6}}{t} + \Lambda_3 \frac{T_{m,l,k}^{j+3/6} - T_{m,l,k}^{j+2/6}}{2} &= 0; \\
C_{eff}(T_{m,l,k}^{j+3/6}) \rho_{eff}(T_{m,l,k}^{j+3/6}) \frac{T_{m,l,k}^{j+4/6} - T_{m,l,k}^{j+3/6}}{t} + \Lambda_3 \frac{T_{m,l,k}^{j+4/6} - T_{m,l,k}^{j+3/6}}{2} &= 0; \\
C_{eff}(T_{m,l,k}^{j+4/6}) \rho_{eff}(T_{m,l,k}^{j+4/6}) \frac{T_{m,l,k}^{j+5/6} - T_{m,l,k}^{j+4/6}}{t} + \Lambda_2 \frac{T_{m,l,k}^{j+5/6} - T_{m,l,k}^{j+4/6}}{2} &= 0; \\
C_{eff}(T_{m,l,k}^{j+5/6}) \rho_{eff}(T_{m,l,k}^{j+5/6}) \frac{T_{m,l,k}^{j+1} - T_{m,l,k}^{j+5/6}}{t} + \Lambda_1 \frac{T_{m,l,k}^{j+1} - T_{m,l,k}^{j+5/6}}{2} &= 0.
\end{aligned} \tag{1.32}$$

Такое решение позволяет при последовательном применении на следующем шаге по времени получать решение с малой погрешностью.

Для решения уравнений (1.27) осуществляется преобразование в систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{pmatrix}
BBx_1 & CCx_1 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\
AAx_2 & BBx_2 & CCx_2 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\
0 & AAx_3 & BBx_3 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & AAx_4 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
0 & 0 & 0 & \vdots & AAx_{M-1} & BBx_{M-1} & CCx_{M-1} \\
0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & AAx_M & BBx_M
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
T_1 \\
T_2 \\
T_3 \\
T_4 \\
\vdots \\
T_{M-1} \\
T_M
\end{pmatrix}
=
\begin{pmatrix}
BX_1 \\
BX_2 \\
BX_3 \\
BX_4 \\
\vdots \\
BX_{M-1} \\
BX_M
\end{pmatrix}; \tag{1.33}$$

$$AAx_i \cdot T_{i-1} + BBx_i \cdot T_{i-1} + CCx_i \cdot T_{i+1} + BX_i, \tag{1.34}$$

где $AAx_i, BBx_i, CCx_i, BX_i$ – коэффициенты системы; M – количество неизвестных; $i \in 1, 2, \dots, M-1, M$.

Для определения коэффициентов $AAx_i, BBx_i, CCx_i, BX_i$ производится преобразование и подстановка операторов в уравнение (1.20). Значение $T_{m,l,k}$

для упрощения заменяется на T_i . Для решения уравнения (1.28) применяется метод прогонки.

Подвижные границы при решении задачи рассчитываются путем перерасчета значений шагов h_x , h_y , h_z в узлах сетки с учетом значения коэффициента вспучивания K_{vsp} :

$$\begin{aligned} h_x &= \frac{l_x \cdot \sqrt[3]{K_{vsp}}}{n_x}; \\ h_y &= \frac{l_y \cdot \sqrt[3]{K_{vsp}}}{n_y}; \\ h_z &= \frac{l_z \cdot \sqrt[3]{K_{vsp}}}{n_z}, \end{aligned} \quad (1.35)$$

где n_x , n_y , n_z – количество шагов в направлениях x , y , z соответственно.

При расчетах принимается, что узлы сетки изменяются равномерно и происходит смещение относительно к прежним координатам. Важным условием является определение механизма удаления свободной воды и кинетика вспенивания. Перед началом вычислений производится выбор температурных режимов в печи. Преимуществом предложенного алгоритма является возможность его использования не только при процессах спекания, но также при вспенивании и отжиге пенообразующей смеси. Происходит это за счет использования переменных $etap1$, $etap2$ и $etap3$ на каждом этапе расчетов. Расчетные значения эффективных свойств пеностекла определяются по заранее вычисленным и введенным в программу коэффициентам. Окончательные условия расчетов на каждом этапе определяют переменные $key1$, $key2$ и $key3$.

При выполнении расчетов в температурном диапазоне, когда происходит вспенивание пенообразующей смеси, вводится на каждом шаге по времени коэффициент вспучивания K_{vsp} , зависящий от температуры и времени и определяемый экспериментально.

Общий вид предложенного алгоритма представлен на рисунке 1.13.

При неоднократной прогонке разработанного автором алгоритма можно рассчитать рациональный температурный режим для каждой стадии высокотемпературной термической обработки пенообразующей смеси.

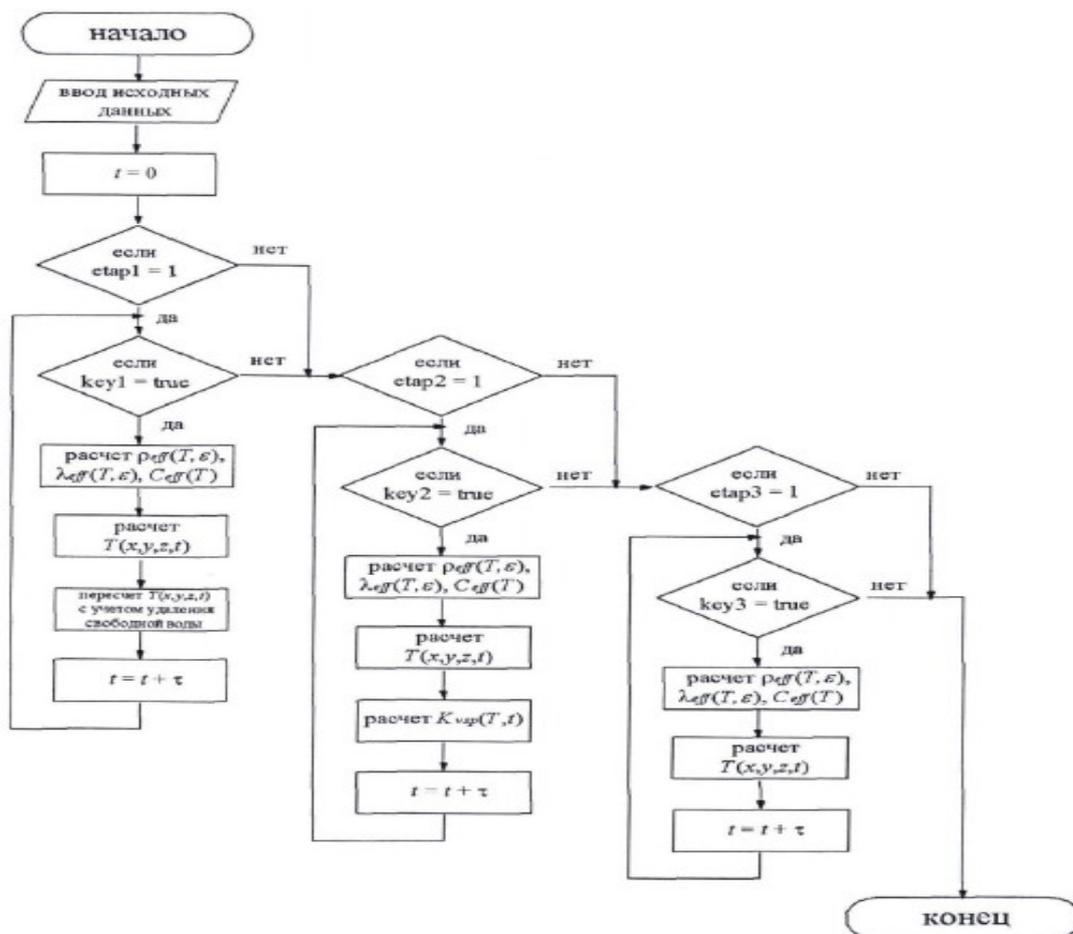


Рисунок 1.13 – Алгоритм проведения расчетов

Недостатком данной модели является выбор коэффициентов, учитывающих процессы вспенивания и отжига экспериментальным путем, это ограничивает область применения и предполагает необходимость выявления или совершенствования имеющихся теоретических знаний, позволяющих описать происходящие физико-химические процессы в технологии пеностекла определенными законами. В последующих работах исследователи рассматривали этапы вспенивания и отжига отдельно, пытаясь создать математическую модель, как можно точнее описывающую реальные процессы.

1.2.3. Математические методы и модели процессов вспенивания пенообразующей смеси при термической обработке материала

Для получения пеностекла порошковым способом смесь измельченного стекла и газообразователя подвергают термическому воздействию при температурах выше точки размягчения стекла и разложения газообразователя. Во время нагрева стеклянные частицы спекаются вместе, при этом образуются поры, в которые попадают частицы газообразователя [107]. Таким образом,

формируются центры роста радиуса пор. Для получения пеностекла с низкой плотностью и с большой объемной массой внешние границы центров роста пор должны увеличиваться. Вследствие подобных процессов толщина образующихся межпоровых стекловидных перегородок уменьшается [107].

Термическое разложение газообразователя и увеличение содержания газовой фазы в сырьевой смеси детерминирует порообразующий потенциал всей смеси. Формированию равномерной пористой структуры по всему объему материала способствует равновесное состояние давления газовой фазы внутри поры и поверхностного натяжения расплава стекла на их границах. Активация газообразователя, приводящая к увеличению давления газовой фазы и, как следствие, объема внутри поры, является инерционным потенциалом роста поры. Выделение газа зависит от массового переноса химически и физически растворенного кислорода в объеме стекла вокруг поверхности поры [50], при ее взаимодействии с углеродом образуется CO или CO₂ – газ.

Наиболее развитые модели, описывающие рост пор или усадку в стеклянном расплаве, рассматривают только единичную пору в бесконечном стеклянном расплаве, имеющую сферическую форму. Очевидным является вывод, что моделирование роста поры в сырьевой смеси с учетом безграничного стекляннного расплава, окружающего последнюю, не даст адекватных зависимостей и представлений о структурных превращениях в процессе термической обработки сырьевой смеси.

Развитие теории роста радиуса поры происходило поэтапно, так, в 1917 году в своей работе [139] Rayleigh J. W. S. первые теоретически описал скорость роста пузырька и вывел общее уравнение для определения давления во всех внутренних точках жидкости:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dr} = -\frac{dv}{dt} - v \frac{dv}{dr}, \quad (1.36)$$

где v – скорость роста пузырька; r – радиус пузырька; ρ – плотность жидкости; t – время.

В 1958 году Черняк Я. Н. в своей работе [126] описал закон сокращения объема пузырька под действием капиллярных сил следующим уравнением:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{\sigma}{\mu}, \quad (1.37)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости; μ – вязкость жидкости.

Уравнения (1.36, 1.37) были обобщены, и представлено решение для изменения радиуса пузырька в невязкой, несжимаемой жидкости [144]:

$$\rho \left(r \frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right) = \Delta p \frac{2\sigma}{r}, \quad (1.38)$$

где Δp – разность между давлениями внутри пузырька и на большом расстоянии от него; $\frac{2\sigma}{r}$ – давление внутри пузырька радиуса r , обусловленное поверхностным натяжением.

Для выражения вязкости и градиента скорости расплава пеностекла после преобразования уравнений (1.36, 1.38) сводится к виду:

$$-\frac{\Delta p}{\rho} = r \frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{4\mu}{r} \frac{dr}{dt} + \frac{2\sigma}{pr}. \quad (1.39)$$

В работе [150] автор рассматривает сжимаемую жидкость и пренебрегает инерционными слагаемыми:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{r}{4\mu} \left(p_{gas} - p_a - \frac{2\sigma}{r} \right). \quad (1.40)$$

Новый подход при разработке математической модели роста радиуса поры в расплаве пеностекла предложен в работе [140]. В основе математической модели лежит уравнение движения вязкой несжимаемой жидкости (Навье–Стокса) и уравнение неразрывности.

Процесс формирования пористой структуры разделен на несколько этапов времени. Первый этап заключается в определении времени нагрева измельченного стекла до температуры разложения газообразователя:

$$\tau_1 = \frac{h^2}{a}, \quad (1.41)$$

где a – коэффициент температуропроводности смеси, $\text{м}^2/\text{с}$; h – характерный масштаб длины в объеме формы, м.

Второй этап расчетов позволяет определить время, необходимое для роста радиуса поры до заданного размера:

$$\tau_2 = \frac{P_0}{a} R^3, \quad (1.42)$$

где α' – коэффициент мощности источника газообразования, Дж/с; P_0 – атмосферное давление, Па; R – радиус поры, м.

Окончательное решение уравнения, описывающее вторую стадию процесса роста радиуса поры, представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение:

$$-\frac{3}{2}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - R(t)\frac{d^2R}{dt^2} = \frac{1}{\rho}\left(P_0 + \frac{\sigma}{R}\right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\beta' + \alpha't}{R^3} + \nu \left[\frac{1}{\left(\frac{dR}{dt}\right)} \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{4}{3R}\left(\frac{dR}{dt}\right) \right], \quad (1.43)$$

где $R(t)$ – функция изменения радиуса поры; β' – коэффициент начальных условий, Дж; α' – коэффициент мощности источника газообразования, Дж/с; P_0 – атмосферное давление, Па.

В работе [146] показано, что подходы, в которых приняты допущения о бесконечном расплаве сырьевой смеси, окружающей единичную пору, могут быть применимы для моделирования процессов структурных превращений только на начальных стадиях роста радиуса пор с размерами порядка 10 мкм. Однако, с течением времени, в условиях роста радиуса пор, последние начинают друг с другом взаимодействовать, тем самым формируя пористую матрицу.

Моделирование роста радиуса единичной поры с учетом бесконечного объема расплава стекла, окружающего пору, является нерациональным по причине того, что при данном допущении не учитывается ячеистая структура конечного материала, а также взаимодействие соседних пор. Ячеистая структура пеностекла показывает, что каждая оболочка поры окружена конечным объемом в рамках границы его стеклянных перегородок. Форма пор в готовом пеностекле является больше полигональной, чем сферической. Это отклонение от сферичности резко увеличивает сложность математического моделирования.

Однако, использование в математической модели сферической формы пор с небольшими объемно-равными перекрытиями (рисунок 1.4), вместо полигональной, позволяет уменьшиться погрешность в расчетах. Это соотношение было установлено путем сравнения моделей со структурой в виде сот, с системами близко расположенных пор [141]. Наиболее яркие области на рисунке 1.14 представляют границы симметрии, обозначающие элементарную ячейку, таким образом, описав одну элементарную ячейку, затем можно аналогично описать остальные ячейки.

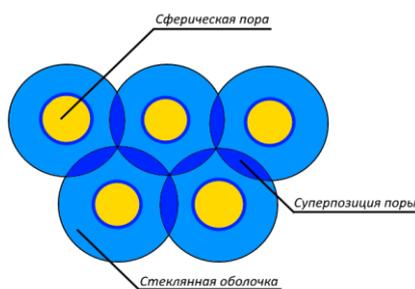


Рисунок 1.14 – Модель сферических пор в пеностекле

При разработке модели в работе [148] рассматривается единичная пора сферической формы с начальным радиусом, окруженная конечным объемом расплава сырьевой смеси. Это позволяет свести трехмерную задачу к одномерной задаче в сферических координатах.

Важным аспектом моделирования процесса роста поры является влияние увеличения радиуса поры на объем расплава стекла. Учитывая сферическую форму поры, окруженную оболочкой стекла, толщина оболочки уменьшается при увеличении радиуса поры, поскольку предполагается постоянный объем формы для вспенивания. На начальной стадии частички стекла оплавляются, слипаются друг с другом и образуют пустоты. С ростом температуры происходит сначала усадка смеси в результате перехода с твердого состояния в расплавленное, затем начинает активизироваться газообразователь, находящийся внутри пустот, и повышается внутреннее давление, тем самым формируя пору. Усадка (уменьшение геометрических размеров) происходит до тех пор, пока давление внутри образующейся поры не сравняется с давлением на поверхности. Увеличение концентрации образующегося газа постепенно приводит к росту внутреннего давления и увеличению радиуса поры.

Для определения значений различных давлений, возникающих в стеклянном расплаве при $r = R_1$ и $r = R_2$, а также влияния поверхностного натяжения на рост пор необходимо получить баланс сил. При отсутствии внешних сил на жидкость баланс сил можно получить в соответствии с рисунком 1.15.

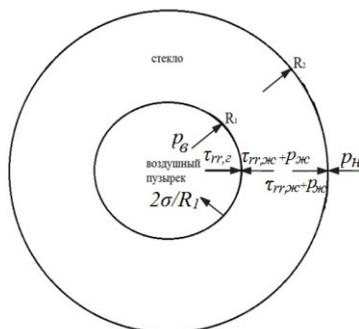


Рисунок 1.15 – Баланс сил на внешней и внутренней границе стеклянной оболочки, стрелки указывают направление сил

Как уже отмечалось, внешняя граница поры при $r = R_2$ не является реальной внешней границей, а является границей стеклянной оболочки соседней поры. Поскольку рассматривается одна пора с ее оболочкой, исходным давлением является давление, приложенное ко всей системе (пора + стеклянная оболочка). Учитывая симметрию структуры пор в рассматриваемой модели пористой структуры, давление, действующее на стеклянную оболочку при $r = R_2$ (давление на внешней границе расплава стекла), образующееся в ходе реакции газообразования при термическом разложении газообразователя на этапах вспенивания, получен баланс сил [148]:

1) для $r=R_1$:

$$p_g + \tau_{rr,g}(R_1) = p_{ж}(R_1) + \tau_{rr,ж}(R_1) + \frac{2\sigma}{R_1}, \quad (1.44)$$

где p_g – давление газа внутри поры, p_n – давление на внешней (наружной) границе расплава стекла, σ – коэффициент поверхностного натяжения [Н/м], $\frac{2\sigma}{R_1}$ – напряжение, действующее перпендикулярно поверхности жидкости из-за поверхностного натяжения;

2) для $r=R_2$:

$$p_n = p_{ж}(R_2) + \tau_{rr,ж}(R_2). \quad (1.45)$$

Радиальное напряжение вязкости газовой фазы $\tau_{rr,g}$ очень мало по сравнению с $\tau_{rr,ж}$ жидкой фазы, и поэтому им можно пренебречь. $\tau_{rr,ж}$ задается следующим уравнением:

$$\tau_{rr,ж} = -\mu \cdot \left[2 \frac{dv_r}{dr} \right] + \frac{2}{3} \mu \cdot (\nabla \cdot v), \tau_{rr} = -\mu \left[2 \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] + \left(\frac{2}{3} \mu - \right) (\nabla \cdot v), \quad (1.46)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости жидкости [Па·с].

После объединения уравнений (1.45, 1.46):

$$\tau_{rr} = -2\mu \cdot \frac{dv_r}{dr}; \quad (1.47)$$

$$r^2 v_r = \text{const} = R_1^2 v_{R_1} \leftrightarrow v_r = \frac{R_1^2}{r^2} v_{R_1}, \quad (1.48)$$

где v_{R_1} – скорость роста радиуса поры R_1 .

Полученные уравнения, описывают напряжения во внутреннем радиусе (R_1) (1.49) и внешнем радиусе (R_2) (1.50):

$$\tau_{rr,жс}(R_1) = \frac{4\mu}{R_1} \cdot \frac{dR_1}{dt}; \quad (1.49)$$

$$\tau_{rr,жс}(R_2) = \frac{4\mu}{R_2} \cdot \frac{dR_2}{dt}. \quad (1.50)$$

Из баланса сил следует:

$$p_{жс}(R_1) - p_{жс}(R_2) = 0. \quad (1.51)$$

Получено:

$$p_в - p_н - \frac{2\sigma}{R_1} - 4\mu \left(\frac{dR_1}{dt} \cdot \frac{1}{R_1} - \frac{dR_2}{dt} \cdot \frac{1}{R_2} \right) = 0. \quad (1.52)$$

Поскольку общий объем расплава стекла оболочки поры ($V_{жс}$) принят нами постоянным, R_1 и R_2 будут связаны через уравнение:

$$V_{жс} = \frac{3}{4} \pi \cdot (R_2^3 - R_1^3) = const. \quad (1.53)$$

Таким образом:

$$R_2 = \left[\frac{V_{жс}}{\frac{3}{4} \pi} + R_1^3 \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (1.54)$$

Чтобы получить формулу изменения радиуса R_1 , необходимо вычислить изменение R_2 в зависимости от R_1 :

$$\frac{dR_2}{dt} = \frac{dR_2}{dR_1} \cdot \frac{dR_1}{dt} = \frac{R_1^2}{\left(\frac{3V_{жс}}{4\pi} + R_1^3 \right)^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{dR_1}{dt}. \quad (1.55)$$

Объединяя уравнения (1.52), (1.54) и (1.55), получается уравнение для роста поры [148]:

$$\frac{\partial R_1}{\partial t} = \frac{\frac{3V_{жс}}{4\pi} + R_1^3}{\mu \frac{3V_{жс}}{\pi}} ((p_в - p_n) \cdot R_1 - 2\sigma), \quad (1.56)$$

где R_1 – внутренний радиус пор [м]; $V_{жс}$ – объем расплава стекла в оболочке поры; σ – коэффициент поверхностно натяжения [Н/м]; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости [Па·с]; $p_в$ – давление газа внутри поры, p_n – давление на внешней (наружной) границе расплава стекла.

Таким образом, модель процесса вспенивания и формирования пористой структуры сырьевой смеси представляет собой дифференциальное уравнение для $R(t)$.

Рассмотренные математические модели достаточно точно позволяют описать рост единичной поры сферической формы и не совсем точно описывают реальный процесс, когда происходит формирование ячеистой структуры пеностекла по всему объему [107].

Основная сложность при использовании различных пузырьковых моделей заключается в переходе к объемной модели, состоящей из множества пузырьков. Пузырьки возникают в жидкости в разное время, растут с разной скоростью и периодически сливаются друг с другом.

Непрерывные исследования позволили адаптировать пузырьковую математическую модель к реальному процессу вспенивания пеностекла и разработать ячеечную модель [143]. В модели предлагается весь объем вспененной стекломассы рассматривать как микроскопические ячейки равной массы, состоящие из оболочки. Рост ячеек, соответственно, увеличение объема пены осуществляется за счет диффузии перегретого газа, находящегося внутри оболочки. Такая модель ячейки способна описать важные качественные особенности реальной системы, состоящей из множества отдельных ячеек, растущих в непосредственной близости друг от друга, и может позволить провести анализ макроскопического процесса – расширения всего объема пены [125].

Анализ существующих математических моделей, описывающих формирование пористой структуры пеностекла [137], показал, что существует необходимость в разработке модели, которая позволит описывать процесс вспенивания не только на микроуровне (изменение единичной поры), но и на макроуровне (изменение размера всего объема смеси), так как для возможности описания температурных полей в сырьевой смеси требуется решить краевую задачу с подвижными границами, а без знания закона изменения геометрических размеров смеси это практически невозможно. Моделирование распределения температурных полей в смеси является одним из ключевых

вопросов в совершенствовании технологии производства пеностекла. В данной работе нами не ставились цели по описанию влияния закона изменения размера пор на решение уравнений теплопроводности в смеси, однако умолчать о данном факте мы не можем. Возвращаясь к вопросу моделирования роста пузырька, стоит отметить, что в идеале модель должна учитывать не только описанные нами выше эффекты вязкости стекла и поверхностного натяжения, но и протекающие процессы диффузии, так как именно массоперенос расплавленного стекла определяет законы формирования пористой структуры пеностекла.

1.2.4. Математические методы и модели процессов отжига и остывания пенообразующей смеси при термической обработке материала

В рамках модели, описанной в работе [2], пеностекло рассматривается как система, состоящая из нескольких слоев стекла, при этом каждый слой соединяется между собой с помощью перегородок. При нагреве происходит процесс увеличения объема стекломассы, что ведет к деформации некоторых участков. Такая постановка позволила выделить два параметра, которые способны описать состояние отдельно взятого слоя: это свободный и фактический размер слоя.

В работе [2] принимается, что свободный размер l' – это размер слоя в заданный момент времени, соответствующий ненапряженному состоянию материала. Фактическим размером l в работе [2] называют действительный линейный размер слоя в соответствующем направлении. При этом принимается, что фактический размер всех компонентов будет одинаков.

Величина деформации слоев определяется следующим выражением:

$$\Delta l = l - l'. \quad (1.57)$$

Для определения величины свободного размера слоя используется коэффициент температурного (линейного) расширения стекла. Для определения величины фактического размера слоя рассчитываются среднеарифметические значения всех свободных размеров слоев исследуемого образца:

$$l = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}. \quad (1.58)$$

Так как стекло относится к хрупким материалам, то его разрушение сопровождается упругими деформациями (возможно, с небольшой долей пластических деформаций).

В соответствии с законом Гука для упругих деформаций наличие деформации слоев образца сопровождается образованием в них различного рода напряжений.

В рамках рассмотренной в работе [2] геометрической модели пеностекла (рисунок 1.16) под воздействием температуры размеры отдельных слоев пеностекла стремятся к своим свободным величинам.

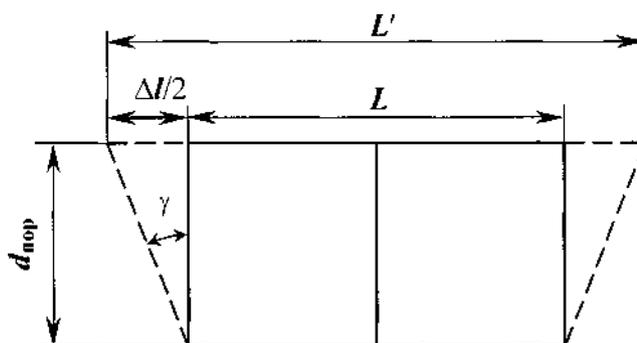


Рисунок 1.16 – Образование напряжений в блоке пеностекла

В результате в слоях имеет место деформация величиной Δl , которая ведет к образованию нормальных напряжений в соответствии с законом Гука:

$$\sigma = E \cdot \Delta l / L, \quad (1.59)$$

где E – модуль упругости.

С другой стороны, так как слои связаны друг с другом посредством перегородок, то в результате деформации одного из слоев перегородка будет стремиться отклониться на некоторый угол γ . В результате подобных угловых деформаций в перегородках возникают касательные напряжения.

В силу малой величины деформации угол γ можно определить как отношение деформации Δl к среднему диаметру пор:

$$\gamma = \Delta l / (2 \cdot d_{\text{пор}}). \quad (1.60)$$

Таким образом, формула для определения величины касательных напряжений в пеностекле будет выглядеть следующим образом:

$$\tau = \frac{(\Delta l) \cdot G}{2 \cdot d_{\text{пор}}}. \quad (1.61)$$

В работе [2] предлагается прочность пеностекла рассчитывать по величине нормальных напряжений в слоях образца и касательных напряжений в перегородках между ними. Отметим, что в слоях пеностекла при отжиге имеют место процессы релаксации, оказывающие существенное влияние на величину напряжений, в связи с чем в рассматриваемой математической модели образованию напряжений в слое пеностекла уделяется основное внимание.

Математическая модель построена на принципе суперпозиции Больцмана. Весь процесс отжига разбивается на малые промежутки времени, в течение которых температура и свойства материала неизменны, а при переходе на следующий рассматриваемый промежуток происходит скачкообразное изменение температуры и свойств материала.

Для расчета релаксации напряжений предложен дискретный подход:

$$\frac{\sigma(t)}{\sigma(0)} = \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau_{\sigma}} \right)^{b_{\sigma}} \right]. \quad (1.62)$$

Для стекол, применяемых в качестве сырьевой смеси, при производстве пеностекла b_{σ} примерно равен 0,5. Преобразование уравнения (1.62) с учетом данного факта приводит его к следующему виду:

$$\frac{\sigma(\mathbf{t}_k)}{\sigma(\mathbf{t}_0)} = \exp \left[- \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \Delta t_i}{\tau_{\sigma i}}} \right]. \quad (1.63)$$

Учитывая закон Гаусса, уравнение для расчета суммарной релаксации для нормальных напряжений примет вид:

$$\sigma_p(\mathbf{t}_k) = - \frac{E \cdot \Delta l}{l} \exp \left[- \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \Delta t_i}{\tau_{\sigma i}}} \right]. \quad (1.64)$$

Для расчета касательных напряжений:

$$\tau_p(\mathbf{t}_k) = - \frac{G \cdot \Delta l}{2 \cdot d_{nop}} \exp \left[- \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \Delta t_i}{\tau_{\sigma i}}} \right]. \quad (1.65)$$

Окончательный вид уравнений, описывающих абсолютные значения возникающих напряжений в рассматриваемых слоях пеностекла, будет иметь следующий вид для нормальных напряжений:

$$\sigma_{pez,k} = \sum_{i=1}^k \sigma_i - \sigma_{p,k}. \quad (1.66)$$

И, соответственно, для касательных напряжений:

$$\tau_{pez,k} = \sum_{i=1}^k \tau_i - \tau_{p,k}. \quad (1.67)$$

Учет релаксации всей структуры пеностекла производится при вычислении структурной температуры, претерпевшей изменения на шаге k :

$$T_{f,k} = T_0 = \sum_{i=1}^k \left(1 - \exp \left[- \left((\xi_k - \xi_i) \cdot \frac{K_s}{\eta_r} \right)^{b_s} \right] \cdot \Delta T_i \right). \quad (1.68)$$

При этом вязкость стекла на каждом этапе расчета предлагается рассчитывать по следующему уравнению:

$$\lg \eta_k = A + \frac{B}{T_{f,k} - T_0}. \quad (1.69)$$

Точность расчетов будет зависеть от количества этапов расчета, чем меньше промежутков времени будет приниматься, тем точнее будут расчеты.

1.3. Выводы по главе 1

1. Проведенный сравнительный анализ показал, что по комплексу физико-механических свойств наиболее перспективно применение пеностекла для создания новых композиционных теплоизоляционных материалов. Его отличает от всех используемых материалов низкая теплопроводность, высокая прочность при малой объемной массе, химическая и биологическая устойчивость, большая морозостойчивость и долговечность. Все эти свойства определяют высокую конкурентную способность данного материала.

2. Наиболее эффективным и распространенным способом производства пеностекла является порошковый метод получения. Данный метод дает

возможность получать пеностекло с различной структурой и свойствами в зависимости от зернового состава порошков, вида и количества газообразователя, температуры и продолжительности процесса спекания. При порошковом методе изготовления пеностекла можно регулировать процесс порообразования в спекаемой массе.

3. Анализ способов получения пеностекла показывает, что пеностекло с оптимальной структурой, содержащей максимум замкнутых ячеек, образуется при вспенивании гомогенных с оптимальной вязкостью расплавов, в которых обеспечиваются, с одной стороны, плавное и беспрепятственное вспенивание, с другой – высокая устойчивость сформировавшейся пены за счет ее структурно-механического фактора. Эти условия достигаются при синтезе пиропластических систем на основе стекол, имеющих наименьший градиент вязкости в области температур вспенивания, и при наличии изотермии в смеси и ее спеках в области температуры формирования пеностекла.

4. Выявлены основные недостатки непрерывного способа вспенивания, заключающиеся в факторе регулирования показателей температуры на разных участках ленты для вспенивания. В различных концах ленты наблюдаются эффекты термической деструкции материала и внутренние напряжения, что приводит к хрупкости материала и его разрушению.

5. К недостаткам одностадийного способа производства пеностекла необходимо отнести отсутствие возможности поддержания требуемой для вспенивания изотермии в поперечном сечении канала печи и несогласованность дилатометрических свойств пеностекла и металлических стенок форм, что приводит к механической деструкции блоков на стадии отжига.

6. При исследовании процесса термической обработки пеностекла используют методы и модели математического описания процессов, которые учитывают как физико-химическую составляющую технологии производства пеностекла, так и температурные условия получения. Следует отметить тот факт, что особенности теплопереноса в системе «пеностекло – металлическая форма» проработаны в недостаточной степени.

ГЛАВА 2. ПЛАНИРОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Характеристика исходных сырьевых материалов для получения пеностекла

В качестве сырьевых материалов служили бой листового стекла и мел природный сухомолотый. Материалы подвергались помолу в снековой дробилке до прохождения через сито 0,063. Химический состав применяемых материалов указан в таблицах 2.1, 2.2.

Таблица 2.1 – Химический состав боя листового стекла, мас.%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
71,7-72,4	1,75-2,05	0,06-0,12	6,7-7,1	3,9-4,3	13,4-15	0,58-1,5	0,4-0,5

Таблица 2.2 – Химический состав сухомолотого природного мела, мас.%

CaCO ₃	MgCO ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
98,06-98,5	-	-	-	0,02-0,07	0,06-0,24

2.2. Описание методики экспериментальных исследований физических свойств пеностекла

При проведении исследований руководствовались стандартом [26], согласно которому предусмотрены следующие методы испытаний изделий из пеностекла:

- термическое сопротивление и теплопроводность;
- прочность при сжатии;
- прочность при изгибе;
- прочность при растяжении в плоскости плиты;
- водопоглощение;
- паропроницаемость;
- звукопоглощение.

Также соблюдались требования нормативных документов по строительным и теплоизоляционным материалам [25, 27, 103, 104].

2.2.1. Методика определения плотности пеностекла

Определение плотности для теплоизоляционных материалов проводится в соответствии с ГОСТ [25].

Для этого исследуемый образец взвешивают с точностью не ниже 0,5 %. Измеряют геометрические размеры изделия: замеры проводят при помощи штангенциркуля в 3–5 точках для каждой линейной составляющей (диаметр, длина, ширина, высота) и находят среднее арифметическое по каждому из размеров. После чего вычисляют объем образца по известным формулам для определенной геометрической фигуры.

Вычисление плотности образца (ρ) проводят по следующей формуле:

$$\rho = \frac{m}{V \cdot (1 + 0,01 \cdot L)}, \quad (2.1)$$

где m – масса исследуемого образца, кг; V – объем занимаемый образцом массы m , м³; L – влажность образца, %.

2.2.2. Методика определения водопоглощения пеностекла

Определение водопоглощения проводится в соответствии с ГОСТ [25], который распространяется на строительные теплоизоляционные материалы.

В основе определения лежит нахождение массы воды, которую смог поглотить полностью сухой материал за заданный промежуток времени.

Насыщение образца водой проводится в стеклянном или любом другом сосуде (позиция 4 на рисунке 2.1), в него помещают перфорированную подставку (позиция 3), сверху которой устанавливается исследуемый образец (позиция 2). Далее на образец помещают металлический груз (позиция 1) в виде сетки или перфорированной пластины, который будет препятствовать всплытию образца. После этого в сосуд наливают воду обычной комнатной температуры и доводят ее уровень выше груза (позиция 1) на 2–4 см.

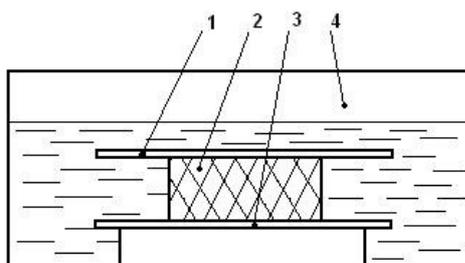


Рисунок 2.1 – Установка для определения водопоглощения:
1 – груз; 2 – образец; 3 – перфорированная подставка; 4 – сосуд

В таком положении образец насыщается в течение 24 ч, после чего его вынимают из сосуда 4 и через 30 секунд взвешивают на весах в сухой плоской ёмкости.

После этого вычисляют водопоглощение образца (W^n) по формуле:

$$W^n = \frac{m_1 - m_2 - m_3}{m_2} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

где m_1 – общая масса образца, насыщенного водой, и ёмкости для взвешивания, г;

m_2 – масса высушенного образца до насыщения водой, г;

m_3 – масса сухой ёмкости для взвешивания, г.

2.2.3. Методика определения влажности пеностекла

Определение влажности заключается в определении содержания воды в образце материала путем деления массы образца до сушки на массу образца, полученную после сушки материала в течение 6 ч при температуре 60 °С в муфельной печи.

Таким образом, влажность образца (W) вычисляют по следующей формуле:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

где m_1 – масса влажного образца, г; m_2 – масса образца, высушенного в муфельной печи, г.

Результат вычисления округляют до 0,1 % [25].

2.2.4. Методика определения предела прочности при сжатии

Метод основан на измерении сжимающих усилий, которые вызывают частичное или полное разрушение образца при испытании его в соответствующих условиях [25].

До начала испытаний готовится специальный образец из исследуемого материала в форме куба с ребром 100 ± 1 мм. При этом длина и ширина оснований, через которые на образец будет оказываться сжимающее усилие, не должны отличаться более чем на $\pm 0,1$ мм по соответствующим параллельным ребрам. За длину и ширину оснований принимают среднеарифметический

результат четырех измерений. Кроме того, все параллельные ребра в испытуемом образце не должны отличаться более чем на $\pm 0,5$ мм.

Испытания проводят следующим образом. Образец помещают в машину для испытаний (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Общий вид пресса

При испытании следят за тем, чтобы направление сжимающего усилия совпадало с вертикальной осью образца, после чего проводят испытание до разрушения образца (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Сжатие исследуемого образца

Разрушающей полагают максимальную нагрузку, которую фиксируют в момент разрушения образца при проведении испытания (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Вид исследуемого образца после испытания

Предел прочности при сжатии (R) находится по формуле:

$$R_{сж} = \frac{P}{l \cdot b}, \quad (2.4)$$

где P – нагрузка, при которой произошло разрушение образца, Н (кгс);
 l – длина образца, см; b – ширина образца, см.

Итоговый результат вычислений округляют до 0,01 МПа.

За результат испытания принимают среднее арифметическое результатов всех испытаний:

$$\sigma_{изг} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i, \quad (2.5)$$

где n – количество образцов; σ_i – предел прочности на изгиб i -го образца.

2.2.5. Методика определения предела прочности на изгиб

Образец устанавливают на опоры, расстояние между которыми заранее измеряется (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Вид опоры для испытаний

Машину включают и нагружают образец до его разрушения (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Испытание на прочность на изгиб

Изгибающая сила должна быть приложена к середине пролета под прямым углом к образцу. Выключают машину и снимают показания по шкале

нагрузки, очищают приспособление от остатков разрушенного образца. При испытании на изгиб образцы, разрушившиеся не в средней трети длины, в расчет не принимают.

Предел прочности на изгиб в МПа ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) вычисляют по формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P \cdot l}{b \cdot h^2}, \quad (2.6)$$

где P – разрушающая нагрузка, Н (кгс); l – расстояние между опорами, мм; b – ширина образца, мм; h – высота образца, мм.

Вычисление предела прочности на изгиб производят с точностью до второго десятичного знака с последующим округлением до первого десятичного знака.

Максимальная относительная погрешность определения предела прочности на изгиб образца – не более 5 %.

За результат испытания принимают среднее арифметическое результатов всех испытаний.

2.3. Описание методики экспериментальных исследований теплофизических свойств пеностекла

2.3.1. Определение коэффициента теплопроводности пеностекла (численные исследования)

В ходе всех экспериментов коэффициент теплопроводности получаемого материала рассчитывался по следующей аддитивной формуле:

$$\lambda_i = \lambda_{\text{стекла}} \cdot V_i + \lambda_{\text{воздуха}} \cdot V_{i \text{ воздуха}}, \quad (2.7)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности i -того образца, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\lambda_{\text{стекла}}$ – коэффициент теплопроводности стекла, $\lambda_{\text{стекла}} = 0,0074 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; V_i – объемная масса i -того образца, м^3 ; $\lambda_{\text{воздуха}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, $\lambda_{\text{воздуха}} = 0,0255 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [7]; $V_{i \text{ воздуха}}$ – объемная масса воздуха i -того образца, м^3 .

$$V_{i \text{ воздуха}} = 1 - V_i; \quad (2.8)$$

$$V_i = M_i / \rho_{\text{стекла}}, \quad (2.9)$$

где M_i – масса i -того образца, кг; $\rho_{\text{стекла}}$ – плотность стекла, $\rho_{\text{стекла}} = 2500 \text{ кг/м}^3$.

2.3.2. Определение коэффициента теплопроводности (экспериментальный метод)

Для определения теплофизических характеристик использовали метод нестационарного режима, когда подводимая к нагретому телу теплота обеспечивает подъем температуры в теле в зависимости от времени его нагрева. Для проведения измерений использовалась муфельная печь (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Общий вид муфельной печи

В муфельную печь помещали опытный образец. На опытном образце были установлены термопары, которые подключались к системе контроля температуры КТС-5.8-RS485 (рисунок 2.8).

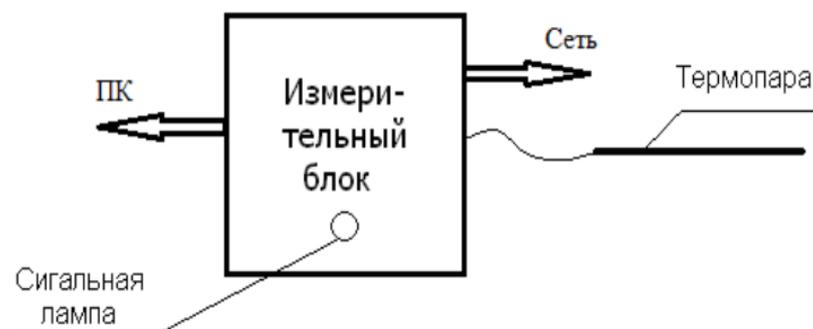


Рисунок 2.8 – Схематическое изображение система контроля температуры КТС-5.8-RS485

Общая схема подключения показана на рисунке 2.9.

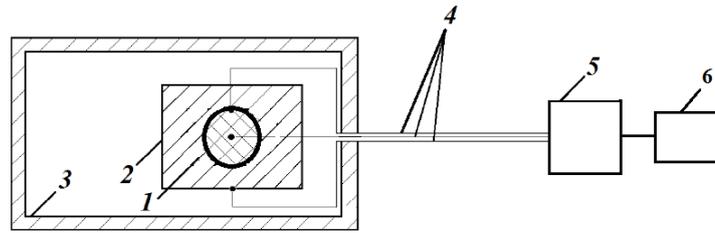


Рисунок 2.9 – Схема измерительного устройства:

- 1 – исследуемый образец в форме цилиндра; 2 – платформа;
3 – корпус рабочей зоны печи; 4 – термопары; 5 – измерительный блок;
6 – персональный компьютер

Производитель системы контроля температуры КТС-5.8-RS485 является ООО «НПП «Техноцентрприбор». Основные технические характеристики прибора показаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Технические характеристики системы контроля температуры

Характеристика		Значения
1. Диапазон измеряемых температур		-40...+1100 °С
2. Погрешность измерения		1%
3. Разрешение по температуре		1°С
4. Номинальная статистическая характеристика термопреобразователя		К (ХА) по ГОСТ Р- 8.585-2001
5. Диапазон температур при эксплуатации		0-50°С
6. Питание		220 В, 0..50 гц
7. Потребляемая мощность		50 Вт
8. Длина термопары		2000 мм
9. Ширина термопары		300 мм
10. Габаритные размеры измерительного блока	Высота	300 мм
	Глубина	150 мм

Характеристики термопары:

- Диапазон температур измерения – до 1100 °С;
- L – 2000 мм;
- d – 1,2 мм.

Вид применяемых термопар показан на рисунке 2.10.

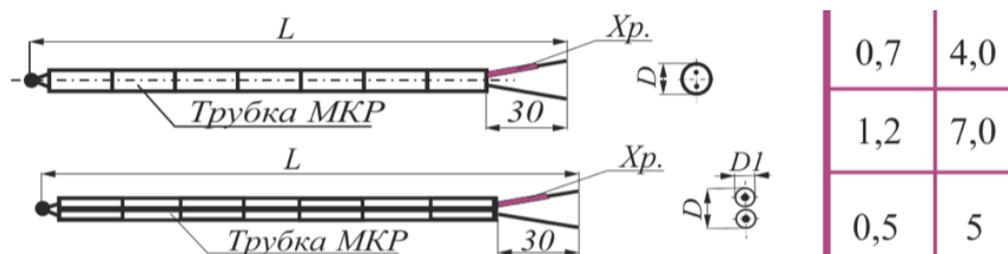


Рисунок 2.10 – Схематический вид применяемых термопар

Система имеет преобразователь интерфейсов и программное обеспечение, что позволяет собирать, архивировать, просматривать и анализировать полученные данные.

Основные функции программы:

- периодический опрос прибора согласно конфигурируемым параметрам;
- архивация пакетов данных в базе данных (БД) формата MySQL с возможностью последующего редактирования;
- обработка нештатных ситуаций (отсутствие данных от прибора по истечении заданного времени (timeout), ошибка в данных и т.п.);
- просмотр данных в виде таблиц и графиков (с возможностью фильтрации поиска по приборам, каналам, интервалам времени и т.п.) с задаваемой периодичностью обновления информации из БД;
- экспорт данных в другие программы;
- обеспечение возможности работы как на отдельном ПК, так и в составе локальных сетей.

Состав используемой установки:

1. Термопара ТПК (хромель-алюмель) L-2000 мм (-400...+1100 °С);
2. Измерительный блок в металлическом корпусе;
3. Компенсационный кабель в металлорукаве L-5 м с разъемами типа ШР;
4. Фильтр сетевой;
5. Провода, соединители;
6. Преобразователь интерфейсов.

2.4. Оборудование для экспериментальных исследований и средства контроля

2.4.1. Аппаратурное обеспечение для измерения показателей температуры блока пеностекла

Блок пеностекла был снят с конвейера на стадии извлечения блоков из форм (станция извлечения) и размещен на поддоне (на воздухе). На блоке были зафиксированы термопары в центре и на поверхности в соответствии с рисунком 2.11. Для проведения измерений использовалась система контроля температуры КТС-5.8-RS485.

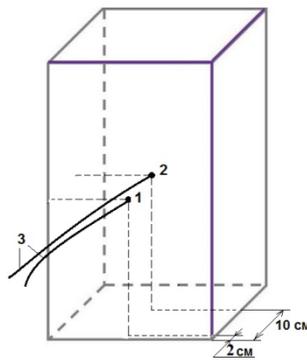


Рисунок 2.11 – Распределение термопар на исследуемом блоке:
 1 – расположение термопары на поверхности блока из пеностекла;
 2 – расположение термопары в центре блока из пеностекла;
 3 – термопары для измерения температуры

Высота предварительно фрезерованного брутто-блока 20,6 см.

В процессе измерения образец охлаждался от температуры t_1 до t_2 за время τ , при этом температура материала в центре блока всегда была выше, чем температура на поверхности.

2.4.2. Аппаратурное обеспечение экспериментальной технологической установки для получения пеностекла

Приготовление композиции и переработка ее в изделие, пеностекольный материал, осуществляется в несколько этапов:

- взвешивание всех необходимых компонентов согласно рецептуре смеси;
- измельчение компонентов в шаровой мельнице;
- увлажнение сырьевой смеси после помола;
- компактирование заготовки на одноосном гидравлическом прессе;
- сушка прессовки;
- вспенивание и отжиг образцов в муфельной печи;
- обработка полученного материала режущим инструментом для придания правильной геометрической формы;
- нахождение основных физико-механических характеристик материала согласно стандартным методикам.

Все необходимые компоненты взвешиваются на аналитических весах (рисунок 2.12) в соответствии с рецептурой и помещаются в барабан валковой мельницы, где в течение 1,5 часов происходит их помол и одновременно перемешивание.



2.12 – Общий вид весов

Увлажнение сырьевой смеси производилось путем введения в нее 10% воды, что необходимо для придания смеси таких важных технологических свойств, как формуемость при прессовании и отсутствие пыления.

После увлажнения смеси необходимое количество смеси помещалось в стальную цилиндрическую форму диаметром 2,5 см. Процесс формования заготовки осуществлялся на лабораторном прессе при давлении прессования 8–12 МПа.

Полученную заготовку диаметром 2,5 и высотой 5 см извлекали из формы и подвергали сушке в сушильном шкафу в течение 1 часа при температуре 95 °С.

Вспенивание образцов проводилось в лабораторной камерной электропечи.

Помол стекла и мела смешивались в пропорциях от 3% до 7% газообразователя от общей массы пенообразующей смеси. Производилась засыпка смеси в разборную металлическую форму с последующем уплотнением. Затем форма помещалась в печь (рисунок 2.13), где происходила термическая обработка пенообразующей смеси до получения пеностекла.



Рисунок 2.13 – Общий вид печи для проведения лабораторных исследований

Температурные режимы и временные интервалы термической обработки в ходе проведения серии экспериментов показаны на рисунке 2.14.

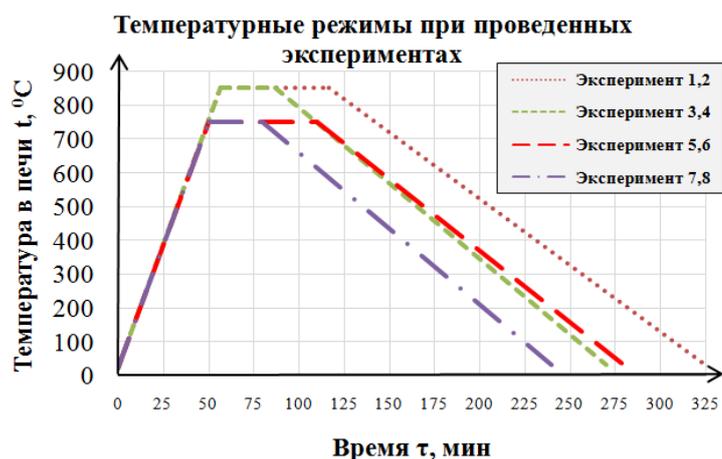


Рисунок 2.14 – Температурные кривые условий термической обработки пенообразующей смеси до получения пеностекла

Остывшие образцы извлекались из печи, подвергались опиловке до придания правильной геометрической формы для проведения испытаний по определению теплофизических характеристик.

2.5. Математический аппарат для экспериментальных исследований

Чтобы получать материалы с наилучшими физико-механическими характеристиками, когда улучшение одной из них ведет к ухудшению другой, применительно к пеностекляным материалам, необходима точная оптимизация составов и температурных режимов термической обработки. При этом необходимо учитывать требования к показателям качества готового изделия. Так, к изделиям из пеностекла, предназначенным для тепловой изоляции зданий и сооружений при температуре от минус 40 °C до плюс 100 °C, предъявляются следующие требования (таблица 2.4) [26].

Таблица 2.4 – Основные требования к пеностеклу

Условное обозначение	Характеристика и единицы измерения условного обозначения	Предъявляемые требования
b	ширина образца, мм (см)	Для плиты 450 Для блока 250
d_N	номинальная толщина образца, мм (см)	Для плиты от 40 до 220 Для блока от 200 до 300
l	длина образца, мм (см)	Для плиты 600 Для блока 300
W_o^n	водопоглощение при кратковременном полном погружении, %	не более 5,0% по объему

Условное обозначение	Характеристика и единицы измерения условного обозначения	Предъявляемые требования	
W_o^n	Водопоглощение изделий при кратковременном частичном погружении образцов, кг/м ²	0,5	
W_o^n	Водопоглощение изделий при частичном погружении образцов в течение 28 сут, кг/м ²	2	
$\Delta\varepsilon_b$	относительное изменение ширины, %	Не должно превышать 0,5	
$\Delta\varepsilon_d$	относительное изменение (уменьшение) толщины, %	Не должно превышать 1	
$\Delta\varepsilon_l$	относительное изменение длины, %	Не должно превышать 0,5	
λ_0	теплопроводность в сухом состоянии при заданной температуре, Вт/(м·К)	при температуре 25 °С не должна превышать 0,065 Вт/(м·К).	
ρ	плотность материала, кг/м ³	D 90	80 - 100
		D 110	101 - 120
		D 130	121 - 140
		D 150	141 - 160
		D 180	161 - 200
$\sigma_{сж\ 10}$	прочность на сжатие при 10% ном относительном поверхностном разрушении, МПа	D 90	0,3
		D 110	0,5
		D 130	0,7
		D 150	1,5
		D 180	2
$\sigma_{игб}$	предел прочности на растяжение при изгибе, МПа, не менее	D 90	0,2
		D 110	0,3
		D 130	0,4
		D 150	0,5
$\sigma_{раст}$	предел прочности при растяжении перпендикулярно к лицевым поверхностям, МПа, не менее	D 90	0,1
		D 110	0,1
		D 130	0,1
		D 150	0,15
		D 180	0,15
$D_{соср.\ нагр}$	Деформация при действии сосредоточенной нагрузки, мм, не более	D 90	3
		D 110	2
		D 130	1,5

Условное обозначение	Характеристика и единицы измерения условного обозначения	Предъявляемые требования	
		D 150	1,5
		D 180	1,5
W_c	Максимальная сорбционная влажность изделий, % массы	0,7	
$A_{эфф}$	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов в изделиях из пеностекла не должна превышать, Бк/кг	370	
	Класс горючести	НГ	

Сбор и анализ априорной информации позволят определить основные факторы и уровни варьирования для проведения активного эксперимента, основанного на математическом моделировании (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Входные факторы, управляющие воздействия, показатели качества и их условные обозначения

Входные факторы			Управляющее воздействие (Регулируемые процессы)			Выходные факторы (Показатели качества)			
№ п/п	Наименование, ед. изм	Усл. обозн.	№ п/п	Наименование, ед. изм	Усл. обозн.	№ п/п	Наименование, ед. изм	Усл. обозн.	
1.	Масса стекла, кг	M_c	1.	Температурный режим термообработки, °C	T	1.	Плотность, кг/м ³	ρ	Обязательные показатели качества по ГОСТ
2.	Масса газообразователя, кг	M_T	2.	Время процесса, мин	t	2.	Теплопроводность, Вт/(м·К)	λ	
3.	Масса добавок, кг	M_d	3.	Давление, Па	P	3.	Прочность на сжатие, Мпа	$\sigma_{сж}$	
4.	Процентное отношение стекла от всей смеси, %	Δ_s	4.	Вязкость, Па·с	η	4.	Прочность на изгиб, Мпа	$\sigma_{изг}$	
5.	Процентное отношение газообразователя от всей смеси, %	Δ_g	5.	Влажность, %	ϕ	5.	Деформация при действии сосредоточенной нагрузки, мм	$D_{соср. нагр}$	

Входные факторы			Управляющее воздействие (Регулируемые процессы)			Выходные факторы (Показатели качества)			
6.	Процентное отношение добавок от всей смеси, %	Δ_d				6.	Предел прочности при растяжении перпендикулярно к лицевым поверхностям, МПа	$\sigma_{\text{раст}}$	Дополнительные критерии
7.	Плотность, кг/м ³	ρ				7.	Водопоглощение, %	W_0	
8.	Порозность	П				8.	Сорбционная влажность, %	W_c	
9.	Размер частиц (тонкость помола), см ² /г	S				9.	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	$A_{\text{эфф}}$	
10.	Теплопроводность, Вт/(м·К)	λ				10.	Теплоемкость, Дж/К	C	
11.	Температуропроводность, м ² /с	a				11.	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	μ	
12.	Теплоемкость, Дж/К	C				12.	Морозостойкость, кол-во циклов	F	
13.	Влагосодержание, %	W				13.	Долговечность, лет	L	
14.	Размеры формы, мм	a,b,c				14.			

Существует несколько подходов для определения поведения стохастических систем. При решении задач, направленных на оптимизацию и описание системы, пользуются локально-интегральными полиномиальными моделями. Наиболее часто применяемой моделью данного типа является уравнение регрессии, описанное полиномом второго порядка, который записывается в виде [17, 18, 19]:

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_i^2 + \sum b_{ij} x_i x_j, \quad (2.10)$$

где b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – коэффициенты уравнения регрессии; $x_{i,j}$ – независимые переменные или факторы процесса; Y – выход системы/функция отклика; $Y = f(x)$ /параметр оптимизации.

Коэффициенты уравнения регрессии (b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}) находятся на основе экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

Для этого к реализации может быть принят D-оптимальный план Бокса-Бенкина размерности $K = 3$, особенностью которого является то, что, изменяя три параметра на трех уровнях варьирования, он позволяет обработать данные, основываясь на математических и статистических принципах одновременно. Планы такого типа обеспечивают наименьшую область рассеивания оценок параметров и уменьшают значение дисперсии в заданной области плана. Кроме того, они обладают наименьшим определителем ковариационной матрицы и свойством рототабельности, которое обеспечивает подбор точек матрицы с одинаковой точностью предсказания значений функции отклика вне зависимости от направления исследования.

Все полученные данные обобщаются и подвергаются математической обработке, которая направлена на нахождение коэффициентов уравнения регрессии. Не все из этих коэффициентов влияют на конечные свойства материала, некоторыми можно пренебречь. Для этого проводится их проверка на значимость по специальным формулам сравнения [1, 4, 9, 27].

Когда найдены все значимые коэффициенты, проводится анализ адекватности математической модели, которую оценивают на основании сравнения среднеквадратичного отклонения на нулевом уровне ($S_{\{Y_0\}}$) с расчетным среднеквадратичным отклонением ($S_{\Delta U}$), так как это допускается в полиномиальной модели типа плана Бокса-Бенкина. Модель считают адекватной, если $S_{\{Y_0\}} > S_{\Delta U}$ [47, 54, 55, 110].

После определения адекватности модели на основании уравнений регрессии строятся поверхности отклика, характеризующие комплекс свойства получаемого материала в широком интервале изменения композиций и температурного режима.

2.6. Выводы по главе 2

1. В соответствии с поставленными задачами была определена методика проведения экспериментальных исследований пеностекла, а также изучены физико-химические характеристики исходного и готового материала.

2. Подобраны и описаны характеристики используемых при проведении экспериментов оборудования и контрольно-измерительного оборудования.

3. Выбран и обоснован план проведения многофакторного эксперимента, определены функции отклика, исследуемые факторы и уровни их варьирования.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЕНОСТЕКЛА

3.1. Математические методы моделирования тепломассопереноса в технологии пеностекла

В настоящее время внимание ученых привлекает математическое моделирование процессов термической обработки при получении пеностекла [23]. Моделирование процессов термической обработки осуществляется на основе теории теплопереноса, которая позволяет учитывать влияние макрофизических параметров друг на друга.

Немаловажным является физическая сущность процесса, т.к. тепловые характеристики напрямую зависят от других физических параметров, которые меняются с течением времени и при изменении температуры [15]. Безусловно, не стоит упускать тот момент, что исходный материал до воздействия на него необходимых температур является пористой средой, в которой пораами выступают микропространства, не заполненные измельченным стеклом и газообразователем [105].

3.1.1. Общая физическая постановка задачи

Сырьевая смесь, засыпанная в форму, представляет собой хаотическую структуру, что вызывает определенные трудности при математическом описании, поэтому необходимо эту модель заменить упорядоченной, которая будет отражать все основные особенности исходной структуры.

Необходимо описать процессы, происходящие при постепенном нагревании сырьевой смеси.

Существующая влага в сырьевой смеси начинает испаряться и выходить в камеру печи вспенивания. При значениях температуры в камере печи близким к значениям, при которых начинается плавление зерен стекла, первыми начинают оплаиваться приповерхностные слои, находящиеся в непосредственном контакте с металлическими гранями формы для вспенивания, и несколько позже (по времени) слой, который прогревается за счет теплопроводности. Происходит процесс приповерхностного оплаивания сырьевой смеси – центральные области материала все еще не прогреты (из-за низкой теплопроводности окружающего материала). Вследствие этого источники газовой выделения в этих порах не работают, тогда как окружающий этот центр

материал смеси уже вспенивается и в нем продолжается увеличение радиуса пор. Таким образом, материал смеси по порообразованию формируется неравномерно, что сказывается на качестве теплофизических свойств конечного продукта.

В случаях, когда время выдержки сырьевой смеси при вспенивании недостаточное для того, чтобы зерна стекла оплавилась 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 прогрета 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.

Обычно для решения дифференциальных уравнений используются методы математической физики. В некоторых конкретных случаях эти уравнения могут быть решены численными методами с применением ЭВМ. Однако при этом имеются трудности вычислительного характера.

Теоретической основой исследования процессов тепломассопереноса в результате воздействия высокой температуры на материал является система дифференциальных уравнений, полученная А.В. Лыковым, и разработанные им физические представления о механизме удаления влаги [49].

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= a \nabla^2 t + \frac{r^* \rho \varepsilon}{c_p} \frac{\partial U}{\partial \tau} \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} &= k_m \nabla^2 U + k_m \delta_T \nabla^2 t \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} &= k_p \nabla^2 p + k_p \delta_p \nabla^2 t \end{aligned} \right\}, \quad (3.1)$$

где: t , U , p – соответственно потенциалы переноса тепла, массы и давления; ε – критерий фазового превращения ($\varepsilon=0 \div 1$); δ_T – коэффициент термодиффузии, $1/K$; r^* – теплота парообразования для жидкости, Дж/кг.

Сложность динамики процесса переноса влаги в теле делает очень сложным аналитическое решение задачи взаимосвязанного тепломассопереноса. Для решения такой задачи Лыковым А.В. была предложена гипотеза об аддитивности отдельных потоков массы и введены эффективные коэффициенты переноса – массопроводности и потенциалопроводности. В капиллярно-пористых телах перенос теплоты характеризуется теплофизическими характеристиками – коэффициентами теплопроводности и температуропроводности. Сложность происходящих процессов, многообразие определяющих факторов привели к необходимости использования упрощенных моделей.

Решению уравнений теплопроводности посвящено большое количество работ российских и зарубежных исследователей. Анализ наиболее известных приведен в работах [6, 86].

При решении линейных краевых задач часто применяются методы интегрального преобразования или разделения пределов, а также функции Грина. При решении нелинейных задач используются вариационные и численные методы.

Каждый из указанных методов имеет свои плюсы и минусы. Например, способ разделения переменных уместно использовать для описания действия нестационарного теплопереноса, когда начальная температура распределена неровно в пространстве, а граничные условия линейны. Решения в таком случае будут получаться в виде бесконечного ряда по собственным функциям. В зависимости от значения числа Фурье для соблюдения необходимой точности расчетов необходимо будет учитывать количество членов ряда, для больших значений лишь несколько первых, для малых значений это количество резко возрастает, а при значении числа Фурье менее чем 0,1, начинает еще и ухудшаться сходимость ряда.

Применение точных методов для решения нелинейных задач нерационально ввиду большой трудоемкости, поэтому все большую популярность приобретают численные методы. Решение дифференциальных уравнений в частных производных производится с помощью компьютерных программ.

Вышесказанное дает основание полагать, что при создании математической модели, описывающей процесс термической обработки пеностекла, наиболее оптимальным является зональный метод расчета. Данный метод описан Рудобаштой С.П. в работе [88], поэтому описывать его не будем. Однако для возможности всестороннего подхода при разработке модели необходимо зональный метод расчета использовать в совокупности с методом «микропроцессов», предложенным Федосовым С.В. Данный метод основан на

представлении времени всего процесса в цепочку малых промежутков времени «микропроцессов» [114]:

$$\tau_{\text{пр}} \lim_{\tau \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i. \quad (3.2)$$

Теплофизические параметры фаз в течение каждого периода принимаются постоянными, что позволяет свести нелинейную задачу к нескольким линейным задачам тепломассопереноса.

Однако потребуются проведение ряда математических расчетов, так как при малых значениях числа Фурье потребуется учитывать в расчетах не несколько первых членов ряда, а значительно больше. Применение численного решения с методом интегрального преобразования Лапласа позволит значительно увеличить точность расчетов [144].

Прогрев пенообразующей смеси в форме до температуры спекания продолжается относительно длительное время. Но данные о времени нагрева смеси до температур спекания являются неоднозначными. В [31] проведен анализ пяти экспериментов, проведенных различными исследователями, и показано, что это время лежит в довольно широких пределах: от 15 до 70 минут, хотя условия экспериментов практически одинаковые.

Приведенные примеры достаточно наглядно иллюстрируют отсутствие единого мнения об оптимальном режиме нагрева пенообразующей смеси. Исходя из этого, считаем целесообразным более детально изучить тепловые процессы на первой стадии формирования пеностекла – нагреве смеси, для чего в [45] была предложена математическая модель процесса нагрева с учетом реальной геометрии – металлической формы, в которой исходная смесь подается в печь.

Таким образом, существующие модели, описывающие процессы, протекающие в смеси при термической обработке, не учитывают такой параметр, как пористость конечного материала и зависимость размера образованных пузырьков от времени нагрева. Поскольку механизм образования пены в производстве пеностекла до известной степени аналогичен механизму образования пены в высоковязких жидкостях, немаловажным фактором становится изучение динамики образования единичной поры в расплавленной сырьевой смеси. Изучение этих процессов поможет на стадии планирования и проектирования необходимых свойств материала прогнозировать рациональные режимы термической обработки материала, а также сократить энергозатраты на обеспечение издержек при их производстве.

3.1.2. Математическая постановка задачи

В рамках феноменологической постановки задачи необходимо рассматривать трехмерные температурные поля как внутри самой сырьевой смеси, так и внутри металлической формы для вспенивания (рисунок 3.1).

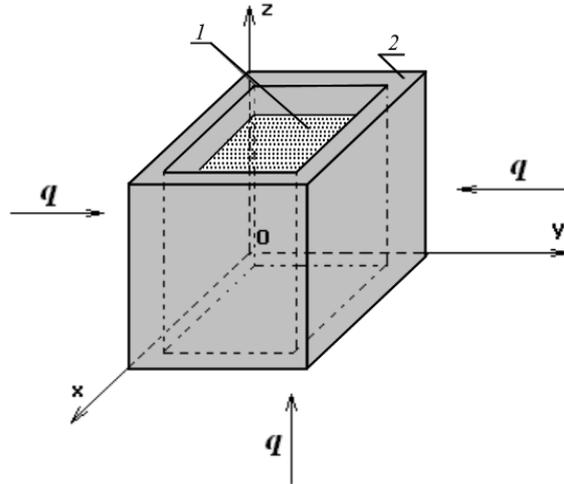


Рисунок 3.1 – Модель «сырьевая смесь для получения пеностекла – металлическая форма»:

1 – сырьевая смесь для получения пеностекла; 2 – металлическая форма

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

На первых этапах моделирования целесообразно задать граничные условия и решить плоскую задачу для одной из координат. На рисунке 3.2 представлена геометрическая модель, используемая для постановки задачи.

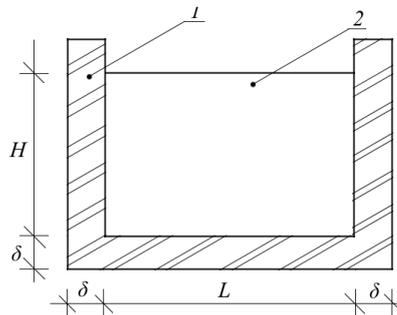


Рисунок 3.2 – Геометрическая модель используемая для постановки задачи: сырьевая смесь (2) – металлическая форма (1)

В этих условиях краевая задача теплопереноса в сырьевой смеси, находящейся в металлической форме, запишется следующим образом:

$$\rho c \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}; \tau > 0; 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad (3.3)$$

где ρ , c , λ – соответственно: плотность, теплоемкость и теплопроводность сырьевой смеси.

Начальное условие:

$$t(x, \tau)|_{\tau=0} = t_0(x). \quad (3.4)$$

Граничные условия, соответственно, первого и второго рода:

$$t(x, \tau)|_{x=0} = t_H; \quad (3.5)$$

$$\left. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\frac{L}{2}} = 0. \quad (3.6)$$

Начальное условие (3.4) показывает, что в момент времени, принимаемый за начало отсчета, в сырьевом материале имеется произвольное распределение температур по координате.

Граничное условие (3.5) показывает, что в зоне контакта стенок металлической формы для вспенивания принимается равенство значений температуры формы и материала, от которой отсчитывается координата h . Условие (3.6) показывает, что задача может рассматриваться как симметричная.

3.1.3. Общая методика вычисления

В общем случае решение краевой задачи (3.3) – (3.6) современными аналитическими методами математической физики получить не удастся. Для этого требуется иной подход.

Применение метода «микропроцессов» [114] позволяет привести вышерассмотренную краевую задачу к линейным однородным уравнениям с постоянными коэффициентами.

Для решения краевой задачи теплопроводности применяем метод интегрального преобразования Лапласа.

Введем безразмерные переменные для задачи теплопроводности:

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_H - t_0}; Fo = \frac{a\tau}{(L/2)^2}; \bar{x} = \frac{x}{(L/2)}. \quad (3.7)$$

И тогда задача (3.3) – (3.6) примет вид:

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}; Fo > 0; 0 \leq \bar{x} \leq 1; \quad (3.8)$$

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_H - t_0} = T_0(\bar{x}); \quad (3.9)$$

$$T(\bar{x}, Fo) \Big|_{\bar{x}=0} = \frac{t_H - t_0}{t_H - t_0} = 1; \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1} = 0. \quad (3.11)$$

В области изображений по Лапласу решение уравнения (3.8) с учетом начального условия (3.9) имеет вид:

$$T(\bar{x}, s) = Ach(\sqrt{s\bar{x}}) + Bsh(\sqrt{s\bar{x}}) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{x}} T_0(\xi) sh\sqrt{s(\bar{x} - \xi)} d\xi. \quad (3.12)$$

Граничные условия (3.10) и (3.11) в области изображений по Лапласу запишутся так:

$$T(\bar{x}, s) \Big|_{\bar{x}=0} = \frac{1}{s}; \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial T(\bar{x}, s)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1} = 0. \quad (3.14)$$

Подставим решение (3.12) в граничное условие (3.13), получим выражение:

$$\frac{1}{s} = A \cdot ch(\sqrt{s\bar{x}}) \Big|_{\bar{x}=0} + B \cdot sh(\sqrt{s\bar{x}}) \Big|_{\bar{x}=0}. \quad (3.15)$$

Отсюда для константы A следует, что:

$$A = \frac{1}{s}. \quad (3.17)$$

Продифференцируем решение (3.12) по \bar{x} с учетом (3.17):

$$\frac{\partial T(\bar{x}, s)}{\partial \bar{x}} = \frac{1}{s} \sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s\bar{x}}) + B\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s\bar{x}}) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{x}} T_0(\xi) \cdot \sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}(\bar{x} - \xi) d\xi. \quad (3.18)$$

Отсюда, для константы B получаем:

$$B = \frac{1}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \left[-\frac{1}{\sqrt{s}} sh\sqrt{s} + \int_0^1 T_0(\xi) ch\sqrt{s}(1 - \xi) d\xi \right]. \quad (3.19)$$

Подставляя (3.17) и (3.18) в выражение (3.12), получаем окончательное решение задачи теплопроводности в области изображений:

$$T(\bar{x}, s) = \frac{1}{s} \cdot ch(\sqrt{s\bar{x}}) + \frac{sh(\sqrt{s\bar{x}})}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \cdot \left[-\frac{1}{\sqrt{s}} \cdot sh\sqrt{s} + \int_0^1 T_0(\xi) ch\sqrt{s}(1 - \xi) d\xi \right] - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{x}} T_0(\xi) sh\sqrt{s}(\bar{x} - \xi) d\xi. \quad (3.20)$$

Преобразуем выражение (3.20) к более удобному виду:

$$T(\bar{x}, s) = \frac{ch(\sqrt{s\bar{x}}) \cdot ch\sqrt{s} - sh(\sqrt{s\bar{x}}) \cdot sh\sqrt{s}}{s \cdot ch\sqrt{s}} + \frac{sh(\sqrt{s\bar{x}})}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \cdot \int_0^1 T_0(\xi) ch\sqrt{s}(1 - \xi) d\xi - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{x}} T_0(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(\bar{x} - \xi) d\xi. \quad (3.21)$$

В соответствии со второй теоремой разложения переход из области изображений в оригиналы осуществляется для каждого слагаемого в соответствии с формулой:

$$T(\bar{x}, Fo) = L^{-1}[T(\bar{x}, s)] = \frac{\varphi(s)}{\psi'(s)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi(s_n)}{\psi'(s_n)} \exp(s_n Fo). \quad (3.22)$$

Характеристическое уравнение для поиска множества корней имеет вид:

$$ch\sqrt{s_n} = 0 \rightarrow \cos(i\sqrt{s_n}) \rightarrow \cos \mu_n = 0 \rightarrow \mu_n = \frac{\pi}{2}(2n-1). \quad (3.23)$$

В силу этого последнее слагаемое в выражение (3.20) обращается в ноль. Рассматриваем функцию в числителе первого слагаемого (3.21):

$$\varphi_1(s_n) = ch(\sqrt{s_n \bar{x}}) \cdot ch\sqrt{s_n} - sh(\sqrt{s_n \bar{x}}) \cdot sh\sqrt{s_n}. \quad (3.24)$$

В силу характеристического уравнения (3.22) имеем:

$$\varphi_1(s_n) = -sh(\sqrt{s_n \bar{x}}) \cdot sh\sqrt{s_n}. \quad (3.25)$$

Продифференцируем знаменатель по s :

$$\psi_1'(s_n) = s_n' \cdot ch\sqrt{s_n} + s_n \cdot (ch\sqrt{s_n})' = ch\sqrt{s_n} + s_n \cdot \frac{1}{2\sqrt{s_n}} \cdot sh\sqrt{s_n} = \frac{\sqrt{s_n}}{2} sh\sqrt{s_n}. \quad (3.26)$$

Таким образом, для множества корней в соответствии со вторым слагаемым правой части (3.21) запишем:

$$\begin{aligned} & L^{-1} \left[- \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot sh(\sqrt{s_n \bar{x}}) \cdot sh\sqrt{s_n}}{\sqrt{s_n} \cdot sh\sqrt{s_n}} \exp(s_n \cdot Fo) \right] = \\ & = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(i\sqrt{s_n \bar{x}})}{i\sqrt{s_n}} \exp[(is_n)^2 Fo] = -\frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \cdot \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{x}\right] \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right]. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Разложим в ряд по степеням s числитель и знаменатель первого слагаемого (3.20):

$$\begin{aligned} \varphi_1(s) &= \left[1 + \frac{(\sqrt{s \bar{x}})^2}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{(\sqrt{s})^2}{2!} + \dots \right] - \left[\sqrt{s \bar{x}} + \frac{(\sqrt{s \bar{x}})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] = \\ &= \left[1 + \frac{s \bar{x}}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] - s \left[\bar{x} + \frac{s \bar{x}^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right]. \end{aligned} \quad (3.28)$$

При $s = 0$ получаем:

$$\varphi_1(s)|_{s=0} = 1. \quad (3.29)$$

Аналогичным образом, расположение для знаменателя даёт:

$$\psi_1(s) = s \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right]. \quad (3.30)$$

Дифференцирование по s при $s = 0$ даёт:

$$\psi_1'(s)|_{s=0} = s' \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] + s \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right]' \Big|_{s=0} = 1. \quad (3.31)$$

Итак, для нулевого корня получаем:

$$\frac{\varphi_1(0)}{\psi_1'(0)} = 1. \quad (3.32)$$

Рассматриваем второе слагаемое (3.20), преобразовав его следующим образом:

$$[\sim 2 \sim] = \int_0^1 T_0(\xi) \left[\frac{sh(\sqrt{s_n} x) \cdot ch\sqrt{s_n}(1-\xi)}{\sqrt{s_n} \cdot ch\sqrt{s_n}} \right] d\xi. \quad (3.33)$$

Выполняем дальнейшие преобразования с учетом характеристического уравнения:

$$\varphi_2(s_n) = sh(\sqrt{s_n} x) \cdot [ch\sqrt{s_n} \cdot ch(\sqrt{s_n} \xi) - sh\sqrt{s_n} \cdot sh(\sqrt{s_n} \xi)] = -sh\sqrt{s_n} \cdot sh(\sqrt{s_n} x) \cdot sh(\sqrt{s_n} \xi). \quad (3.34)$$

Определяем производную знаменателя:

$$\psi_2'(s_n) = (\sqrt{s_n})' \cdot ch\sqrt{s_n} + \sqrt{s_n} \cdot (ch\sqrt{s_n})' = \frac{\sqrt{s_n}}{2\sqrt{s_n}} sh\sqrt{s_n}. \quad (3.35)$$

Итак, для квадратной скобки (3.33) запишем:

$$\frac{\varphi_2(s_n)}{\psi_2'(s_n)} = -2sh(\sqrt{s_n} x) \cdot sh(\sqrt{s_n} \xi). \quad (3.36)$$

Возвращение второго слагаемого в область оригиналов осуществляем по выражению:

$$\begin{aligned}
 L^{-1}[\sim 2 \sim] &= -2 \sum_{n=1}^{\infty} sh(\sqrt{s_n x}) \int_0^1 T_0(\xi) sh(\sqrt{s_n \xi}) d\xi \cdot \exp(s_n Fo) = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{i} \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{x}\right] \cdot \\
 &\quad \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \frac{1}{i} \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\xi\right] d\xi \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right] = \\
 &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{x}\right] \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\xi\right] d\xi \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right]. \quad (3.37)
 \end{aligned}$$

Проверяем наличие нулевого корня, предварительно разлагая числитель (3.33) в ряд по степеням s :

$$\begin{aligned}
 \varphi_2(s) &= \left[\sqrt{s\bar{x}} + \frac{(\sqrt{s\bar{x}})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left\{ \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s\xi^2}{2!} + \dots \right] - \right. \\
 &\quad \left. - \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[\sqrt{s\xi} + \frac{(\sqrt{s\xi})^3}{3!} + \dots \right] \right\}. \quad (3.38)
 \end{aligned}$$

Отсюда следует, что $\varphi_2(s)|_{s=0} = 0$, а это означает отсутствие нулевого корня.

Записываем окончательное решение краевой задачи теплопроводности с учетом выражений (3.32), (3.27) и (3.37):

$$\begin{aligned}
 T(\bar{x}, Fo) &= 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{x}\right] \cdot \\
 &\quad \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{x}\right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \\
 &\quad \cdot \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\xi\right] d\xi \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right]. \quad (3.39)
 \end{aligned}$$

Результаты расчетов по формуле (3.39) в общем виде приведены на рисунке 3.3. Для большей наглядности расчеты выполнены для случая равномерного начального распределения температур в сырьевой смеси, а именно принимаем, что:

$$T_0(\bar{x}) = T(\bar{x}, Fo) \Big|_{Fo=0} = 0. \quad (3.40)$$

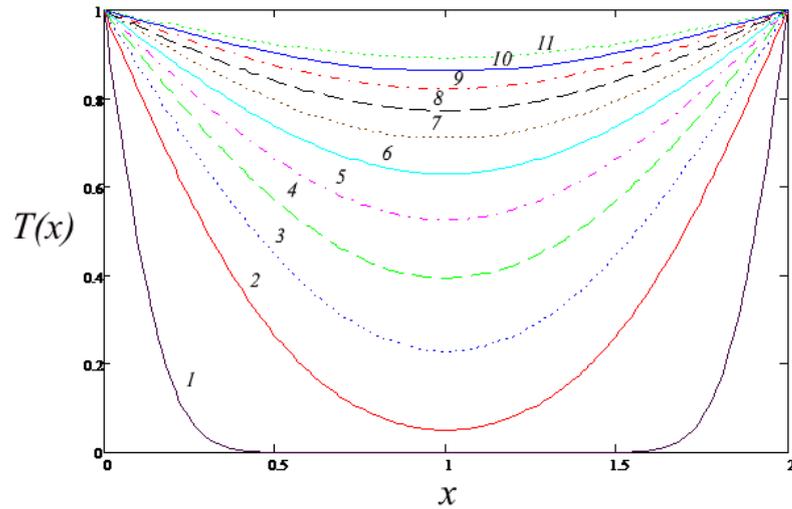


Рисунок 3.3 – Иллюстрация расчетов по выражению (3.39).

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

Кривые рисунка 3.3 иллюстрируют динамику полей безразмерных температур в сырьевой смеси.

3.2. Численные расчеты

3.2.1. Расчет температурных полей при циклических режимах

Преобразуем уравнение (3.33) в размерный вид с учетом уравнения (3.7):

$$t(x, \tau) = t_n - (t_n - t_0) \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + \right. \\ \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \right). \quad (3.41)$$

Моделируем процесс 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 [15, 85].

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 (3.41), при этом принимаем, что a – температуропроводность – согласно работе [23] изменяется по следующему закону:

$$a = \left(-3,1 \cdot 10^{-7} \cdot t_n^2 + 9,92 \cdot 10^{-4} \cdot t_n + 2,305 \right) \cdot 10^{-7}, \quad (3.42)$$

где t_n – температура на поверхности материала, $^{\circ}\text{C}$.

Исходные данные и результаты проведенных расчетов представлены в таблице 3.1. Шаг по времени при расчетах нами принимался равным 20 минутам.

Таблица 3.1 – Расчетные значения числа Фурье

№ п/п	Температура, $t, ^{\circ}\text{C}$	Температуропроводность, $a \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	Размер, $L/2, \text{ м}$	Число Фурье, Fo
1	20	2,32	0,05	0,112
2	50	2,35	0,05	0,113
3	150	2,44	0,05	0,117
4	250	2,53	0,05	0,122
5	350	2,61	0,05	0,125
6	450	2,68	0,05	0,129
7	550	2,75	0,05	0,132
8	650	2,81	0,05	0,135
9	750	2,87	0,05	0,138

Рассчитаем температурные поля при нагреве сырьевой смеси до температуры 750°C по уравнению (3.41). Принимаем, что в начальный момент времени значение $T(\xi) = 20^{\circ}\text{C}$, а согласно таблице 3.1 $Fo = 0,112$. Полученное распределение температурных полей на каждом этапе расчета аппроксимируем полиномами 2 степени и закладываем в качестве начального на следующем шаге расчетов.

На рисунке 3.4 видно, что через 180 минут с момента начала нагрева сырьевой смеси со скоростью 5°C в минуту температура в центре материала достигнет 452°C .

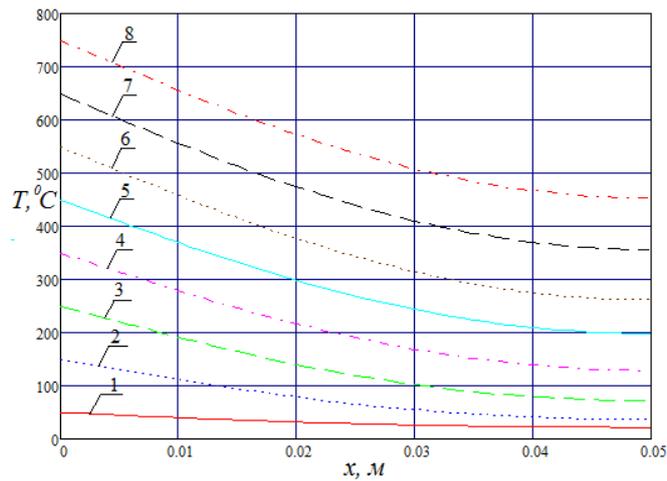


Рисунок 3.4 – Номограмма температурных полей от 20 °С до 750 °С

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. На рисунке 3.5 показаны номограммы распределения температурных полей для различных значений Fo .

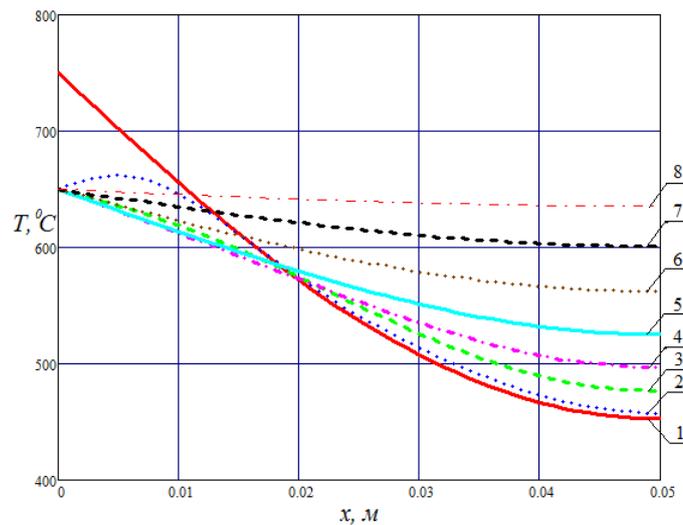


Рисунок 3.5 – Номограмма температурных полей после остывания до температуры на поверхности материала до 650 °С: 1 – Последний этап расчета нагрева материала (Рисунок 3.4. кривая 8); 2 – $Fo = 0,007$ (1 мин.); 3 – $Fo = 0,034$ (5 мин.); 4 – $Fo = 0,068$ (10 мин.); 5 – $Fo = 0,135$ (20 мин.); 6 – $Fo = 0,271$ (40 мин.); 7 – $Fo = 0,507$ (75 мин.); 8 – $Fo = 1$ (150 мин.)

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, рисунок 3.5). Эта особенность объясняется тем, что процесс переноса тепла в твердых телах является инерционным. 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 (рисунок 3.6).

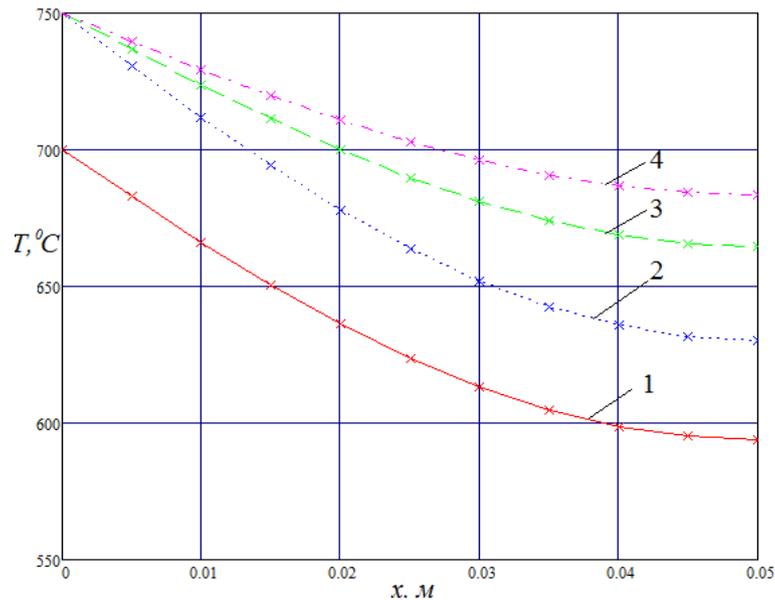


Рисунок 3.6 – Номограмма температурных полей при поэтапном нагреве до температуры на поверхности материала 700 °С, а затем 750 °С: 1 – $Fo = 0,14$ (20 мин.); 2 – $Fo = 0,14$ (20 мин.); 3 – $Fo = 0,14$ (20 мин.); 4 – $Fo = 0,1$ (15 мин.)

Общее расчетное время момента начала процесса вспенивания составляет 255 минут.

3.2.2. Расчет температурных полей различными способами

Рассчитаем температурные поля при нагреве сырьевой смеси до температуры 700 °С по уравнению (3.41). Принимаем, что в начальный момент времени значение $T_0(\xi) = 20$ °С, а $Fo = 0,1$. Полученное распределение температурных полей аппроксимируем полиномом 5 степени:

$$T_1(\xi) = 10,7 \cdot 10^8 \cdot x^5 - 20,5 \cdot 10^7 \cdot x^4 + 13,1 \cdot 10^6 \cdot x^3 - 54,3 \cdot 10^3 \cdot x^2 - 24054,06 \cdot x + 699,96. \quad (3.43)$$

Уравнение (3.43) закладываем на следующем этапе расчетов в качестве начального в подынтегральное выражение уравнения (3.41), при этом значение $Fo=0,1$ остается неизменным. Данную операцию повторяем 10 раз. Полученные результаты в ходе расчетов представлены на рисунке 3.7.

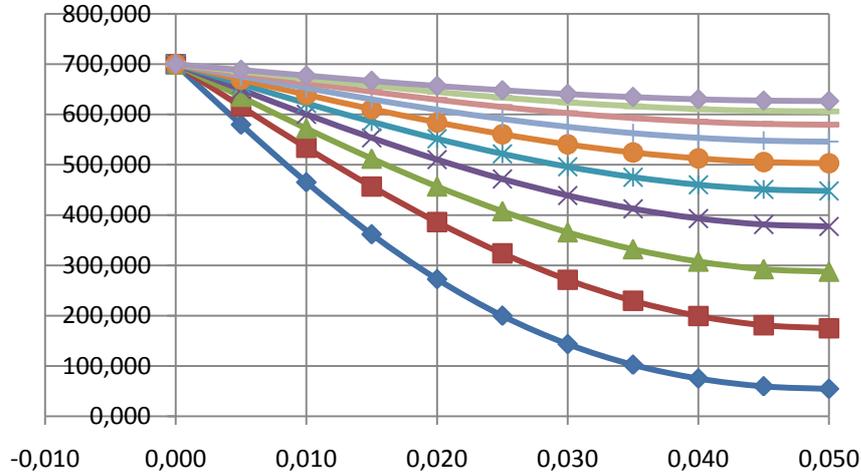


Рисунок 3.7 – Зависимости распределения температурных полей по уравнению (23)

Для подтверждения достоверности проведенных расчетов произведем расчет распределения температурных полей по уравнению (3.41), при условиях, что $T_0(\xi)=20^0\text{C}$ принимаем неизменной, а Fo изменяется от 0,1 до 1. Результаты расчетов представлены на рисунке 3.8.

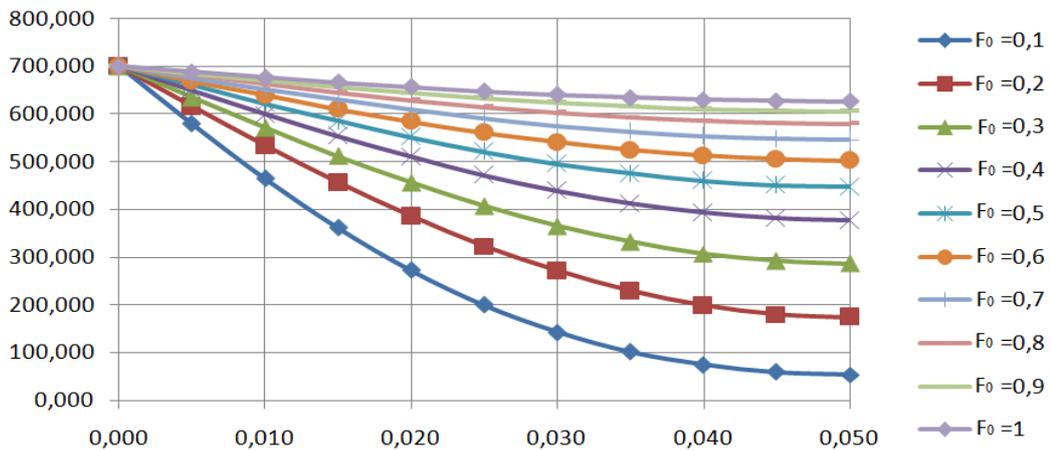


Рисунок 3.8 – Графики распределения температурных полей при значениях числа Фурье от 0,1 до 1

Для оценки значимости второй части уравнения (3.41) проведем серию расчетов по уравнению (3.44):

$$t(x, \tau) = t_n - (t_n - t_0) \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \right). \quad (3.44)$$

Полученные результаты представлены на рисунке 3.9.

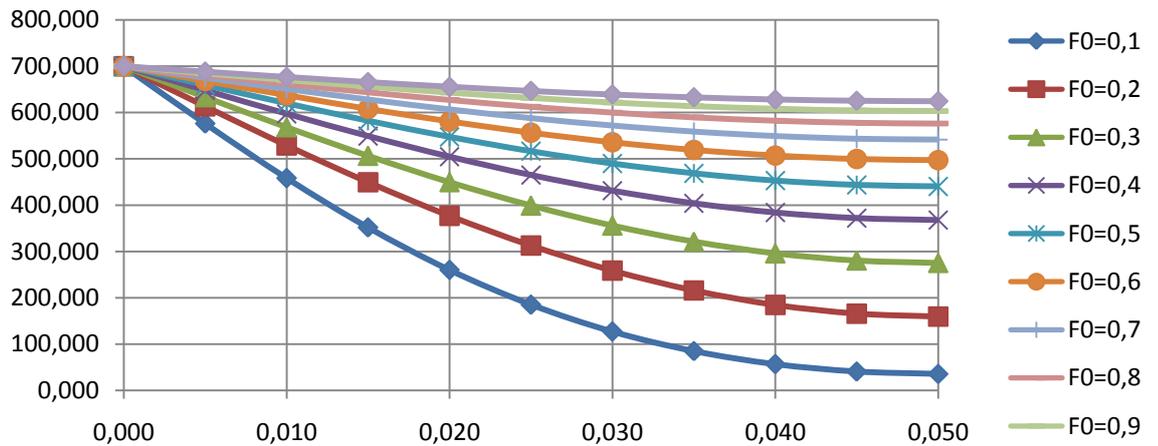


Рисунок 3.9 – Распределения температурных полей без учета начального и последующего распределения температуры в сырьевой смеси

Так как значения температур очень близки друг к другу во всех трех способах расчета, для возможности сравнения результатов представим их в табличном виде (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Значения температуры в различных точках материала

Координата L\Варианты расчета	1 этап расчета			2 этап расчета		
	№ способа расчета			№ способа расчета		
	1	2	3	1	2	3
0,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00
0,01	465,25	465,25	458,34	533,91	533,91	529,03
0,02	272,58	272,58	260,01	386,09	386,08	376,85
0,03	143,39	143,39	127,02	271,34	271,33	258,72
0,04	75,03	75,03	56,65	199,31	199,30	184,57
0,05	54,47	54,47	35,49	174,84	174,83	159,38
Координата L\Варианты расчета	3 этап расчета			4 этап расчета		
	№ способа расчета			№ способа расчета		
	1	2	3	1	2	3
0,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00
0,01	572,08	572,08	568,32	600,25	600,25	597,32
0,02	456,90	456,90	449,75	510,29	510,29	504,71
0,03	365,77	365,77	355,94	438,93	438,93	431,25
0,04	307,44	307,44	295,89	393,13	393,13	384,10
0,05	287,38	287,37	275,24	377,36	377,35	367,86

Координата L\Варианты расчета	5 этап расчета			6 этап расчета		
	№ способа расчета			№ способа расчета		
	1	2	3	1	2	3
0,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00
0,01	622,09	622,08	619,79	639,12	639,12	637,33
0,02	551,80	551,80	547,44	584,21	584,20	580,80
0,03	496,03	496,02	490,02	540,63	540,62	535,93
0,04	460,22	460,21	453,16	512,65	512,64	507,13
0,05	447,88	447,87	440,46	503,00	503,00	497,20
Координата L\Варианты расчета	7 этап расчета			8 этап расчета		
	№ способа расчета			№ способа расчета		
	1	2	3	1	2	3
0,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00
0,01	652,44	652,43	651,04	662,84	662,84	661,74
0,02	609,53	609,52	606,86	629,31	629,31	627,23
0,03	575,48	575,47	571,81	602,70	602,70	599,84
0,04	553,61	553,61	549,30	585,62	585,62	582,25
0,05	546,08	546,07	541,55	579,74	579,73	576,19
Координата L\Варианты расчета	9 этап расчета			10 этап расчета		
	№ способа расчета			№ способа расчета		
	1	2	3	1	2	3
0,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00
0,01	670,96	670,96	670,11	677,31	677,31	676,64
0,02	644,77	644,77	643,14	656,84	656,84	655,57
0,03	623,98	623,98	621,74	640,60	640,60	638,85
0,04	610,63	610,63	608,00	630,17	630,17	628,12
0,05	606,03	606,03	603,26	626,58	626,58	624,42

В границах гипотезы, которая 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. Моделирование распределения температурных полей на границах контакта металлической формы для вспенивания и сырьевой смеси для производства пеностекла позволяет спрогнозировать дальнейший ход изменения температуры в сырьевой смеси, что является ключевым фактором при формировании равномерно поризованного конечного продукта.

Дальнейшее развитие математической модели обусловлено введением параметров, позволяющих учитывать изменения физических параметров сырьевой смеси, таких как плотность и теплоемкость, в зависимости от температуры. А также проведение расчетов при циклически изменяющейся температуре нагрева, что позволит производить расчет времени, необходимого для выравнивания температуры в центре, относительного поверхности материала, и оптимизировать технологический процесс вспенивания сырьевой смеси, применяемой для изготовления пеностекла.

3.3. Выводы по главе 3

В главе рассмотрены концептуальные подходы и методы моделирования профиля температуры в сырьевой смеси для получения пеностекла. Разработана математическая модель и метод расчета, позволяющие интерпретировать распределения температурных полей в структуре материала при различных значениях числа Фурье и начальных распределениях температуры на поверхности материала. По результатам исследования, проведенного в главе, можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель на основе дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности в частных производных параболического типа с начальными и граничными условиями I и III рода, позволяющая строить температурные профили в структуре материала в зависимости от показателей температуры на его поверхности.

2. На основе разработанной математической модели произведен расчет температурных профилей в центре материала с учетом эффектов теплопроводности. Установлено, что скорость изменения показателей температуры в центре засыпки сырьевой смеси при $\lambda = 0,047$ Вт/(м·К), $\tau = 90$ мин и $t = 750$ °С равен 30 °С/мин, что в два раза меньше показателей на поверхности 50 °С/мин. Данный факт подтверждает предположение об инерционности процесса термической обработки сырьевой смеси для получения пеностекла.

3. Показано положительное влияние циклического нагрева и последующего охлаждения сырьевой смеси при получении пеностекла. Данный механизм отличается от общепринятого в порошковой технологии пеностекла тем, что подвод тепла реализуется не постоянно, а периодически. Принцип периодического подвода тепла позволяет получать материал (пеностекло) с равномерно распределенными порами в его структуре.

4. Третий вариант расчета температурных полей, который не учитывает в функции (3.44) подынтегральное выражение, получаемое аппроксимацией

значений температур на предыдущем шаге расчета, может применяться при условии постоянной температуры на поверхности сырьевой смеси и в области малых значений числа Фурье ($F_0 \geq 0,3$), в противном случае будет возникать погрешность при расчетах.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕНОСТЕКЛА

Идентификация математического описания объекта является основным этапом в построении адекватной математической модели процесса и поэтому представляет собой одну из центральных задач математического моделирования химико-технологических процессов. Для определения сходимости математической интерпретации физического процесса при термической обработке пеностекла необходимо произвести проверку адекватности математической модели распределения температурных полей в структуре пеностекла в процессе остывания блока пеностекла реальному процессу.

4.1. Оценка динамики показателей температуры блока пеностекла при остывании

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

На блоке из пеностекла были зафиксированы термопары (на разной глубине):

Точка 1 – расположение термопары на верху блока на глубине 10 см от поверхности;

Точка 2 – расположение термопары на верху блока на глубине 2 см от поверхности;

Точка 3 – расположение термопары на торце блока по длинной стороне на глубине 1 см от поверхности;

Точка 4 – расположение термопары на верху блока на глубине 10 см от поверхности;

Точка 5 – расположение термопары на торце блока по короткой стороне на глубине 1 см от поверхности;

Точка 6 – расположение термопары на верху блока на глубине 10 см от поверхности;

Точка 7 – расположение термопары на дне блока на глубине 2 см от поверхности;

Точка 8 – расположение термопары на торце блока по длинной стороне на глубине 2 см от поверхности.

На рисунке 4.1 схематично показано размещение термопар в блоке из пеностекла.

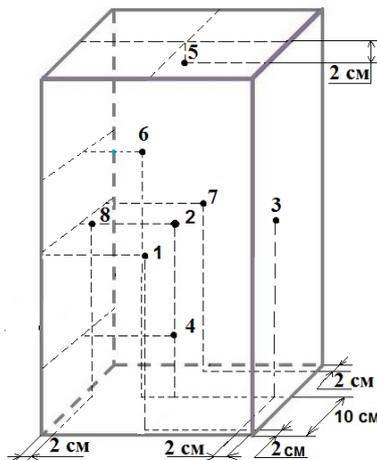


Рисунок 4.1 – Распределение термопар в точках контроля в пеностеклянном блоке

Значения показаний термопар в процессе охлаждения блоков фиксировались специализированным прибором – регистратором температуры DАTARAQ, длина термопар 2 метра при диаметре 1,6 мм. Вес загрузки смеси в форму 9,6 кг. Высота предварительно фрезерованного брутто-блока 20 см.

В процессе измерения показателей температуры образец охлаждался от температуры t_1 до t_2 за время τ , при этом показатели температуры материала в его центре всегда будут выше, чем температура на поверхности. Вместе с тем, принимаем допущение, что температура наружной поверхности стремится к температуре среды.

Результаты, полученные в ходе измерения, показаны в таблице 1 приложения 1.

По полученным результатам строим графики (рисунок 4.2) динамики температур в рассматриваемых точках контроля.

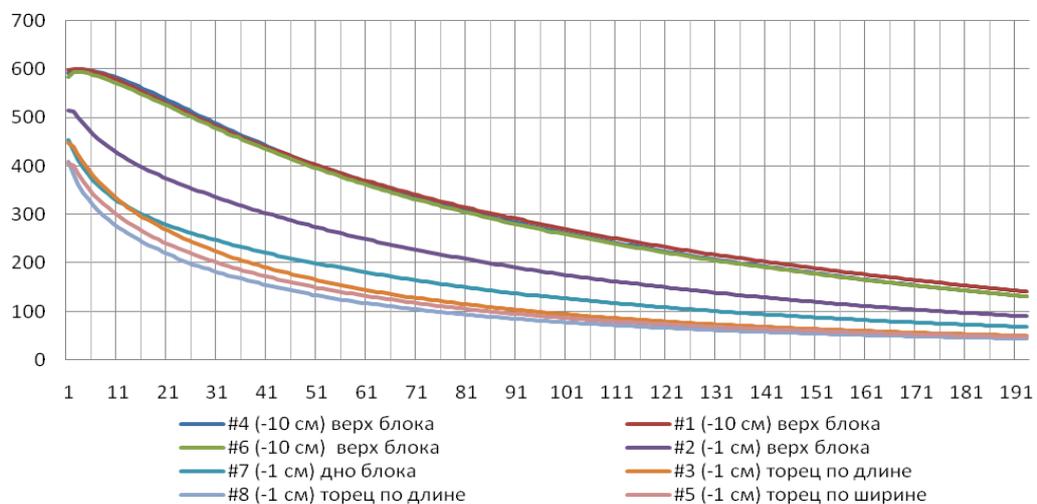


Рисунок 4.2 – График изменения показателей температуры блока из пеностекла в рассматриваемых точках контроля

В дальнейшем будем рассматривать изменение температуры в точках №1 и №2 соответственно в центре и на поверхности пеностекольного блока (рисунок 4.3).

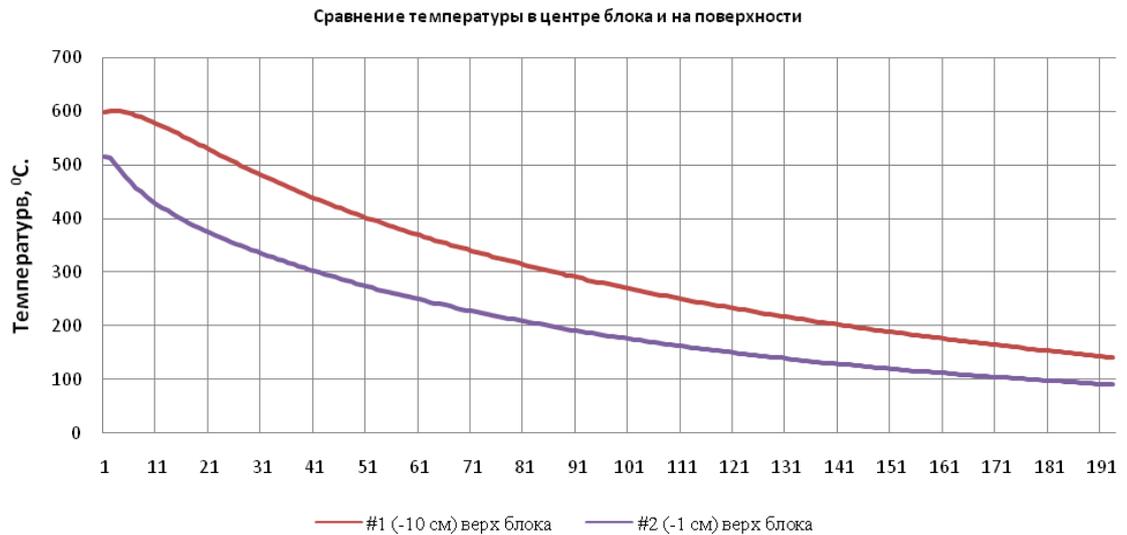


Рисунок 4.3 – График изменения показателей температуры в центре и на поверхности пеностекольного блока

Как показано на графиках, в процессе самопроизвольного остывания пеностекольного блока показатели температур на поверхности и в центре демонстрируют схожую динамику с наличием устойчивой разностной привязки. 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 пеностекольного блока. Исходные условия остывания и взаимодействие внешних границ пеностекольного 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. Процесс остывания пеностекольного блока, исходя из динамики показателей температуры, проходит равномерно без резких колебаний и пиков показателей температуры, что свидетельствует о равномерной структуре материала и оптимальной поризации.

4.2. Моделирование динамики показателей температуры блока пеностекла при остывании

Для проверки адекватности математической модели проведем расчет значений температур в центре и на поверхности пеностекольного блока. Для расчетов используем ранее полученную в главе 3 зависимость:

$$t(x, \tau) = t_n - (t_n - t_0) \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \right). \quad (4.1)$$

4.2.1. Результаты моделирования динамики показателей температуры на поверхности блока пеностекла при остывании

Принимаем, что начальная температура блока 600 °С. Температура поверхности 25 °С соответствует температуре воздуха в цехе в момент проведения эксперимента.

Расчеты проводим на момент времени 1 минута, расчетное значение числа Фурье в указанный момент времени равен 0,001. По результатам расчетов строим графики распределения температуры в блоке (Приложение 2).

Для наглядности строим общую функциональную зависимость распределения температурных полей с 1 по 90 минуты (рисунок 4.4).

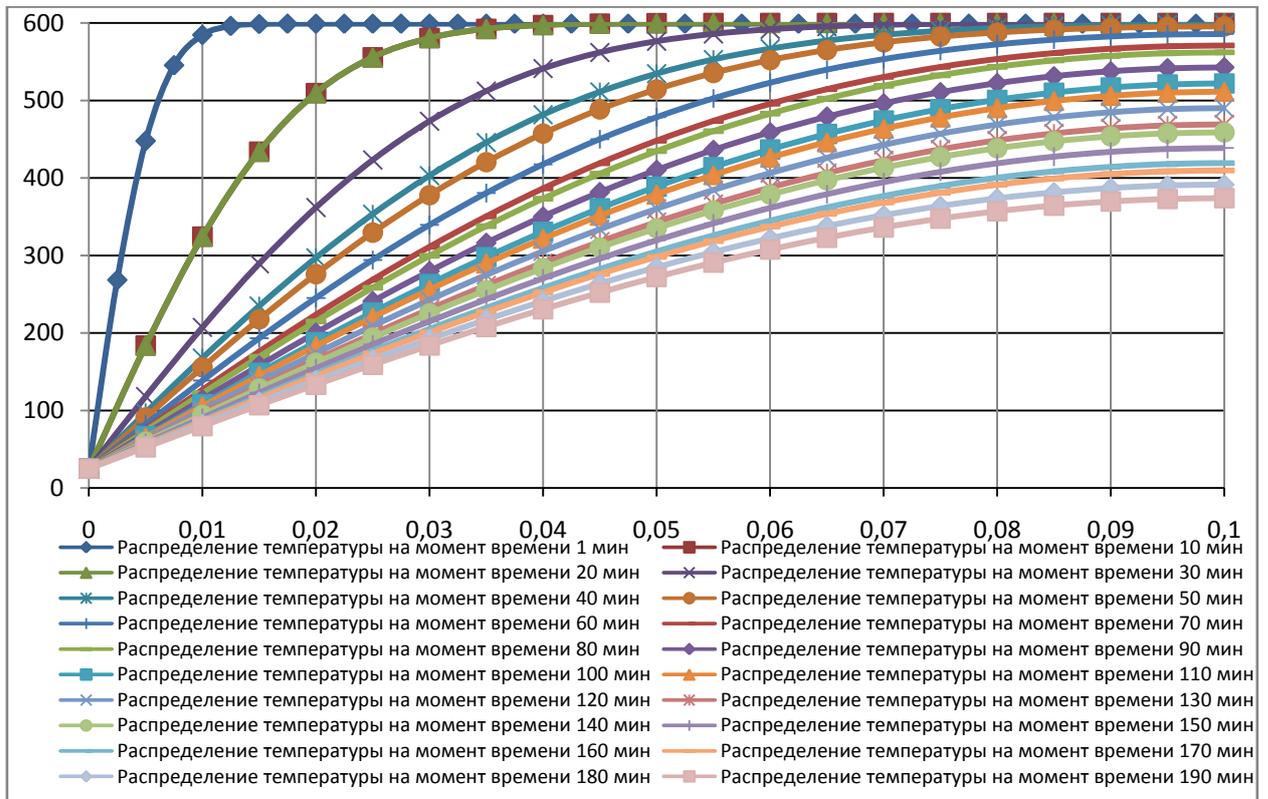
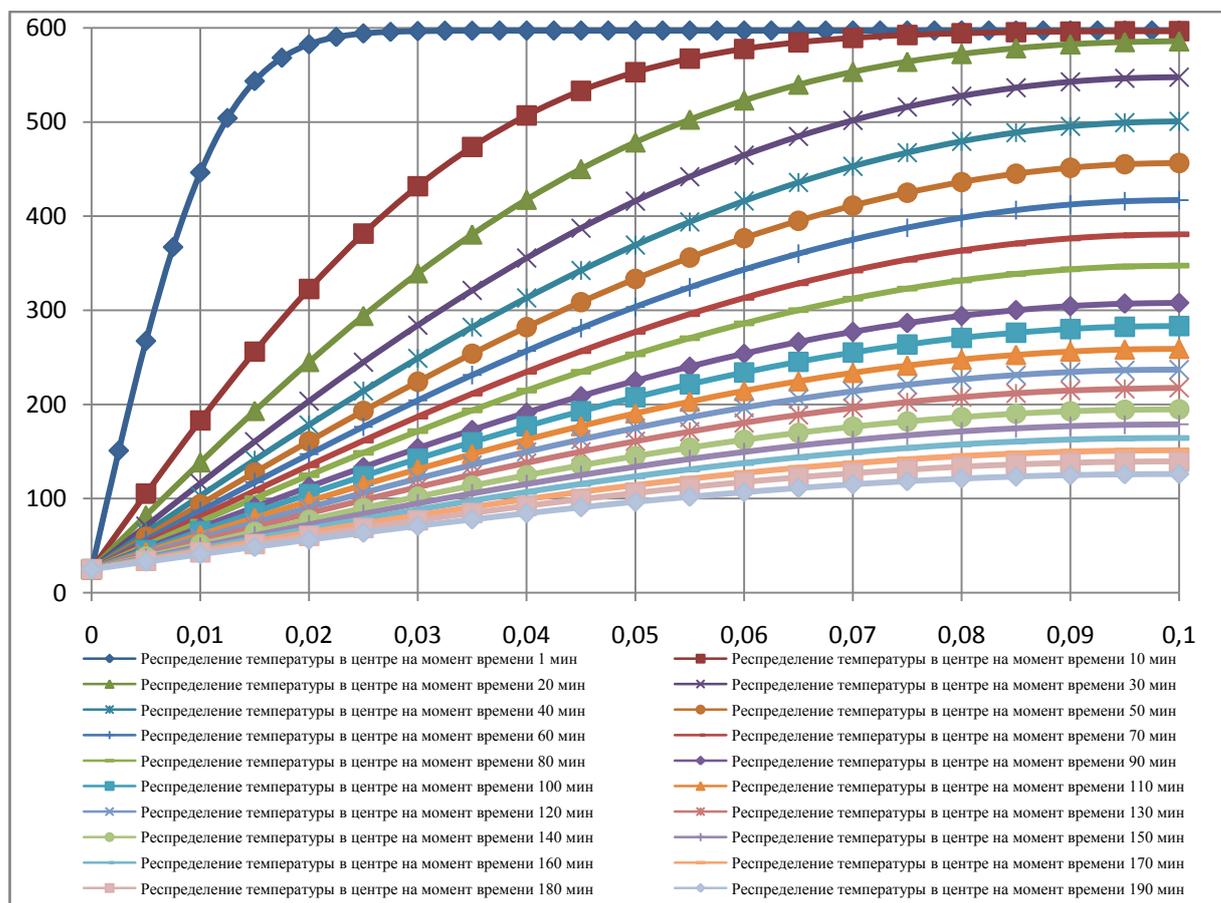


Рисунок 4.4 – Расчетные значения показателей температуры для точки контроля 2 см от поверхности пеностеклянного блока

4.2.2. Результаты моделирования динамики показателей температуры в центре блока пеностекла при остывании

Принимаем, что начальная температура блока $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура поверхности $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответствует температуре воздуха в цеху в момент проведения эксперимента.

Расчеты 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 три другие стороны, 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 4.5) (Приложение 3).



Для возможности сравнения полученных расчетных и экспериментальных данных заносим результаты расчетов в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Экспериментальные и расчетные значения показателей температуры в точке контроля 2 см от поверхности и в центре пеностекляного блока

Время, мин	Температура в центре, экспериментальные данные, °С	Температура на поверхности, экспериментальные данные, °С	Температура в центре, расчетные значения, °С	Температура на поверхности, расчетные значения, °С
1	597	515	597	584
10	580	433	595	509
20	533	378	585	417
30	484	338	547	361
40	441	305	500	296
50	404	276	456	275
60	371	251	412	245
70	342	229	380	223
80	316	210	347	214
90	292	192	307	200
100	271	177	283	188
110	251	163	258	183
120	234	151	237	173
130	218	140	217	165
140	203	130	194	161
150	189	121	178	154
160	177	112	164	147
170	165	105	151	144
180	154	98	139	138
190	144	92	126	133

По данным таблицы 4.1 строим график изменения расчетных и экспериментальных значений показателей температуры при остывании блока для поверхности (рисунок 4.6) и центра (рисунок 4.7).

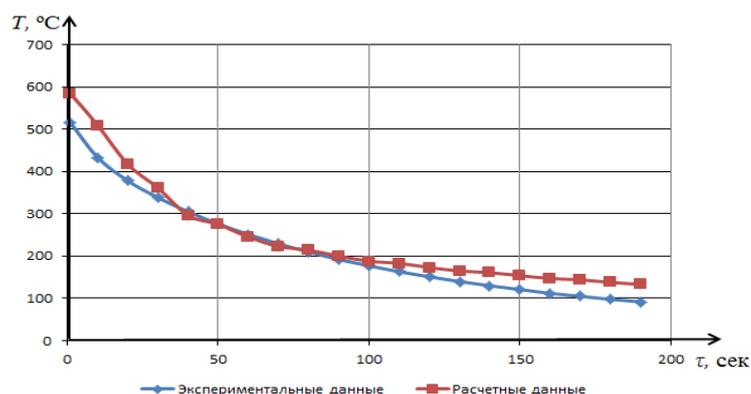


Рисунок 4.6 – График изменения расчетных и экспериментальных значений показателей температуры при остывании блока в точке контроля 2 см от поверхности в течение 190 мин.

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. (рисунок 4.6), 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 1 минуты, далее наблюдается относительная стабилизация температуры. Представленный эффект показывает что в начальный момент времени теплообмен проходит исключительно за счет перемешивания газовой фазы открытых форм граней пеностеклянного блока с наружным воздухом помещения цеха, далее происходит сложный теплообмен с включением передачи тепла теплопроводностью (стенки пор), а также конвекцией (газовая фаза внутри пор).

На графиках изменения расчетных и экспериментальных значений показателей температуры при остывании блока в точке контроля для центра в течение 190 мин. (рисунок 4.7) динамика показателей температуры также носит нелинейный характер, что свидетельствует о сложном теплообмене в центре пеностеклянного блока.

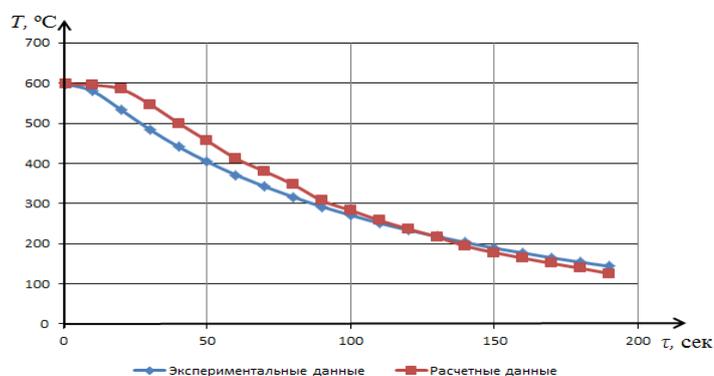


Рисунок 4.7 – График изменения расчетных и экспериментальных значений показателей температуры при остывании блока в точке контроля для центра в течение 190 мин.

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.

4.3. Исследование адекватности математической модели динамики распределения полей температур в структуре пеностекла

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.

4.3.1. Подготовительный этап оценки адекватности математической модели

На подготовительном этапе анализа экспериментальных данных и результатов расчета необходимо определить степень валидации модели, то есть соответствие или несоответствие полученной в работе функциональной зависимости результатам экспериментальных исследований. Для этого воспользуемся коэффициентом детерминации модели Пирсона, оцениваемого по формуле 4.2 [3]:

$$R^2 = \left(\frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)} \right)^2, \quad (4.2)$$

где \bar{x} – математическое ожидание экспериментальных данных; \bar{y} – математическое ожидание результатов моделирования; \overline{xy} – математическое ожидание произведения экспериментальных данных и

результат моделирования; $\sigma(x)$; $\sigma(y)$ – соответственно стандартные отклонения экспериментальных данных и результатов моделирования.

В качестве оценок математических ожиданий использовались формулы 4.3–4.5 [3, 99]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (4.3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad (4.4)$$

$$\bar{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i. \quad (4.5)$$

В свою очередь, в качестве стандартных отклонений $\sigma(x)$, $\sigma(y)$ используем их оценки, полученные по формулам 4.6–4.7 [3, 99]:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\bar{x})^2}; \quad (4.6)$$

$$\sigma(y) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\bar{y})^2}. \quad (4.7)$$

Проведем оценку критерия детерминации для точки контроля на поверхности, результаты представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расчетные значения для значений показателей температуры на поверхности

№ п/п	x	y	x·y	x ²	y ²
1	515	584	300760	265225	341056
2	433	509	220397	187489	259081
3	378	417	157626	142884	173889
4	338	361	122018	114244	130321
5	305	296	90280	93025	87616
6	276	275	75900	76176	75625
7	251	245	61495	63001	60025
8	229	223	51067	52441	49729
9	210	214	44940	44100	45796
10	192	200	38400	36864	40000

№ п/п	x	y	x·y	x ²	y ²
11	177	188	33276	31329	35344
12	163	183	29829	26569	33489
13	151	173	26123	22801	29929
14	140	165	23100	19600	27225
15	130	161	20930	16900	25921
16	121	154	18634	14641	23716
17	112	147	16464	12544	21609
18	105	144	15120	11025	20736
19	98	138	13524	9604	19044
20	92	133	12236	8464	17689
Суммы	4416	4910	1372119	1248926	1517840

Определим необходимые параметры:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{20} \cdot 4416 = 220,84;$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{20} \cdot 4910 = 245,5;$$

$$\bar{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i = \frac{1}{20} \cdot 1372119 = 68605,95;$$

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{20} \cdot 1248926 - 220,8^2} = 117,02;$$

$$\sigma(y) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\bar{y})^2} = \sqrt{\frac{1}{20} \cdot 1517840 - 245,5^2} = 124,99;$$

$$R^2 = \left(\frac{\bar{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)} \right)^2 = \left(\frac{68605,95 - 220,8 \cdot 245,5}{117,02 \cdot 124,99} \right)^2 = 0,969.$$

Значение коэффициента детерминации 0,969 показывает наличие устойчивой функциональной связи между данными динамики температуры, полученными в результате расчета по модели, и данными, полученными в результате экспериментального измерения скорости остывания блока из пеностекла на его поверхности. Для более детального анализа сходимости

расчетных и экспериментальных данных необходимо оценить вероятность, при которой доверительные интервалы экспериментальных измерений обеспечат принадлежность теоретических данных, полученных на основе разработанной модели.

Проведем аналогично оценку критерия детерминации для точки контроля температуры в центре, результаты представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчетные значения для значений температур в центре

№ п/п	x	y	x·y	x ²	y ²
1	597	597	356409	356409	356409
2	580	595	345100	336400	354025
3	533	585	311805	284089	342225
4	484	547	264748	234256	299209
5	441	500	220500	194481	250000
6	404	456	184224	163216	207936
7	371	412	152852	137641	169744
8	342	380	129960	116964	144400
9	316	347	109652	99856	120409
10	292	307	89644	85264	94249
11	271	283	76693	73441	80089
12	251	258	64758	63001	66564
13	234	237	55458	54756	56169
14	218	217	47306	47524	47089
15	203	194	39382	41209	37636
16	189	178	33642	35721	31684
17	177	164	29028	31329	26896
18	165	151	24915	27225	22801
19	154	139	21406	23716	19321
20	144	126	18144	20736	15876
Суммы	6366	6673	2575626	2427234	2742731

Определим необходимые параметры:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{20} \cdot 6366 = 318,30;$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{20} \cdot 6673 = 333,65;$$

$$\bar{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i = \frac{1}{20} \cdot 2575626 = 128781,30;$$

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i x_i^2 - (\bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{20} \cdot 2427234 - 318,3^2} = 141,59;$$

$$\sigma(y) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i y_i^2 - (\bar{y})^2} = \sqrt{\frac{1}{20} \cdot 2742731 - 333,65^2} = 160,67;$$

$$R^2 = \left(\frac{\bar{x}\bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)} \right)^2 = \left(\frac{128781,30 - 318,3 \cdot 333,65}{141,59 \cdot 160,67} \right)^2 = 0,985.$$

Значение коэффициента детерминации 0,985 показывает наличие устойчивой функциональной связи между данными динамики температуры, полученными в результате расчета по модели, и данными, полученными в результате экспериментального измерения скорости остывания блока из пеностекла в его центре. Для более детального анализа сходимости расчетных и экспериментальных данных необходимо оценить вероятность, при которой доверительные интервалы экспериментальных измерений обеспечат принадлежность теоретических данных, полученных на основе разработанной модели.

4.3.2. Основной этап оценки адекватности математической модели

Построение доверительных интервалов для экспериментальных данных температура-время.

Особенностью проверки адекватности результатов моделирования является необходимость комплексной оценки временного ряда температуры с учетом рассеивания данных, т.к. структура экспериментальных данных имеет нелинейный характер, поэтому оценку рассеивание значений будем проводить относительно центра по модели [108]:

$$T = T_{cp} \pm \Delta T. \quad (4.8)$$

Оценку величины интервала данных проведем по следующему методу с использованием критерия Стьюдента [108].

Определим стандартную ошибку данных относительно временной прямой [108]:

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(t_i - t_{cp})^2}{A}}, A = \sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2, \text{ мин}^2, \quad (4.9)$$

где n – число точек на временной прямой в которых производится сопоставление расчетных и экспериментальных данных; A – промежуточный вычислительный комплекс, мин^2 ; t_i – значение времени в i -ой точке контроля, мин .; t_{cp} – среднее значение времени относительно всех точек контроля экспериментальных данных, мин .

Определяем поправочный коэффициент по значению измерений температуры в точках временной прямой проведения эксперимента [108]:

$$K = \sqrt{\frac{B}{n-2}}, \text{ } ^\circ\text{C}, B = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{cp})^2, \text{ } ^\circ\text{C}^2, \quad (4.10)$$

где B – промежуточный вычислительный комплекс, $^\circ\text{C}^2$; T_i – экспериментальное значение температуры в контролируемой точке, $^\circ\text{C}$; T_{cp} – среднее экспериментальное значение температуры, $^\circ\text{C}$.

Определяем комплексную ошибку данных для зависимости температура-время:

$$Se_i = S_i \cdot K, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.11)$$

Определяем величину измерительного интервала в каждой i -ой точке временной прямой при доверительной вероятности P и количестве степеней свободы k на основе критерия Стьюдента по формуле [108]:

$$\Delta T = Se_i \cdot tp(P, k), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.12)$$

где $tp(P, k)$ – табличное значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности P и числе степеней свободы k .

Тогда нижняя точная граница данных температура-время T_{inf} определяется по формуле:

$$T_{inf} = T_i - \Delta T_i, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.13)$$

А верхняя точная граница данных температура-время T_{sup} соответственно:

$$T_{sup} = T_i + \Delta T_i, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.14)$$

Результаты расчетов по формулам 4.8–4.14 показаны в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Основные и дополнительные расчетные значения для показателей температуры на поверхности пеностекольного блока

t, мин	$T_{\text{эксп}}$	$T_{\text{расч}}$	$(T_{\text{эксп}} - T_{\text{ср}})^2$	$(t_i - t_{\text{ср}})^2$	S	Se	ΔT	T_{inf}	T_{sup}
1	515	584	86553,6	8845,4	0,4282	52,82	70	445	585
10	433	509	45028,8	7233,5	0,3989	49,20	65	368	503
20	378	417	24711,8	5632,5	0,3673	45,31	60	318	443
30	338	361	13735,8	4231,5	0,3374	41,61	55	283	398
40	305	296	7089,6	3030,5	0,3094	38,16	51	254	360
50	276	275	3047,0	2029,5	0,2839	35,02	46	230	327
60	251	245	912,0	1228,5	0,2618	32,29	43	208	298
70	229	223	67,2	627,5	0,2439	30,08	40	189	273
80	210	214	116,6	226,5	0,2311	28,51	38	172	252
90	192	200	829,4	25,5	0,2245	27,69	37	155	233
100	177	188	1918,4	24,5	0,2244	27,68	37	140	218
110	163	183	3340,8	223,5	0,2310	28,50	38	125	205
120	151	173	4872,0	622,5	0,2437	30,06	40	111	195
130	140	165	6528,6	1221,5	0,2616	32,27	43	97	187
140	130	161	8244,6	2020,5	0,2837	34,99	46	84	181
150	121	154	9960,0	3019,5	0,3091	38,13	51	70	176
160	112	147	11837,4	4218,5	0,3371	41,58	55	57	172
170	105	144	13409,6	5617,5	0,3670	45,27	60	45	170
180	98	138	15079,8	7216,5	0,3985	49,16	65	33	168
190	92	133	16589,4	9015,5	0,4312	53,19	71	21	167

Соответственно $n=20$, при $T_{\text{ср}}=220,8 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_{\text{ср}}=95,05$ мин, промежуточные

вычислительные комплексы: $A = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{\text{ср}})^2 = 273873,2 \text{ } ^\circ\text{C}^2$,

$B = \sum_{i=1}^n (t_i - t_{\text{ср}})^2 = 66311, \text{ мин}^2$ и коэффициент соответственно

$$K = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (T_i - T_{cp})^2} = \sqrt{\frac{273873,2}{20-2}} = 123,35, \quad ^\circ\text{C}.$$
 Критерий Стьюдента при $k = n - 1 = 20 - 1 = 19$ и $P=0,2$ равен соответственно $tp(P=0,2, k=19) = 1,33$ [4].

Значения S_i , Se_i , T_{inf} , T_{sup} представлены в таблице 4.4. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений показаны на рисунке 4.8.

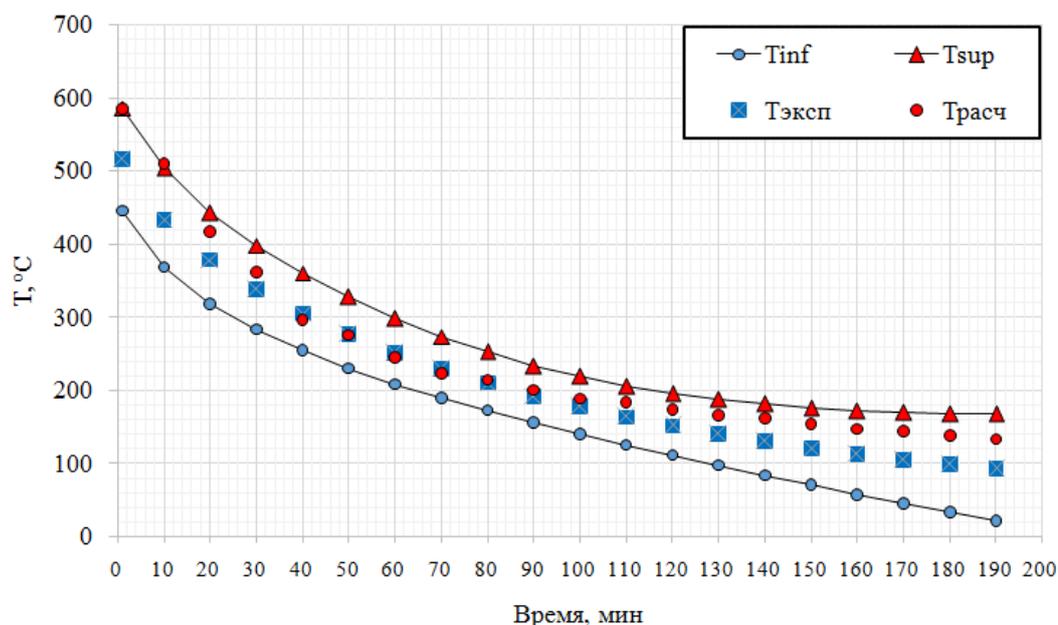


Рисунок 4.8 – Сопоставление расчетных и экспериментальных значений температуры при остывании блока на поверхности

Анализируя данные, представленные на рисунке 4.8, 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 пеностеклянного блока.

Расчетные значения доверительных интервалов, используемых при расчетах, указаны в таблице 4.9.

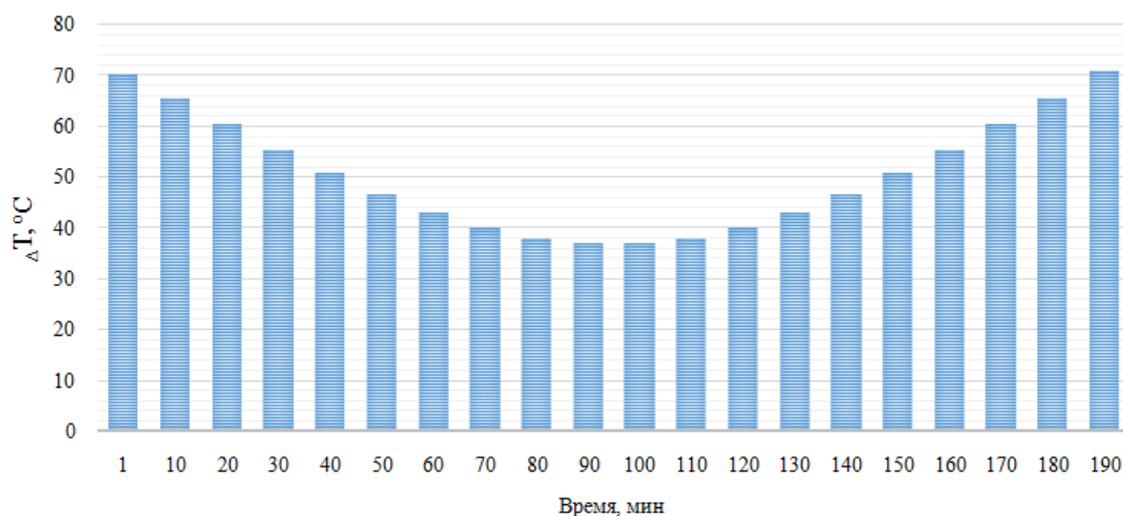


Рисунок 4.9 – Расчетная область доверительных интервалов для значений температур на поверхности

Динамика ΔT , иллюстрируемая на рисунке 4.9, построена с учетом значений критерия Стьюдента при максимальной доверительной вероятности.

Аналогично проводим расчет для температур в центре блока по формулам 4.8–4.14. Результаты расчетов показаны в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Основные и дополнительные расчетные значения для температур на поверхности

t, мин	$T_{\text{эксп}}$	$T_{\text{расч}}$	$(T_{\text{эксп}} - T_{\text{ср}})^2$	$(t_i - t_{\text{ср}})^2$	S	Se	ΔT	T_{inf}	T_{sup}
1	597	597	77673,7	8845,4	0,4282	63,91	85	512	682
10	580	595	68486,9	7233,5	0,3989	59,53	79	501	664
20	533	585	46096,1	5632,5	0,3673	54,82	73	460	610
30	484	547	27456,5	4231,5	0,3374	50,35	67	417	555
40	441	500	15055,3	3030,5	0,3094	46,17	61	380	507
50	404	456	7344,5	2029,5	0,2839	42,37	56	348	465
60	371	412	2777,3	1228,5	0,2618	39,07	52	319	427
70	342	380	561,7	627,5	0,2439	36,39	48	294	395
80	316	347	5,3	226,5	0,2311	34,49	46	270	366
90	292	307	691,7	25,5	0,2245	33,50	44	248	341
100	271	283	2237,3	24,5	0,2244	33,50	44	227	320
110	251	258	4529,3	223,5	0,2310	34,48	46	205	301
120	234	237	7106,5	622,5	0,2437	36,37	48	186	287
130	218	217	10060,1	1221,5	0,2616	39,04	52	166	274
140	203	194	13294,1	2020,5	0,2837	42,34	56	147	264
150	189	178	16718,5	3019,5	0,3091	46,13	61	128	255
160	177	164	19965,7	4218,5	0,3371	50,31	67	110	248
170	165	151	23500,9	5617,5	0,3670	54,78	73	92	242
180	154	139	26994,5	7216,5	0,3985	59,48	79	75	237
190	144	126	30380,5	9015,5	0,4312	64,36	85	59	234

Соответственно $n = 20$, при $T_{cp}=318,3$ °C, $t_{cp}=95,05$ мин, промежуточные вычислительные комплексы: $A = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{cp})^2 = 400936,2$ °C²,

$B = \sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2 = 66311$, мин² и коэффициент соответственно $K = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (T_i - T_{cp})^2} = \sqrt{\frac{400936,2}{20-2}} = 149,25$, °C. Критерий Стьюдента при $k=n-1 = 20-1 = 19$ и $P=0,2$ равен соответственно $tp(P=0,2, k=19) = 1,33$ [4].

Значения S_i , Se_i , T_{inf} , T_{sup} представлены в таблице 4.5. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений показано на рисунке 4.10.

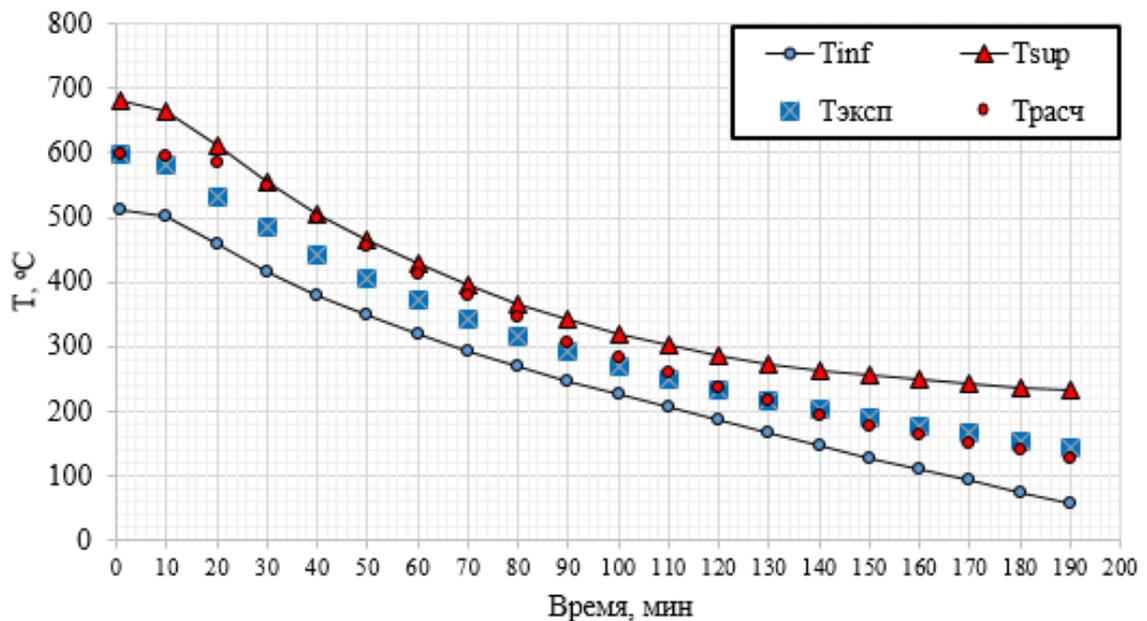


Рисунок 4.10 – Сопоставление расчетных и экспериментальных значений температуры при остывании блока в центре

Анализ данных, представленных на рисунке 4.10, позволяет 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 временной оси, что аналогично результатам оценки, сделанной ранее на поверхности материала, что подтверждает правильность выбора модели рассеивания экспериментальных данных;

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

На рисунке 4.11 показаны расчетные значения доверительных интервалов, используемых при расчетах.

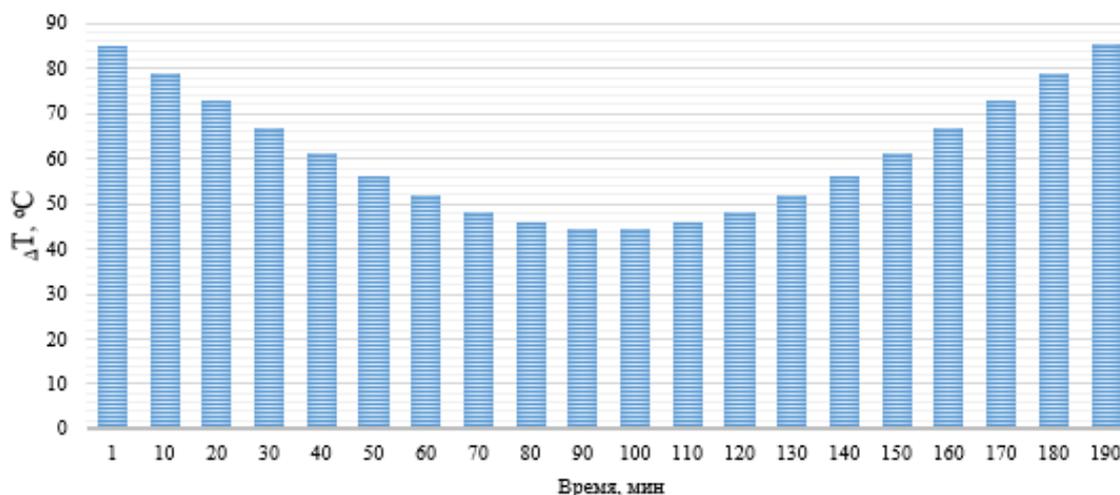


Рисунок 4.11 – Расчетная область доверительных интервалов для значений температур в центре

Как видно на рисунке 4.11, динамика ΔT имеет большой разброс данных экспериментального временного ряда температуры в сравнении с моделированием на поверхности пеностекольного блока.

4.3.3. Заключительный этап оценки адекватности математической модели

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 таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты оценки адекватности математической модели

Точки контроля измерения температуры	ЭТАПЫ ОЦЕНКИ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ				
	Критерий Пирсона, R^2	Критерий Стьюдента, $t_p(P, k)$	Комплексная ошибка данных, $S_{e\max}$	Максимальный разброс экспериментальных данных, ΔT_{\max}	Вывод
на поверхности	$R^2=0,969$	$P=0,2; k=19; t_p=1,33$	$S_{e\max}=52,82\text{ }^\circ\text{C}$ $S_{e\min}=27,68\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\max}=70\text{ }^\circ\text{C}$ $\Delta T_{\min}=37\text{ }^\circ\text{C}$	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 4.6 оценим фактический разброс экспериментальных данных температура-время по формуле $P_{empir} = \Delta T_{max} / T_{max}$:

- на поверхности пеностеклянного блока $P_{empir} = \Delta T_{max} / T_{max} = 0,13$;

- в центре пеностеклянного блока $P_{empir} = \Delta T_{max} / T_{max} = 0,14$.

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.

4.4. Выводы по главе 4

1. Использование разработанной математической модели по уравнению (4.1) позволило провести исследование особенностей распределения показателей температуры пеностеклянного блока и оценить сходимость функциональной зависимости между временем и температурой в заданных точках контроля экспериментальных данных (рисунки 4.8 и 4.10).

2. Предложена схема обработки экспериментальных данных в несколько этапов с применением коэффициента детерминации Пирсона при оценке функциональной зависимости между расчетными и экспериментальными данными и критерия Стьюдента при оценке принадлежности расчетных данных доверительным интервалам, полученным в ходе проведения эксперимента.

3. Полученные расчетные значения коэффициента детерминации Пирсона 0,969 – для поверхности и 0,985 – для центра демонстрируют наличие устойчивой функциональной связи между показателями динамики температуры, полученными в результате расчета по модели, и данными, полученными в результате экспериментального измерения показателей температуры с помощью средств контроля.

4. Проведено построение доверительных интервалов экспериментальных данных на основе критерия Стьюдента при доверительной вероятности $P=0,2$ и числе степеней свободы 19. Показано, что расчетные

значения температур в центре блока и на его поверхности находятся в области допустимых значений экспериментальных данных.

5. Выполнено исследование процесса остывания пеностекольного блока и проведена проверка адекватности математической модели теплопереноса. Доказана высокая сходимость результатов моделирования и экспериментальных измерений показателей температуры на поверхности образца, а также в его центре.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОСТЕКЛА И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1. Определение факторов, влияющих на свойства пеностекла

Многолетние исследования ученых в области совершенствования технологии производства пеностекла позволили получить всевозможные закономерности физико-химических свойств готового материала от технологии производства. Анализ данных закономерностей позволяет в зависимости от требуемых показателей теплофизических свойств готового продукта управлять технологическими процессами и выбирать оптимальные. Однако в каждом случае необходимо теоретические закономерности проверять экспериментально. Причем нужно учитывать, что, как правило, рассматривается один фактор технологическими процессами и его влияние на свойства материала. В современных условиях при выборе строительного материала потребитель не всегда руководствуется каким-то одним теплофизическим параметром, поэтому требуется разработка математической модели, способной учитывать влияние несколько факторов на конечные свойства, только в этом случае можно говорить действительно об оптимизации технологического процесса. Стоит отметить, что создание математической модели, способной учитывать большое количество факторов, сложно само по себе и потребует много упрощений, что повлияет в конечном итоге на точность расчетов. Поэтому нужно определить требуемые критерии (показателей качества) y_n и определить факторы, оказывающих наибольшее влияние на эти критерии, то есть, варьируемые переменные x_k и управляющие воздействия w_p .

При выборе критериев руководствовались [26].

Сведения по показателям качества готового материала и факторам, влияющим на процесс их формирования, показаны в таблицах 2.4 и 2.5. Были приняты следующие обозначения:

x – входные факторы;

w – управляющие воздействия (Регулируемые процессы);

y – выходные факторы (Показатели качества).

Для формализации математической модели оптимального технологического процесса получения блочного пеностекла с заданными

свойствами необходимо из числа приведенных критериев и факторов в таблице 2.5 выбрать наиболее значимые.

5.2. Анализ и выбор целевых функций технологической системы производства пеностекла

В общем виде решение задачи проектирования оптимального технологического процесса заключается в решении системы неравенств [29]:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y_1(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq y_1^o, \\ y_2 &= y_2(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq y_2^o, \\ &\dots \\ y_n &= y_n(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq y_n^o, \end{aligned} \right\}, \quad (5.1)$$

при которых $y_o = y_o(x_1, x_2, \dots, x_k) \rightarrow \text{extr}$,

где y_1, y_2, \dots, y_n – показатели эксплуатационных свойств системы; $y_1^o, y_2^o, \dots, y_n^o$ – нормируемые значения показателей эксплуатационных свойств; y_o – критерий оптимальности или целевая функция.

Для решения системы «процесс производства блочного пеностекла» и выбора оптимальных технологических решений необходимо опираться на критерии, соответствующие поставленной цели, – получению материала с заданными свойствами [109].

Для того чтобы получить пеностекло с заданным качеством, необходимо построить количественные зависимости, характеризующие влияние отдельных факторов на каждый критерий оптимальности: на основании выбранного критерия оптимальности составляется целевая функция, представляющая собой зависимость критерия оптимальности от факторов, влияющих на ее значение. Как правило, используются статистические данные целенаправленных испытаний или реальной эксплуатации пеностекла. Обработка статистических данных позволяет определять и количественные, и качественные зависимости свойств от меняющихся назначенных факторов.

В результате реального эксперимента получаем статистические данные, по которым находим аналитические зависимости [28]:

$$y_n = y_n(x_k); k \in [1; i]; n \in [1; j]; \quad (5.2)$$

$$y_n(x_k) = y_n(y_j(x_k)); n \in [1; q]; j \in [1; q]; n \neq j. \quad (5.3)$$

Если все показатели y_n заданы заказчиком, то они определяют и все значения x_k для себя. Совпадение значений x_k ($k \in [1; i]$) для всех y_n ($n \in [1; j]$) маловероятно: в общем случае выполнить точно все заданные значения y_n невозможно. Необходимо находить компромисс: за счет уменьшения важности каких-либо (или одного) показателя y_n повысить значения остальных до допустимых [35]. Наличие зоны допустимых значений позволяет управлять показателями y_n и адаптировать их под конкретные условия производства. Зона допустимых значений для каждого y_n определяется заказчиком в виде [132]:

$$\theta_n = [y_{n_{\min}}; y_{n_{\max}}] \text{ или } y_{n_{\min}} \leq \theta_n \leq y_{n_{\max}}. \quad (5.4)$$

В задачах построения оптимального технологического процесса получения бетонов критерии оптимальности выбирают стремящимися к некоторому абсолютному или условному экстремуму, а в многокритериальных (многофакторных) задачах они, как правило, находятся в компромиссной области [29]. Компромисс в решении поставленной задачи возможен при нахождении наиболее зависимого показателя y_n . Выбирается самый деформируемый промежуток θ_n : для каждого в отдельности x_k задают значения $x_k = x_{k0} \pm \Delta x_k$, где x_{k0} – натуральное значение основного уровня k -того фактора, Δx_k – шаг изменения (интервал варьирования) k -того фактора, и по (5.2) находят все значения y_n . Затем определяют скорости изменения каждого y_n вправо и влево от x_{k0} [28]:

$$V_{\Pi}(y_n) = \frac{y_n(x_k + \Delta x_k) - y_n}{y_n(x_k)}, \quad (5.5)$$

$$V_{\text{Л}}(y_n) = \frac{y_n(x_k - \Delta x_k) - y_n}{y_n(x_k)}, \quad (5.6)$$

Если значение скорости V отрицательное, то показатель y_n убывает или уменьшается в относительной величине. Причем, если оба значения V из (5.5) и (5.6) отрицательные, то мы имеем точку «перегиба». И ясно, что нам задано максимальное значение y_n . Если $V_{\text{Л}} < 0$, $V_{\Pi} > 0$ – возрастание. Если наоборот – то убывание. В процессе обработки статистических данных выявляются зоны нерегулярного поведения значения целевой функции. Самая деформируемая θ_n та, где значение V_{Π} или $V_{\text{Л}}$ максимально. Такой показатель y_n самый опасный, он в первую очередь требует проверки: хватит ли компромиссной уступки. Понятно, что может возникнуть ситуация, когда уступки не хватает и задача не

имеет решения. В этом случае необходимо найти новые условия для исправления y_n , т.е. построить новые зависимости (5.2) показателей y_n от ранее не учтенных параметров x_k .

Тогда управляемые факторы добавляются из зоны нерегулярного поведения целевой функции для уточнения зависимостей – возникает необходимость в факторе, важностью которого ранее пренебрегали, т.е. еще какой-то новый фактор необходимо вводить в ряд $x_k \in [x_1, \dots, x_i, x_{\text{новый}}]$. Соответственно, с появлением фактора $x_{\text{новый}}$ все соотношения (5.2)–(5.6) полностью изменяются, и формализуется новая задача. Процесс постоянный, и именно он ведет к открытию новых материалов и технологий [28, 136].

В случае установления компромисса и определения всех x_k для заказчика определяется область применения каждого из факторов. Скорость изменения V_{II} и V_{II} позволяет исчерпать компромисс (5.4) без ущерба остальных y_n с «запасом». Здесь уже появляется возможность совершенствования некоторых из критериев y_n . Решается задача нахождения его максимума или минимума в зоне изменения каждого x_k . В завершение данного этапа целесообразно провести проверку реальным экспериментом – уточняются соотношения (5.2)–(5.3), и совершенствуется математическая модель, что очень важно для производства [35, 132].

В данной работе, после исследования полученных блоков пеностекла на прочность при сжатии и изгибе, водопоглощение, влажность, плотность и коэффициент теплопроводности, по методикам, изложенным в главе 2, целенаправленно выбраны два критерия оптимальности. В качестве основного критерия оптимизации принят показатель коэффициента теплопроводности. Дополнительным критерием оптимизации принят показатель плотности.

При решении компромиссной задачи проектирования оптимального технологического процесса требуется найти значения факторов, обеспечивающих минимальную теплопроводность при значениях плотности на допустимом уровне [106].

5.3. Разработка структуры математической модели оптимального технологического процесса получения пеностекла

При разработке математической модели процесса производства блочного пеностекла были проведены экспериментальные исследования влияния технологических приемов на критерии качества: y_1 – коэффициент теплопроводности, и y_2 – плотность. Поиск оптимума осуществлялся по ключевым технологическим факторам: x_1 – Процентное отношение

газообразователя от всего объема сырьевой смеси, %; x_2 – Время термической обработки при вспенивании сырьевой смеси, мин.; x_3 – Температурный режим термообработки, °С.

Для оптимизации технологического процесса получения блочного пеностекла было использовано трехфакторное математическое планирование в трех уровнях.

Условия проведения эксперимента представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные значения факторов и интервалы варьирования

Фактор, x	Уровни факторов			Интервал варьирования, Δx
	$x = -1$	$x = 0$	$x = +1$	
Процентное отношение газообразователя от всего объема сырьевой смеси, % (x_1)	3	4	5	1
Время термической обработки при вспенивании сырьевой смеси, мин. (x_2)	30	45	60	15
Температурный режим термообработки, °С (x_3)	750	800	850	50

Число сочетаний выбранных факторов при их значениях на двух уровнях равно $2^k = 2^3 = 8$.

Исходные значения факторов и интервалы варьирования определились, исходя из ранее проведенных исследований согласно источникам [80, 96, 98, 129] и экспериментам, проведенным самостоятельно.

Для того чтобы определить рациональный режим сформированного пористого материала и определить характерный размер пор, а также время их образования, необходимо решить нелинейное уравнение:

$$\frac{\partial R_1}{\partial t} = \frac{3V_l + R_1^3}{4\pi \mu \frac{3V_l}{\pi}} ((p_v - p_n) \cdot R_1 - 2\sigma), \quad (5.7)$$

где $\Delta p = p_v - p_n$. (5.8)

Для проведения расчетов и графической интерпретации уравнения (5.7) применяли метод Рунге-Кутты IV порядка [5] в программе MathCAD.

Использовали четыре значения функции для двух промежуточных точек на шаге: два значения в центре шага и два значения на концах шага:

$$k_1 = h \cdot f(t_i \cdot R_i); \quad (5.9)$$

$$k_2 = f\left(t_i \cdot \frac{1}{2} \cdot h, R_i + k_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \Delta R_i\right); \quad (5.10)$$

$$k_3 = f\left(t_i \cdot \frac{1}{2} \cdot h, R_i + k_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \Delta R_i\right); \quad (5.11)$$

$$k_4 = f(t_i \cdot h, R_i + k_3 \cdot \Delta R_i); \quad (5.12)$$

$$R_{i+1} = R_i + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \cdot \frac{1}{6} \Delta R_i. \quad (5.13)$$

Метод Рунге-Кутты IV порядка использовали, так как он обеспечивает расчеты с необходимой точностью, отличается устойчивостью и возможностью контроля погрешности и изменения шага расчета, в отличие от методов «Эйлера», «Адамса» или «Прогноз-коррекции».

Результаты расчетов представлены на рисунке 5.1.

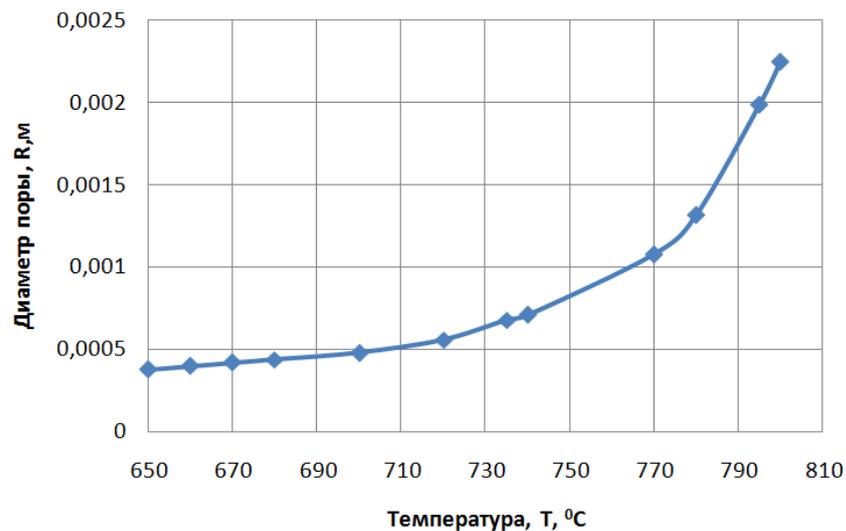


Рисунок 5.1 – График роста радиуса поры в зависимости от температуры

Значения μ_0 , σ_0 при расчетах принимались переменными.

Изменение значений показателя динамической вязкости рассчитывали по формуле [96, 138]:

$$\mu = \mu_0 \cdot 10^{A \cdot \frac{T_0 - T}{(T - B) \cdot (T_0 - C)}}, \quad (5.14)$$

где μ_0 – коэффициент динамической вязкости в начальный момент времени [Па·с]; T_0 – температура в начальный момент времени [$^{\circ}\text{C}$]; T – температура [$^{\circ}\text{C}$]; A, B, C – эмпирические коэффициенты.

Изменение значений коэффициента поверхностного натяжения рассчитывали по формуле [147]:

$$\sigma = \sigma_0 - 0,004 \cdot \frac{T-1173}{100}, \quad (5.15)$$

где σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения в начальный момент времени [Н/м].

Изменение температуры по времени задавали следующим образом:

$$T = T_0 + k \cdot t, \quad (5.16)$$

где k – коэффициент учитывающий скорость нагрева; t – время [с].

Значение μ_0 принимали равным 10^{10} Па. Значение σ_0 принимали равным 0,2 Н/м. Коэффициент A принимали равным 3700. Коэффициент B принимали равным 510. Динамику роста радиуса поры рассматривали при начальной температуре 25°C . Значение k принимали равным 0,25, что позволило задать изменение температуры с шагом $15^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, то есть весь процесс вспенивания нами моделировался в течение 1 часа.

Как видно из графика (рисунок 5.1), радиус поры начинает медленно увеличиваться при достижении температуры 650°C , при этом увеличение температуры до 700°C приводит к росту радиуса всего на 0,0001 м.

Однако при температурах выше 700°C начинается активный процесс оплавления частиц стекла, концентрация и давление газообразователя становится достаточным, чтобы преодолеть силы поверхностного натяжения, и радиус поры начинает увеличиваться. При достижении температур в 850°C радиус поры увеличивается до размеров 2–2,5 мм, после чего рост радиуса поры замедляется и затем останавливается. Данный факт обуславливается рядом причин. Во-первых, образующиеся поры начинают разрушаться, так как оболочка стекла не выдерживает высоких давлений, возникающих внутри и снаружи поры вследствие понижения коэффициента поверхностного натяжения и уменьшения вязкости стеклянных частиц сырьевой смеси (пеностекольной шихты). Во-вторых, в результате длительного воздействия температур выше 850°C происходит полное термическое разложение газообразователя, и его количество постепенно становится недостаточным для образования новых пор. Образовавшиеся поры начинают разрушаться, что в конечном итоге может привести к ухудшению конечных теплофизических характеристик готового материала. Полученные результаты были учтены при выборе интервалов

варьирования управляющих факторов. Однако результатов по температурному диапазону роста радиуса пор недостаточно, чтобы определить наилучшие варианты, поэтому дополнительно была проведена серия экспериментальных исследований.

Температурные режимы проведенных экспериментальных исследований представлены в главе 2 на рисунке 2.14.

Полученные характеристики пеностекла при различных режимах термической обработки и процентном соотношении газообразователя можно условно разделить на четыре группы по степени формирования пор в готовом материале:

- 1) Поры равномерно сформированы по всему объему пеностекла;
- 2) Поры сформированы в центре пеностекла, а в приповерхностных слоях поры не сформированы;
- 3) Поры сформированы на поверхности, а в центре пеностекла не сформированы;
- 4) Поры сформированы неравномерно по всему объему пеностекла и имеют недостаточный радиус и неправильную форму.

Результаты экспериментальных исследований № 1, 2

Проведенные эксперименты под номерами 1 и 2 относятся к четвертой группе по степени формирования пор в готовом материале. Сырьевую смесь равномерно нагревали в печи с 20°C до температуры 850°C со скоростью роста температуры 15°C в минуту, при этом температура в печи нагрелась до 850°C в течение 57 минут, затем данная температура поддерживалась в течение 60 минут. Затем отключали печь, после чего происходило постепенное понижение температуры до начальных значений, и через 203 минуты температура в печи снижалась до 30°C (рисунок 5.2).

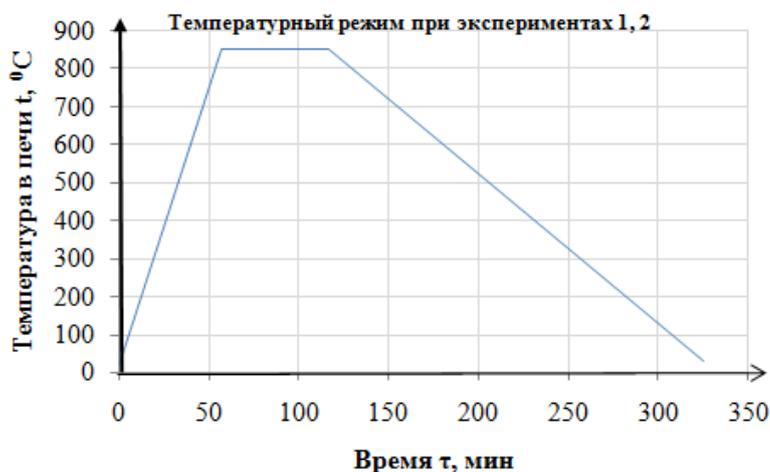


Рисунок 5.2 – Температурные кривые условий термической обработки сырьевой смеси

При процентном содержании газообразователя по массе 5 % наблюдается неравномерное распределение неправильной формы пор по всему объему пеностекла. Предполагаем, что реакция термического разложения газообразователя заканчивается раньше, и к моменту наступления времени выдержки 60 минут газообразователь в большом количестве выгорает, образованные при вспенивании поры в результате критического повышения давления начинают разрушаться, что способствует уменьшению количества пор и увеличению стекольного сплава по всему объему материала.

При процентном соотношении газообразователя 3% по массе процесс термического разложения газообразователя имеет схожую кинетику с вышеописанным, но при этом из-за уменьшения количества газообразователя с 5% до 3 % в конечном итоге структура пеностекла еще сильнее ухудшается. Значения показателей средней плотности и коэффициента теплопроводности готового материала увеличиваются.

Результаты экспериментальных исследований № 3, 4

Проведенные эксперименты под номерами 3 и 4 относятся ко второй группе по степени формирования пор в готовом материале. Сырьевую смесь равномерно нагревали в печи с 20 °С до температуры 850 °С со скоростью роста температуры 15 °С в минуту, при этом температура в печи нагрелась до 850 °С за 57 минут и поддерживалась в течение 30 минут. Затем отключали печь, после чего происходило постепенное понижение температуры до начальных значений, и через 183 минуты температура в печи снижалась до 30 °С (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Температурные кривые условий термической обработки сырьевой смеси

При процентном соотношении 5 % происходит равномерная поризация в центре материала, при этом приповерхностные слои менее поризованы. Предполагаем, что при температурах 850 °С скорость реакции термического разложения газообразователя очень высокая, и поры в результате повышения давления в них начинают разрушаться, образуя стекольный спек на расстоянии 5–6 мм от стенок формы с минимальным количеством пор, имеющих неправильную форму (не сферическую). Из-за низкой теплопроводности и малого времени выдержки в центре сырьевая смесь только успевает прогреться до необходимой температуры активации газообразователя и является достаточной, чтобы вспенить центральную часть при образовании пор оптимального размера.

При тех же температурных режимах, но концентрации газообразователя 3%, также наблюдается равномерная поризация материала в центре, а глубина непоризованного слоя на поверхности становится немного больше 8–9 мм, связано это с уменьшением количества газообразователя, выгорающего на приповерхностных слоях, что приводит к увеличению средней плотности и значений теплопроводности.

Результаты экспериментальных исследований № 5, 6

Проведенные эксперименты под номерами 5 и 6 относятся к первой группе по степени формирования пор в готовом материале. Сырьевую смесь равномерно нагревали в печи с 20 °С до температуры 750 °С со скоростью роста температуры 15 °С в минуту, при этом температура в печи нагрелась до 750 °С за 50 минут и поддерживалась в течение 60 минут. Затем отключали печь, после чего происходило постепенное понижение температуры до начальных значений, и через 170 минут температура в печи снижалась до 30 °С (рисунок 5.4).

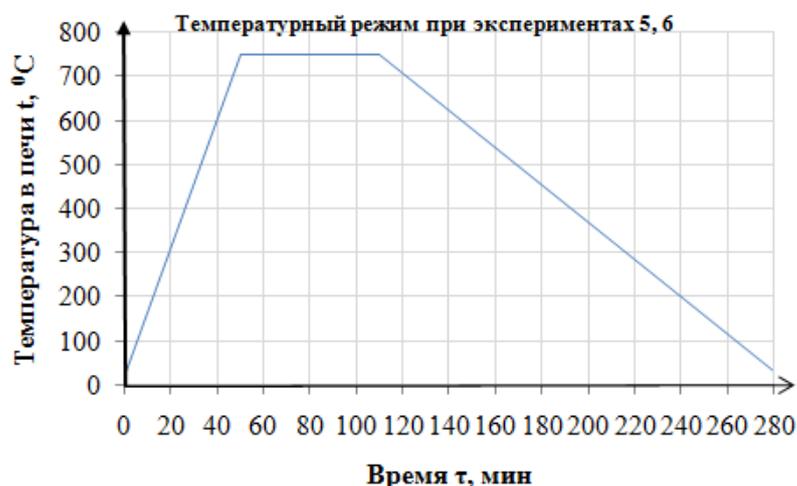


Рисунок 5.4 – Температурные кривые условий термической обработки сырьевой смеси

При процентном содержании газообразователя по массе 5 % наблюдается равномерное распределение пор по всему объему пеностекла. Предполагаем, что происходит реакция термического разложения в течение всего процесса вспенивания сырьевой смеси, что способствует равномерному формированию пор по всему объему материала.

При процентном соотношении газообразователя 3% по массе процесс термического разложения протекает быстрее по времени, что способствует менее равномерному формированию пор в материале по всему объему формы для вспенивания. В зоне контакта пеностекла с гранями формы для вспенивания наблюдается эффект оплавления поверхностей пеностекла с глубиной дефекта 2–4 мм. Этот факт указывает на недостаточность количества газообразователя в составе сырьевой смеси. Учитывая поверхностные дефекты пеностекла, показатели средней плотности готового материала увеличиваются, и, как следствие, теплопроводность материала тоже увеличивается, что ухудшает потребительские свойства продукции в целом.

Результаты экспериментальных исследований № 7, 8

Проведенные эксперименты под номерами 7 и 8 относятся к третьей группе по степени формирования пор в готовом материале. Сырьевую смесь равномерно нагревали в печи с 20 °С до температуры 750 °С со скоростью роста температуры 15 °С в минуту, при этом температура в печи нагрелась до 750 °С в течение 50 минут, затем данная температура поддерживалась в течение 30 минут. Затем отключали печь, после чего происходило постепенное понижение температуры до начальных значений, и через 160 минут температура в печи снижалась до 30 °С (рисунок 5.5).

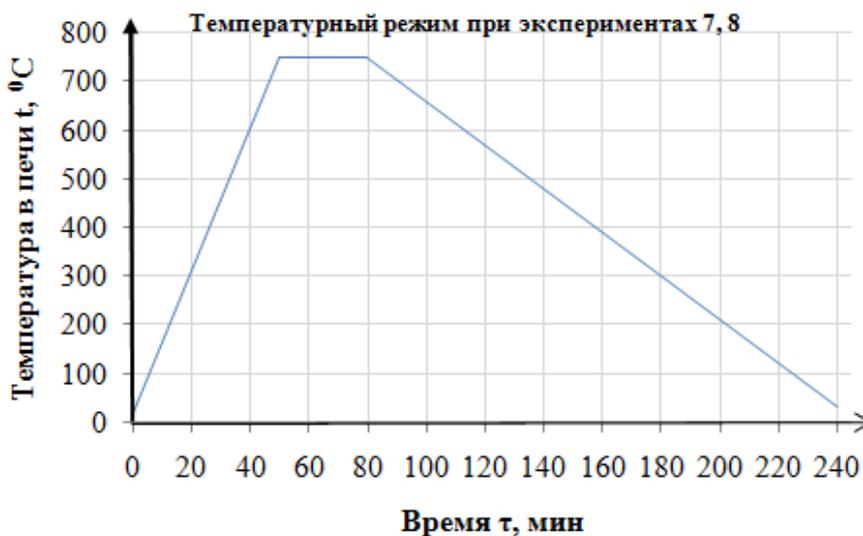


Рисунок 5.5 – Температурные кривые условий термической обработки сырьевой смеси

При процентном соотношении 5 % произошла равномерная поризация в приповерхностных слоях, а в центре материала газообразователь сработал лишь частично, так как температура в центре только лишь к концу температурной выдержки достигла значений, когда происходит разложение газообразователя и выделение газа для создания необходимого давления для роста пор. Стоит отметить, что непоризованный слой в центре материала возник не только из-за недостаточной температуры для срабатывания газообразователя, но и из-за несвоевременного оплавления стекла. То есть, газообразователь не может вспенить стекло в сыпучем состоянии, необходимо, чтобы сырьевая смесь стала оплавленной (вязкой, текучей). Однако, в отличие от двух вышерассмотренных групп, в данном случае более высокие показатели имеет состав с 3% соотношением. Данное обстоятельство можно объяснить тем фактом, что теплопроводность применяемого газообразователя выше, чем сырьевого состава, что позволило прогреть немного быстрее сырьевую смесь.

5.3.1. Построение математической модели критерия теплопроводности сырьевой смеси для получения пеностекла

Функция отклика описывается уравнением многочлена из всех возможных произведений x_k :

$$\left. \begin{aligned} y_1 = A_1x_1x_2x_3 + A_2x_1x_2 + A_3x_1x_3 + A_4x_2x_3 + A_5x_1 + A_6x_2 + A_7x_3 + A_8, \\ n \in [1;8], x_1 = (a_1 \text{ или } b_1), x_2 = (a_2 \text{ или } b_2), x_3 = (a_3 \text{ или } b_3) \end{aligned} \right\}, \quad (5.17)$$

где A_1-A_8 , – коэффициенты, определяемые экспериментально, a_1-a_3 – нижний уровень варьирования факторов; b_1-b_3 – верхний уровень варьирования факторов.

План эксперимента в натуральном выражении представлен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – План эксперимента в натуральном выражении

№ опыта	x_1	x_2	x_3	$x_1x_2x_3$	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	y_1	y_2
1	5	60	850	255000	300	4250	51000	0,086	290
2	3	60	850	153000	180	2550	51000	0,099	340
3	5	30	850	127500	150	4250	25500	0,071	231
4	3	30	850	76500	90	2550	25500	0,068	229
5	5	60	750	225000	300	3750	45000	0,061	190
6	3	60	750	135000	180	2250	45000	0,064	214
7	5	30	750	112500	150	3750	22500	0,074	243
8	3	30	750	67500	90	2250	22500	0,079	261

Значения y_1 и y_2 были получены экспериментально по методике и на оборудовании, описанном во второй главе.

На основании таблицы 5.2 мы получаем систему из 8 линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов A_1 - A_8 . Т.к. число уравнений и неизвестных совпадает, есть единственное решение.

$$\left. \begin{aligned} 225000A_1 + 300A_2 + 4250A_3 + 51000A_4 + 5A_5 + 60A_6 + 850A_7 + A_8 &= 0,086 \\ 153000A_1 + 180A_2 + 2550A_3 + 51000A_4 + 3A_5 + 60A_6 + 850A_7 + A_8 &= 0,099 \\ 127500A_1 + 1500A_2 + 4250A_3 + 25500A_4 + 5A_5 + 30A_6 + 850A_7 + A_8 &= 0,071 \\ 76500A_1 + 90A_2 + 2550A_3 + 25500A_4 + 3A_5 + 30A_6 + 850A_7 + A_8 &= 0,068 \\ 225000A_1 + 300A_2 + 3750A_3 + 45000A_4 + 5A_5 + 60A_6 + 750A_7 + A_8 &= 0,061 \\ 135000A_1 + 180A_2 + 2250A_3 + 45000A_4 + 3A_5 + 60A_6 + 750A_7 + A_8 &= 0,064 \\ 112500A_1 + 150A_2 + 3750A_3 + 22500A_4 + 5A_5 + 30A_6 + 750A_7 + A_8 &= 0,074 \\ 67500A_1 + 90A_2 + 2250A_3 + 22500A_4 + 3A_5 + 30A_6 + 750A_7 + A_8 &= 0,079 \end{aligned} \right\} \cdot \quad (5.18)$$

Результаты расчетов коэффициентов A_1 - A_8 из уравнения 5.18 показаны в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты определения коэффициентов A_1 - A_8

Коэффициент	Численное значение
A_1	-0,00000343
A_2	0,00260
A_3	0,000143
A_4	0,0000256
A_5	-0,111
A_6	-0,0198
A_7	-0,000998
A_8	0,853

Согласно таблице 5.3 многочлен произведений (5.17) принимает вид:

$$y_1 = -3,43 \cdot 10^{-6} x_1 x_2 x_3 + 2,6 \cdot 10^{-3} x_1 x_2 + 1,43 \cdot 10^{-4} x_1 x_3 + 2,56 \cdot 10^{-5} x_2 x_3 - 0,11 x_1 - 1,98 \cdot 10^{-2} x_2 - 9,98 \cdot 10^{-4} x_3 + 0,85. \quad (5.19)$$

Функция (5.17) зависит от каждого x_k линейно (при остальных постоянных):

$$y_{1k} = A_{0k_i} x_k + A_{0k_i}, \quad i \in [1;8], k \in [1;3] \quad (5.20)$$

Но, как показывают данные таблицы 5.2, таких зависимостей для каждого x_k восемь (2^3 – сочетание остальных x_k), и значений y_{lk} тоже восемь. Уравнения (5.20) – уравнения прямой и, следовательно, экстремальные значения y_{lk} и сами y_{lk} из (5.17) нужно искать в граничных точках области задания x_k (таблица 5.2). Из таблицы 5.3 видно, что минимальный коэффициент теплопроводности y_{lmax} достигается в точках $x_1 = 5$; $x_2 = 60$; $x_3 = 750$. Это точка в трехмерном пространстве $\{x_1, x_2, x_3\}$, а y_l из (5.17) – это непрерывное трехмерное множество существования y_l .

Для получения более низкого коэффициента теплопроводности, чем $y_{lmax} = 0,061$, необходимо изменять области задания x_k . Пути изменения помогает определить функция (5.17): задавая $y_{lзак}$ (заказчика), для каждого x_k можем найти необходимые значения, принимая остальные факторы постоянными, причем границы области их задания принимаем по таблицы 5.2:

$$\begin{aligned} y_{lзак} &= A_{0k_i} x_k + B_{0k_i}, \\ i \in [1;4], k \in [1;3] \end{aligned} \quad (5.21)$$

В уравнение (5.21) включаются x_k из области их задания дважды: x_{kmin} и x_{kmax} . Поэтому вариантов получается 4. Коэффициенты для (5.20) и (5.21) находятся по формулам:

$$\left. \begin{aligned} A_{01i} &= A_1 x_2 x_3 + A_2 x_2 + A_3 x_3 + A_5 \\ B_{01i} &= A_4 x_2 x_3 + A_6 x_2 + A_7 x_3 + A_8 \end{aligned} \right\}; \quad (5.22)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{02i} &= A_1 x_1 x_3 + A_2 x_1 + A_4 x_3 + A_6 \\ B_{02i} &= A_3 x_1 x_3 + A_5 x_1 + A_7 x_3 + A_8 \end{aligned} \right\}; \quad (5.23)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{03i} &= A_1 x_1 x_2 + A_3 x_1 + A_4 x_2 + A_7 \\ B_{03i} &= A_2 x_1 x_2 + A_5 x_1 + A_6 x_2 + A_8 \end{aligned} \right\}. \quad (5.24)$$

Как видно из уравнений (5.22–5.24) и таблицы 5.2, вариантов для коэффициентов A_{0ki} и B_{0ki} по четыре. Всех вариантов – 12, их и подставляем в уравнение (5.21).

Результат по величине каждого x_k выбирается из полученных значений, но имея в виду данные по всем остальным факторам x_k . Такой метод называется методом целенаправленного перебора. Выбранные факторы x_k обеспечивают выбор или создание нового технологического процесса. При этом необходимо учитывать возможности имеющегося оборудования. По новым факторам x_k необходимо ставить эксперимент для уточнения избранной математической модели технологического процесса [35].

В итоге, математическая модель критерия коэффициента теплопроводности технологического процесса получения пеностекла состоит из уравнений (5.19–5.24). Поставленную задачу можно формализовать так:

$$\begin{aligned}
 & y_1(x_1, x_2, x_3) \rightarrow \max \\
 \text{при} \left\{ \begin{aligned}
 & y_1 = -3,43 \cdot 10^{-6} x_1 x_2 x_3 + 2,6 \cdot 10^{-3} x_1 x_2 + 1,43 \cdot 10^{-4} x_1 x_3 + 2,56 \cdot 10^{-5} x_2 x_3 - \\
 & 0,11 x_1 - 1,98 \cdot 10^{-2} x_2 - 9,98 \cdot 10^{-4} x_3 + 0,85 \\
 & y_1 \geq y_{1\text{зак}} \\
 & y_{1k} = A_{0k_i} x_k + A_{0k_i}, \quad i \in [1;8], k \in [1;3] \\
 & y_{1\text{зак}} = A_{0k_i} x_k + B_{0k_i}, \quad i \in [1;8], k \in [1;3] \\
 & A_{01i} = A_1 x_2 x_3 + A_2 x_2 + A_3 x_3 + A_5 \\
 & B_{01_i} = A_4 x_2 x_3 + A_6 x_2 + A_7 x_3 + A_8 \\
 & A_{02i} = A_1 x_1 x_3 + A_2 x_1 + A_4 x_3 + A_6 \\
 & B_{02_i} = A_3 x_1 x_3 + A_5 x_1 + A_7 x_3 + A_8 \\
 & A_{03i} = A_1 x_1 x_2 + A_3 x_1 + A_4 x_2 + A_7 \\
 & B_{03_i} = A_2 x_1 x_2 + A_5 x_1 + A_6 x_2 + A_8 \\
 & 3 \leq x_1 \leq 5 \\
 & 30 \leq x_2 \leq 60 \\
 & 750 \leq x_3 \leq 850
 \end{aligned} \right. \quad (5.25)
 \end{aligned}$$

Полученная математическая модель (5.25) описывает процесс нахождения экстремальных значений заданных функций или значений, заданных заказчиком. Решение выдает несколько возможных вариантов значений переменных. Они интересны в том случае, если рассматриваются 2 критерия и больше. Тогда для каждого критерия задача решается этим же методом, и сопоставляются точки совпадений значений с заданием заказчика. Если точки не совпадают друг с другом, применяем метод компромисса – проводим согласование с заказчиком, и задача решена [28].

Аналогичным методом строим математическую модель критерия плотности.

5.3.2. Построение математической модели критерия плотности сырьевой смеси для получения пеностекла

По аналогии с критерием коэффициент теплопроводности функция отклика описывается уравнением многочлена из всех возможных произведений x_k :

$$y_2 = C_1 x_1 x_2 x_3 + C_2 x_1 x_2 + C_3 x_1 x_3 + C_4 x_2 x_3 + C_5 x_1 + C_6 x_2 + C_7 x_3 + C_8 \left. \vphantom{y_2} \right\} \quad (5.26)$$

$$n \in [1;8], x_1 = (a_1 \text{ или } b_1), x_2 = (a_2 \text{ или } b_2), x_3 = (a_3 \text{ или } b_3)$$

где C_1-C_8 , – коэффициенты, определяемые экспериментально, a_1-a_3 – нижний уровень варьирования факторов; b_1-b_3 – верхний уровень варьирования факторов.

На основании таблицы 5.2 мы вновь получаем систему из 8 линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов C_1-C_8 .

$$\left. \begin{aligned} 255000C_1 + 300C_2 + 4250C_3 + 51000C_4 + 5C_5 + 60C_6 + 850C_7 + C_8 &= 290 \\ 153000C_1 + 180C_2 + 2550C_3 + 51000C_4 + 3C_5 + 60C_6 + 850C_7 + C_8 &= 340 \\ 127500C_1 + 150C_2 + 4250C_3 + 25500C_4 + 5C_5 + 30C_6 + 850C_7 + C_8 &= 231 \\ 76500C_1 + 90C_2 + 2550C_3 + 25500C_4 + 3C_5 + 30C_6 + 850C_7 + C_8 &= 229 \\ 225000C_1 + 300C_2 + 3750C_3 + 45000C_4 + 5C_5 + 60C_6 + 750C_7 + C_8 &= 190 \\ 135000C_1 + 180C_2 + 2250C_3 + 45000C_4 + 3C_5 + 60C_6 + 750C_7 + C_8 &= 214 \\ 112500C_1 + 150C_2 + 3750C_3 + 22500C_4 + 5C_5 + 30C_6 + 750C_7 + C_8 &= 243 \\ 67500C_1 + 90C_2 + 2250C_3 + 22500C_4 + 3C_5 + 30C_6 + 750C_7 + C_8 &= 261 \end{aligned} \right\} \quad (5.27)$$

Решая систему уравнений (5.27), получаем значения коэффициентов C_1-C_8 (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Результаты определения коэффициентов C_1-C_8

Коэффициент	Численное значение
C_1	$-8,99 \times 10^{-3}$
C_2	6,65
C_3	0,370
C_4	0,0796
C_5	-283
C_6	-61,0
C_7	-3,01
C_8	$2,58 \times 10^3$

Согласно таблице 5.4 многочлен произведений (5.26) принимает вид:

$$y_2 = -8,99 \cdot 10^{-3} x_1 x_2 x_3 + 6,65 x_1 x_2 + 0,37 x_1 x_3 + 0,07 x_2 x_3 + 283 x_1 - 61 x_2 - 3,01 x_3 + 2,58 \cdot 10^3 \left. \vphantom{y_2} \right\} \quad (5.28)$$

Аналогично критерию коэффициента теплопроводности формализуем математическую модель критерия плотности в процессе получения пеностекла:

$$\begin{aligned}
 & y_2(x_1, x_2, x_3) \rightarrow \min \\
 \text{при} \left\{ \begin{aligned}
 & y_2 = -8,99 \cdot 10^{-3} x_1 x_2 x_3 + 6,65 x_1 x_2 + 0,37 x_1 x_3 + 0,07 x_2 x_3 - \\
 & 283 x_1 - 61 x_2 - 3,01 x_3 + 2,58 \cdot 10^3 \\
 & y_2 \geq y_{2\text{зак}} \\
 & y_{2k} = C_{0k_i} x_k + D_{0k_i}, \quad i \in [1;8], k \in [1;3] \\
 & y_{2\text{зак}} = C_{0k_i} x_k + D_{0k_i}, \quad i \in [1;8], k \in [1;3] \\
 & C_{01i} = C_1 x_2 x_3 + C_2 x_2 + C_3 x_3 + C_5 \\
 & D_{01_i} = C_4 x_2 x_3 + C_6 x_2 + C_7 x_3 + C_8 \\
 & C_{02i} = C_1 x_1 x_3 + C_2 x_1 + C_4 x_3 + C_6 \\
 & D_{02_i} = C_3 x_1 x_3 + C_5 x_1 + C_7 x_3 + C_8 \\
 & C_{03i} = C_1 x_1 x_2 + C_3 x_1 + C_4 x_2 + C_7 \\
 & D_{03_i} = C_2 x_1 x_2 + C_5 x_1 + C_6 x_2 + C_8 \\
 & 3 \leq x_1 \leq 5 \\
 & 30 \leq x_2 \leq 60 \\
 & 750 \leq x_3 \leq 850
 \end{aligned} \right. \quad (5.29)
 \end{aligned}$$

5.4. Экономические критерии производства изделий из пеностекла и оценка их конкурентоспособности

В ходе экспериментальных исследований по разработанной математической модели нами был определен рациональный технологический режим получения пеностекла.

Однако, используя математическую модель расчета температурных полей в пеностекле, нами предложено применить циклические режимы нагрева (рисунок 5.6).

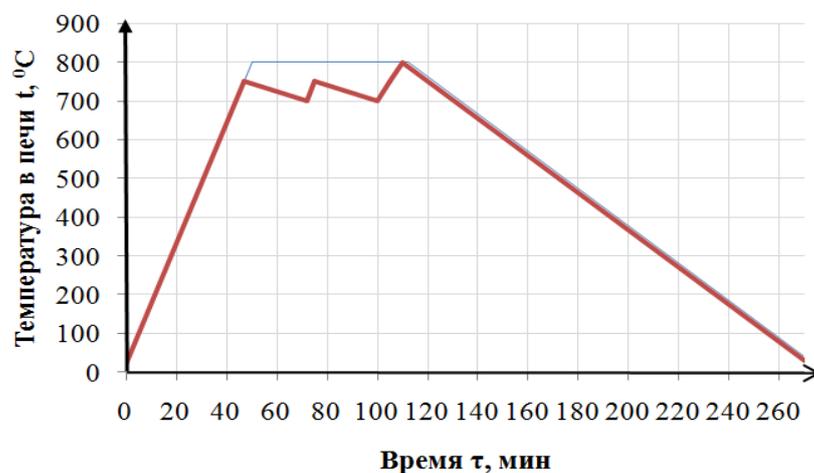


Рисунок 5.6 – Оптимальный температурный режим получения пеностекла

Согласно проведенным расчетам по ранее полученному уравнению (3.41) установлены промежутки времени, при которых реализуется равномерный нагрев центра и поверхности сырьевой смеси. На рисунках 5.7–5.8 показаны расчетные температурные поля в соответствии с температурными режимами, указанными на рисунке 5.6.

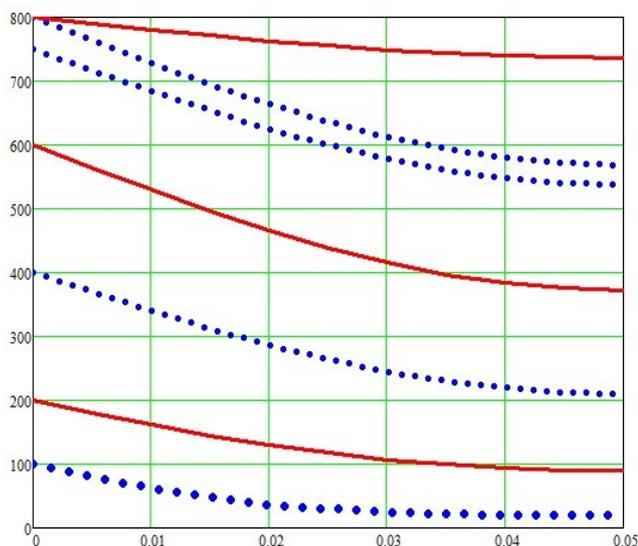


Рисунок 5.7 – Расчетные значения температурных полей в сырьевой смеси

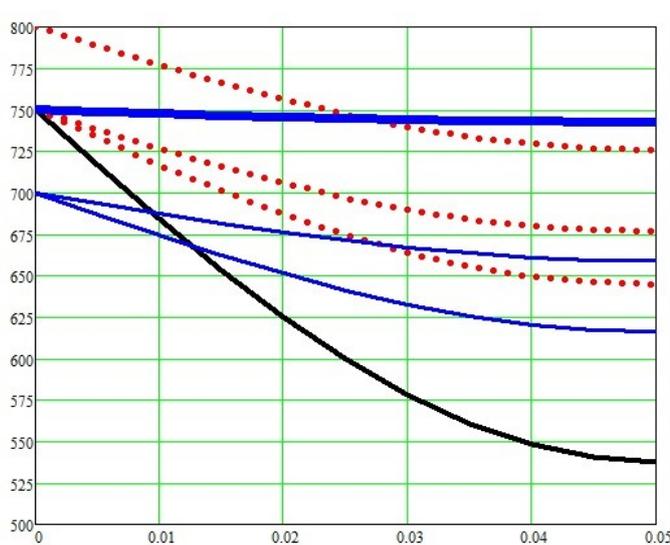


Рисунок 5.8 – Расчетные значения температурных полей в сырьевой смеси

Рассчитанный оптимальный температурный режим позволяет в течение 60 минут отключать печь для вспенивания и использовать эти промежутки времени при выравнивании температурных полей в сырьевой смеси (рисунок 5.6), что в конечном итоге позволяет получать материал со свойствами не хуже, чем при режиме, когда осуществляется непрерывная работа печи для вспенивания (рисунок 5.4).

Рассчитаем энергозатраты для обоих вариантов. Согласно техническим характеристикам, указанным заводом-изготовителем, ТЭНы печи потребляют 3 кВт·ч, а стоимость одного киловатта электроэнергии 4,5 руб [82].

При первом варианте происходит нагрев в течение 45 минут, в это время печь работает на полную мощность и потребляет 3 кВт·ч, затем в течение 60 минут происходит поддержание температурного режима в печи на отметке 750 °С, при этом печь работает лишь на треть мощности и потребляет 1 кВт·ч. В общем мы затратим 3,25 кВт, что составит 14,63 руб. на весь процесс.

При втором варианте происходит нагрев в течение 45 минут, затем отключение печи на 10 минут, после чего опять происходит нагрев в течение 5 минут, отключение на 10 минут, и последний цикл нагрева длится 10 минут. В общем мы получаем, что печь работает на полную мощность в течение 60 минут и затрачивает 3 кВт электроэнергии, что составит 13,5 руб. на весь процесс.

В совокупности мы сэкономим 1,13 руб. с производства пеностекла объемом $8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ (размер формы для экспериментальных исследований $10 \cdot 10 \cdot 8$). При пересчете на 1 м^3 пеностекла затраты на электроэнергию будут снижены на 1412,5 руб. по предложенному циклическому варианту технологического процесса.

Однако в реальном технологическом процессе производства пеностекла используются печи, работающие на природном газе. Произведем перерасчет возможного экономического эффекта для реального производства.

Состав магистрального природного газа зависит от месторождения, т. е. состава смеси газов, поэтому среднее значение низшей теплоты сгорания природного газа $Q_n=31-40 \text{ МДж/м}^3$. Удельная теплота сгорания 1 м^3 метана 34 МДж/м^3 , с учетом КПД печи (92 %) получаем $31,3 \text{ МДж/м}^3$.

Известно, что $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3\,600\,000 \text{ Дж} = 3,6 \text{ МДж}$. Для первого варианта нашего технологического процесса, как мы посчитали ранее, потребуется 3,25 кВт или 11,7 МДж, что равняется $0,37 \text{ м}^3$ газа. По второму варианту потребуется 3 кВт или 10,8 МДж, что равняется $0,35 \text{ м}^3$ газа. Получаем, что мы сможем сэкономить $0,02 \text{ м}^3$ при производстве $0,0008 \text{ м}^3$ пеностекла. Согласно [83] стоимость 1 м^3 газа составляет 5,1 руб. При пересчете на 1 м^3 получаем, что экономический эффект составит 127,5 руб. с одного 1 м^3 производимого пеностекла по предложенному нами циклическому варианту нагрева.

При мощностях производства, например, $100\,000 \text{ м}^3$ в год [152], экономический эффект составит 12 750 000 руб.

5.5. Выводы по главе 5

1. Определены оптимальные технологические режимы получения пеностекла, и рассмотрено влияние технологических параметров на формирование конечных свойств готового материала. По результатам экспериментальных исследований установлено, что для получения пеностекла с показателями теплопроводности $0,061 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и плотностью 190 кг/м^3 необходимо учитывать следующие технологические параметры: нагрев сырьевой смеси для получения пеностекла производить в течение 45 минут до температуры $750 \text{ }^\circ\text{C}$ и вспенивать в течение 60 минут.

2. Для оптимизации технологического процесса получения блочного пеностекла было использовано трехфакторное математическое планирование в трех уровнях. Определены наиболее значимые для технологии получения пеностекла параметры, которые заключались в процентном отношении газообразователя от всего объема сырьевой смеси (%), времени термической обработки при вспенивании сырьевой смеси (мин.), температурном режиме термообработки ($^\circ\text{C}$). Критериями качества готового материала были определены показатели теплопроводности ($\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$) и плотности пеностекла (кг/м^3).

3. Предложено технологическое решение для режима высокотемпературной термической обработки в виде циклического подвода тепла к сырьевой смеси для получения пеностекла, что обеспечит экономию денежных ресурсов и, как следствие, уменьшит себестоимость готовой продукции.

4. Проведенный технико-экономический расчет показал, что по предложенным нами циклическим режимам нагрева сырьевой смеси экономический эффект может составить $127,5 \text{ руб.}$ с одного 1 м^3 производимого пеностекла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены следующие результаты, определяющие научную новизну работы и ее практическую значимость:

1. Проведенный анализ литературных источников показал, что основной проблемой производства блочного пеностекла является отсутствие возможности регулировать качество готового материала. Для решения этой проблемы требуется разработка механизмов управления технологическими параметрами на основе подтвержденных исследователями математических моделей. Расчет рациональных параметров процесса высокотемпературной обработки пеностекла является многофакторной задачей, и одним из малоизученных аспектов этого процесса является учет динамики изменения профиля температуры и изменения радиуса пор в условиях воздействия высоких температур, а также фазовых превращений в сырьевой смеси для получения пеностекла.

2. По результатам проведенных исследований сформулированы физическая и математическая модели теплопереноса в сырьевой смеси, учитывающие особенности распределения температурных полей на участках контакта «металлическая форма – сырьевая смесь». Основу модели расчета температурных полей составили дифференциальные уравнения нестационарной теплопроводности параболического типа с начальными и граничными условиями. Соответствующая задача теплопроводности позволяет рассчитать оптимальный температурный режим в технологии пеностекла путем моделирования температурных полей в толще сырьевой смеси с учетом фазовых превращений в расплаве стекла и оценить влияние воздействия температуры на макрофизические свойства пеностекла, а также учесть влияние их изменения на проведение процедуры расчетов.

3. Усовершенствован технологический процесс режима термической обработки сырьевой смеси и подобран в необходимом процентом соотношении его состав для получения теплоизоляционного материала на основе измельченного листового стекла с плотностью – $190\text{--}340 \text{ кг/м}^3$ и коэффициентом теплопроводности – $0,061\text{--}0,099 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

4. Расчетным путем исследована динамика роста радиуса поры при высокотемпературной термической обработке пеностекла. Установлено, что радиус поры начинает равномерно расти при достижении в камере печи температур порядка $630\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Вместе с тем, изменение температуры до значений равных, $730\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, способствует росту радиуса пор на показатели, равные $1\cdot 10^{-4} \text{ м}$. При температурах выше значений $730\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ начинается активация процесса оплавления частиц стекла, при этом концентрация и

давление газообразователя становятся достаточными для того, чтобы преодолеть силы поверхностного натяжения, и радиус поры начинает расти. При достижении показателей температуры порядка 930 ± 10 °С радиус поры увеличивается до размеров $2 \div 2,5$ мм, после чего рост радиуса поры замедляется и в последующем останавливается.

5. Экспериментальное исследование процесса самопроизвольного остывания блока пеностекла, целью которого ставилась проверка адекватности полученной математической модели термообработки пеностекла, показало хорошую сходимость результатов моделирования и практических измерений динамики показателей температуры в блоке пеностекла. Расчетные значения температур в точках контроля находятся в области допустимых значений экспериментальных данных.

6. Впервые показано позитивное влияние периодического подвода тепловой энергии при термической обработке на процессы структурообразования в пеностекле под действием циклических тепловых воздействий. Газовая фаза, выделяемая газообразователем, при наступлении термической деструкции равномерно формирует пористую структуру материала, в то же время силы поверхностного натяжения стеклянных стенок пор и высокая вязкость расплава стекла не дает выделившимся газам поступать в камеру печи, что способствует формированию равномерно распределенных пор по всему объему материала, а также повышает макрофизические показатели материала.

7. Разработан вычислительный алгоритм аналитической обработки и визуализации распределения температурных полей в пеностекле при различных режимах термической обработки, реализованный в виде программы на языках HTML, CSS, Java Script. Программа прошла регистрацию в государственном реестре программ для ЭВМ.

8. Экономическая эффективность предложенного способа циклического подвода тепла к сырьевой смеси пеностекла, по сравнению с актуальными технологиями термической обработки (до 127,5 руб. с одного 1 м^3 производимого пеностекла), обусловлена минимизацией затрат на энергоресурсы для циклов высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси за счет сокращения периодов подвода тепла к материалу. Апробация полученных результатов экспериментальных исследований осуществлялась на предприятии ОАО «Компания «СТЭС-Владимир». На базе предприятия был оптимизирован существующий режим вспенивания и отжига брутто-блоков пеностекла НЕОПОРМ®.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер. – Москва: Металлургия, 1969. – 159 с. – Текст : непосредственный.
2. Алексеев, С. В. Совершенствование процесса отжига высокопористых материалов на основе стекла : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.17.11 / С. В. Алексеев. – Белгород : Белгород. гос. технол. акад. строит. материалов (БелГТАСМ), 2002. – 16 с. – Текст : непосредственный.
3. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие для хим.–технол. спец. вузов / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – 2 е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 1985. – 327 с. – Текст : непосредственный.
4. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – Москва : Высшая школа, 1978. – 319 с. – Текст : непосредственный.
5. Бахвалов, Н. С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения) / Н. С. Бахвалов. – Москва : Наука, 1975. – 632 с. – Текст : непосредственный.
6. Беляев, Н. М. Методы теории теплопроводности: учебное пособие для вузов. Ч. 2 / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – Москва : Высш. шк. 1982. – 304 с. – Текст : непосредственный.
7. Беляков, А. В. Локальные уплотнения при спекании керамики и воспроизводимость структуры / А. В. Беляков, Е. А. Брыгина. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 1998. – №10. – С.10–13.
8. Бессмертный, В. С. Ангобирование стеновой керамики методом плазменного напыления / В. С. Бессмертный, Н. М. Паршин, А. А. Ляшко. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 2000. – №2. – С. 23–25.
9. Бирюков, В. А. Отходы стекла – экология, информация, бизнес / В. А. Бирюков. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 1998. – №2. – С. 39.
10. Бирюков, В. В. Практическое руководство по применению методов планирования эксперимента для поиска оптимальных условий в многофакторных процессах / В. В. Бирюков. – Рига: Зинтыс, 1969. – 225 с. – Текст : непосредственный.
11. Блиничев, В. Н. Современные тенденции создания энерго- и ресурсосберегающего оборудования в химической промышленности / В. Н. Блиничев. – Текст : непосредственный // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2018. – № 4 (56). – С. 11–14.

12. Блиничев, В. Н. Моделирование термического разложения сферической частицы / В. Н. Блиничев, Г. А. Зуева, И. В. Постникова. – Текст : непосредственный// Теоретические основы химической технологии. – 1999. – Т. 33. – № 3. – С. 323–327.
13. Болотин, В. Н. Стеклобой. Вторая жизнь / В. Н. Болотин, Н. И. Минько.– Текст : непосредственный // Стекло мира. – 1997. – №4. – С. 57–62.
14. Бутт, Л. М. Полляк В.В. Технология стекла. М.: Стройиздат, 1971. – 368. –Текст : непосредственный.
15. Вайсман, Я. И. Научные и технологические аспекты производства пеностекла / Я. И. Вайсман, А. А. Кетов, П. А. Кетов. – Текст : непосредственный// Физика и химия стекла. – 2015. – Т.41. – №2. – С. 214–221.
16. Влияние структуры керамики на прочностные характеристики керамического кирпича / А. И. Христофоров, И. А. Христофорова, Е. С. Пикалов, С. В. Кутровская. – Текст : непосредственный// Строительство и реконструкция. – 2011. – № 4 (36). – С. 63–68.
17. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико–экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – Москва : Статистика, 1974. – 192 с. –Текст : непосредственный.
18. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – 2–е изд., перераб. и доп. – Москва : Финансы и статистика, 1981. – 263 с. – Текст : непосредственный.
19. Вознесенский, В. А. Статистические решения в технологических задачах / В. А. Вознесенский.–Кишинев:Изд–во «Картя молдовеняскэ», 1969. – 232 с. – Текст : непосредственный.
20. Горлов, Ю. П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий: учебник для вузов по спец. «Производство строительных изделий и конструкций» / Ю. П. Горлов. – Москва : Высшая школа, 1989. – 384 с. – Текст : непосредственный.
21. Горлов, Ю. П. Технология теплоизоляционных материалов: учебник для вузов / Ю. П. Горлов, А. П. Меркин, А. А. Устенко. – Москва :Стройиздат, 1980. – 399 с. – Текст : непосредственный.
22. Городов, Р. В. Математическая модель процесса нагрева шихты при производстве пеностекла / Р. В. Городов, А. В. Кузьмин. – Текст : непосредственный// Современные техника и технологии: Труды XIV Междунар. научно–практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2008. – Т.3. – С. 356–359.

23. Городов, Р. В. Экспериментальное определение зависимости температуропроводности пеностекольной шихты от температуры / Р. В. Городов. – Текст : непосредственный// Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т.314. – №4. – С. 33–37.

24. Горяйнов, Н. Э. Технология производства полимерных и теплоизоляционных изделий / Н. Э. Горяйнов, К. Н. Дубеницкий. – Москва : Стройиздат, 1975. – 296 с. – Текст : непосредственный.

25. ГОСТ 17177–94. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1996. – Текст : непосредственный.

26. ГОСТ 33949–2016. Изделия из пеностекла теплоизоляционные для зданий и сооружений. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2017. – Текст : непосредственный.

27. ГОСТ 7076–99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. – Москва : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. – Текст : непосредственный.

28. Грахов, В.П. Проектное управление развитием качества строительных материалов : монография / В.П. Грахов, О.В. Титова, К.Л. Домнина. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2016. – 112 с.– Текст : непосредственный.

29. Дворкин, Л. И. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Москва : Инфра–Инженерия, 2017. – 386 с. – Текст : непосредственный.

30. Демидович, Б. К. Пеностекло – технология и применение / Б. К. Демидович, Н. П. Садченко. – Москва, 1990. – 45 с. – Текст : непосредственный.

31. Демидович, Б. К. Пеностекло / Б. К. Демидович. – Минск: Наука и техника, 1975. – 248 с. – Текст : непосредственный.

32. Демидович, Б. К. Производство и применение пеностекла / Б. К. Демидович. – Минск: Наука и техника, 1975. – 203 с.– Текст : непосредственный.

33. Демин, А. М. Математическая модель термической обработки сырца при получении пеностекла : специальность : 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Демин Антон Михайлович. – Санкт–Петербург, 2013. – 16 с.– Место защиты: Петерб. гос. ун–т путей сообщ. – Текст : непосредственный.

34. Диффузионные процессы при обжиге виллемитовой глазури на кварцевой стеклокерамике / Н.В. Рудковская, Н.Ю. Михайленко, С.Б. Лисиненкова, Ю.М. Левин. – Текст : непосредственный// Стекло и керамика. – 2003. – №7. – С. 28–30.

35. Домнина, К.Л. Основы алгоритма оптимизации структуры теплоизоляционных пористых материалов / К.Л. Домнина, М.Н. Каракулов – Текст : непосредственный // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2017. – №1. – С. 108-110.

36. Дудеров, И. Г. Общая технология силикатов / И. Г. Дудеров, Г. М. Матвеева, В. Б. Суханова. – Москва :Стройиздат, 1987. – 560 с. – Текст : непосредственный.

37. Евстропьев, К. К. Диффузионные процессы в стекле / К. К. Евстропьев. – Ленинград :Стройиздат, 1970. –168 с. – Текст : непосредственный.

38. К вопросу описания процесса сушки полимеров уравнением молекулярной диффузии / А. М. Климов, С. П. Рудобашта, В. М. Нечаев, Ю. А. Тепляков. – Текст : непосредственный// Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19. – № 2. – С. 334–338.

39. Канаев, А. Ю. Теплоизоляционные пеноалюмосиликаты / А. Ю. Канаев, И. А. Христофорова, А. И. Христофоров. – Текст : непосредственный//Строительство и реконструкция. – 2013. – № 1 (45). – С. 76–80.

40. Канаев, А. Ю. Теплоизоляционный пеноалюмосиликат, модифицированный отходами металлургической промышленности / А. Ю. Канаев, И. А. Христофорова, А. И. Христофоров. – Текст : непосредственный//Строительство и реконструкция. – 2012. – № 1 (39). – С. 69–73.

41. Кешишян Т.Н. О режиме отжига пеностекольных изделий / Т. Н. Кешишян. – Текст : непосредственный // Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева. – 1952. – № 17. – С. 118–122.

42. Кешишян, Т. Н. К вопросу об образовании ячеистой и губчатой структуры в пористой стекломассе (пеностекле) / Т. Н. Кешишян. – Текст : непосредственный // Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева. – 1949. – № 13. – С. 97–104.

43. Кешишян, Т. Н. Спекание и отжиг пеностекла / Т. Н. Кешишян. – Текст : непосредственный // Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева. – 1949. – № 15. – С. 152–155.

44. Китайгородский, И. И. Пеностекло / И. И. Китайгородский,

Т. Н. Кешишян. –Москва :Промстройиздат, 1953. – 80 с. – Текст : непосредственный.

45. Китайгородский, И. И. Технология стекла / И. И. Китайгородский. – Москва : Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 621 с. – Текст : непосредственный.

46. Китайгородский, И. И. Пеностекло / И. И. Китайгородский, П. И. Кешишян. –Москва :Промстройиздат, 1953. – 132 с. – Текст : непосредственный.

47. Кишмерер, И. С. Теплоизоляция в промышленности и строительстве (перевод с немецкого) / И. С. Кишмерер; под ред. и с предисловием Л.Ф. Янкелева. –Москва :Госстройиздат, 1965. – 379 с. – Текст : непосредственный.

48. Корень, Л. И. Адезитобазальты Приморского края, как сырье для получения литых и пористых материалов / Л. И. Корень, Е. П. Ожигов. – Текст : непосредственный// Изв. Сибирского отделения АН СССР. – 1960. – № 7. – С.45–52.

49. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. –Москва : Высшая школа, 1967. – 600 с. – Текст : непосредственный.

50. Лыков, А. В. Явление переноса в капиллярно–пористых телах / А. В. Лыков. –Москва :Стройиздат, 1954. – 298 с. – Текст : непосредственный.

51. Мазурин, О. В. Исследование структурного гистерезиса в некоторых многокомпонентных стеклах дилатометрическим методом / О. В. Мазурин, В. П. Ключев. – Текст : непосредственный // Физика и химия стекла. – 1975. – Т. 1. – № 3. – С. 245–251.

52. Мазурин, О. В. Стеклование и стабилизация неорганических стекол / О. В. Мазурин. – Ленинград : Наука, 1978. – 62 с. – Текст : непосредственный.

53. Математическая модель динамики процесса порообразования при термической обработке пеностекольной шихты / С. В. Федосов, М. О. Баканов, А. В. Волков [и др.]. – Текст : непосредственный// Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2014. – Т.57. – Вып.3. – С. 73–79.

54. Мелконян, Р. К. Аморфные горные породы и стекловарение / Р. К. Мелконян. –Москва :Изд–во НИА–Природа, 2002. – 262 с. – Текст : непосредственный.

55. Меньшова, В. Н. Экономика химической промышленности / В. Н. Меньшова, И. Л. Тобелко. – Москва : Химия, 1982. – 303 с. – Текст : непосредственный.

56. Рудобашта, С. П. Нестационарная тепло– и массоотдача у поверхности пластины / С. П. Рудобашта, Э. М. Карташов, М. К. Кошелева. –

Текст : непосредственный// Тепловые процессы в технике. – 2017. – Т. 9. – № 7. – С. 305–310.

57. Патент № 2114797 Российская Федерация, МПК6 С 03С 11/00. Способ получения пористых стекломатериалов из металлургических шлаков / Павлов В. Ф., Баякин С. Г., Шабанов В. Ф.; патентообладатели Павлов В. Ф., Баякин С. Г., Шабанов В. Ф. – № 96104012/03; заявл. 28.02.1996;опубл. 10.07.1998. – 5 с.– Текст : непосредственный.

58. Патент № 2132306 Российская Федерация, МПК7 С 03С 11/00. Способ получения пористых стекломатериалов из мартеновских шлаков / Павлов В. Ф.; патентообладатель Павлов В. Ф. – № 98113904/03; заявл. 20.07.1998;опубл. 27.06.1999. – 4 с.– Текст : непосредственный.

59. Патент № 2146234 Российская Федерация, МПК7 С 03С 11/00. Способ получения пористых стекломатериалов из нефелиновых шламов / Павлов В. Ф., Погодаев А. М., Прошкин А. В., Моисеенко В. И., Симурин А. Ф., Шабанов В. Ф.; патентообладатель Павлов В. Ф. – № 97115688/03; заявл. 23.09.1997;опубл. 10.03.2000. – 5 с.– Текст : непосредственный.

60. Патент № 2164898 Российская Федерация, МПК7 С 03С 11/00. Состав для получения пеностекла / Дамдинова Д. Р., Цыремпилов А. Д., Константинова К. К.; заявитель и патентообладатель Восточно–Сибирский государственный технологический университет. – № 99109233/03;заявл. 19.04.1999;опубл. 10.04.2001. – 7 с. – Текст : непосредственный.

61. Патент № 2192397 Российская Федерация, МПК7 С 03С 11/00, С 04 В 5/06. Способ получения пористых стекломатериалов из шлаков / Шабанов В. Ф., Павлов В. Ф., Павлов И. В., Павлова Н. А. ;Опубл. 10.11.2002. – 5 с.– Текст : непосредственный.

62. Патент № 2246457 Российская Федерация, МПК7 С 03С 11/00. Шихта для получения пеностекольного облицовочного материала / КалининВ. Т., Макаров В. Н., Суворова О. В., Макаров Д. В., Кулькова Н. М.; патентообладатель Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН. – № 2003118339/03;заявл. 17.06.2003;опубл. 20.02.2005, Бюл. №5. – 7 с.– Текст : непосредственный.

63. Патент № 2255057 Российская Федерация, МПК7 С 03С 11/00, С 03 В 19/08. Способ получения сырьевой смеси для производства пеностекла / Леонидов В. З., Дудко М. П., Зиновьев А. А.; патентообладатели Леонидов В. З., Дудко М. П., Зиновьев А. А. – № 2003133693/03; заявл. 20.11.2003;опубл. 27.06.2005, Бюл. № 18. – 7 с.– Текст : непосредственный.

64. Патент № 2255058 Российская Федерация, МПК7 С 03С 11/00, С 03 В 19/08. Способ получения шихты для производства пеностекла / Леонидов В. З., Дудко М. П., Зиновьев А. А.; патентообладатели Леонидов В. З., Дудко М. П., Зиновьев А. А. – № 2003133694/03; заявл. 20.11.2003;опубл. 27.06.2005, Бюл. № 18. – 6 с. – Текст : непосредственный.

65. Патент № 2255059 Российская Федерация, МПК7 С 03С 11/00, С 03 В 19/08. Способ получения пеностекла / Леонидов В. З., Дудко М. П., Зиновьев А. А.; патентообладатели Леонидов В. З., Дудко М. П., Зиновьев А. А. – № 2003133695/03; заявл. 20.11.2003;опубл. 27.06.2005, Бюл. № 18. – 7 с.– Текст : непосредственный.

66. Патент № 2255060 Российская Федерация, МПК7 С 03С 11/00, С 03 В 19/08. Способ получения пеностекла / Леонидов В. З., Дудко М. П., Зиновьев А. А.; патентообладатели Леонидов В. З., Дудко М. П., Зиновьев А. А.– № 2003134604/03; заявл. 01.12.2003;опубл. 27.06.2005, Бюл. № 18. – 7 с.– Текст : непосредственный.

67. Патент № 2291125 Российская Федерация, МПК7 С 03С 11/00. Шихта для получения пеностекла / Баранов Е. В., Шелковникова Т. И., Гавриленков А. М., Матющенко И. Н., Желтухина А. А., Никулина Е. Ю.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Воронежский государственный архитектурно–строительный университет. – № 2004138531/03;заявл. 28.12.2004 ;опубл. 10.01.2007, Бюл. № 1. – 4 с.– Текст : непосредственный.

68. Патент № 2326841 Российская Федерация, МПК7 С 03С 11/00. Способ получения гранулята для производства пеностекла и пеностеклокристаллических материалов / Абияка А. Н., Верещагин В. И., Казьмина О. В.; заявитель и патентообладатель ООО «Сибирский силикатный центр», ГОУ ВПО Томский политехнический университет. – № 2006108607/03;заявл. 20.03.2006;опубл. 20.06.2008, Бюл. № 17. – 4 с.– Текст : непосредственный.

69. Патент № 2357933 Российская Федерация, МПК С 03С 11/00. Шихта для получения пеностекла / Архипов А. А., Лотов В. А., Власов В. В.– № 2007118340/03;заявл. 16.05.2007;опубл. 27.11.2008, Бюл. № 16. – 10 с.– Текст : непосредственный.

70. Патент № 2368574 Российская Федерация, МПК С 03С 11/00. Сырьевая смесь для изготовления пеносиликата / Лобов О. И., Эпп А. А., Иваненко В. И., Филаретов А. А. – № 2008136712/12;заявл. 15.09.08;опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27. – 8 с.: ил. – Текст : непосредственный.

71. Патент № 2374191 Российская Федерация, МПК С 03С 11/00. Способ изготовления пеностеклокерамики / Апкарьян А. С., Абакумов Е. П., Христюков В. Г.; патентообладатели Апкарьян А. С., Христюков В. Г. –

№ 2006145164/03; заявл. 18.12.2006; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33. – 10 с. – Текст : непосредственный.

72. Патент № 2405743 Российская Федерация, МПК С 03С 11/00. Сырьевая смесь для получения пеносиликатного материала и способ изготовления пеносиликатного материала (варианты) / Казанцева Л. К., Овчаренко Г. И.; патентообладатель Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН (ИГМСО РАН). – № 2009135366/03; заявл. 22.09.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34. – 11 с. – Текст : непосредственный.

73. Патент № 2411200 Российская Федерация, МПК7 С 03 С 11/00, С 03 В 19/08. Сырьевая смесь для изготовления пеностекла / Щепочкина Ю. А.; заявитель и патентообладатель Щепочкина Ю. А. – № 2009133710/03; заявл. 8.09.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 4 с. – Текст : непосредственный.

74. Патент № 2424997 Российская Федерация, МПК С03С 11/00. Способ получения гранулированного пеносиликата PENOSTЕК / Егоров В. В., Родин С. Б., Родин С. С.; патентообладатель ЗАО «СТИКЛОПОРАС» (ЛТ). – № 2009133384/03; заявл. 07.09.2009; опубл. 27.07.2011, Бюл. № 21. – 10 с. – Текст : непосредственный.

75. Патент № 2427545 Российская Федерация, МПК С03С 11/00. Сырьевая смесь для изготовления пеностекла / Щепочкина Ю. А.; патентообладатель Щепочкина Ю. А. – № 2010103822/03; заявл. 04.02.2010; опубл. 27.08.2011, Бюл. № 24. – 3 с. – Текст : непосредственный.

76. Патент № 2430040 Российская Федерация, МПК С03С 11/00. Сырьевая смесь для изготовления ячеистого стекла / Щепочкина Ю. А.; патентообладатель Щепочкина Ю. А. – № 2010117892/03; заявл. 04.05.2010; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 27. – 3 с. – Текст : непосредственный.

77. Патент № 2459769 Российская Федерация, МПК С03В 19/08, С03С 11/00. Способ производства пеностекла / Зайцев М. П., Лоскутов В. И.; патентообладатели Зайцев М. П., Лоскутов В. И. – № 2010139445/03; заявл. 24.09.2010; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 9. – 9 с. – Текст : непосредственный.

78. Патент № 2470879 Российская Федерация, МПК С03С 11/00. Пеностекло на основе шлака ТЭС / Смолий В. А., Яценко Е. А., Косарев А. С.; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)». – № 2011117712/03; заявл. 03.05.2011; опубл. 27.12.2012, Бюл. № 36. – 6 с. – Текст : непосредственный.

79. Патент № 2478586 Российская Федерация, МПК С03С 11/00, С03В 19/08. Способ получения теплоизоляционного материала и шихта для его

изготовления / Лотов В. А., Кутугин В. А.; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2011128253/03; заявл. 07.07.2011; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10. – 6 с. – Текст : непосредственный.

80. Пеностекло – современный эффективный неорганический теплоизоляционный материал / Н. И. Минько, О.В. Пучка, Е.И. Евтушенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6–4. – С. 849–854.

81. Подлекарева, Е. Г. Исследование процессов получения плотных и пористых строительных материалов из базальтов Зыковского месторождения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Е. Г. Подлекарева. – Красноярск, 1969.

82. Постановление Департамента энергетики и тарифов Ивановской области №240–э/1 от 21.12.2018 «О тарифах на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Ивановской области на 2019 год».

83. Постановление Департамента энергетики и тарифов Ивановской области от 20 июня 2019 г. № 21–г/1 О розничных ценах на природный газ, реализуемый населению Ивановской области.

84. Применение стеклобоя различного химического состава для производства пеностекла / К. К. Эйдукавичус В.Р. Мацейкене, В. В. Балкявичюс [и др.]. – Текст : непосредственный // Стекло мира. – 2004. – №3. – С. 12–15.

85. Пыльник, Э. В. Получение теплоизоляционных изделий из расплавов минерального сырья и отходов промышленности / Э. В. Пыльник, Ф. М. Оруджев, С. А. Куприянова. – Текст : непосредственный // Сборник тр. «Азгоспроекта». – Баку, 1982. – Вып. 42. – С.56–58.

86. Романков, П. Г. Теплообменные процессы химической технологии / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов. – Ленинград : Химия, 1982. – 288 с. – Текст : непосредственный.

87. Рудобашта, С. П. Ресурсо– и энергосбережение в промышленных технологиях / С. П. Рудобашта. – Текст : непосредственный // Современные задачи инженерных наук: сборник пленарных докладов Международного научно–технического Форума «Первые международные Косыгинские чтения». – Москва, 2017. – С. 33–41.

88. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – Москва, 1980. – 248 с. – Текст : непосредственный.

89. Рудобашта, С. П. Математический расчет процессов сушки / С. П. Рудобашта. – Текст : непосредственный// Доклады ТСХА : Сборник статей. – Москва : Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. – С. 530–534.

90. Рудобашта, С. П. Математическое моделирование процесса сушки материала в аппарате с псевдоожиженным слоем /С. П. Рудобашта, Г. А. Зуева. – Текст : непосредственный// Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2019. – Т. 8. – С. 77–80.

91. Рудобашта, С. П. Определение кинетических коэффициентов по кривым кинетики процессов термовлажностной обработки материалов / С. П. Рудобашта, М. К. Кошелева. – Текст : непосредственный//Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности : сборник научных трудов Международной научно–технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского. – Москва : ФГБОУ ВО «Московский государственный университет дизайна и технологии», 2016. – С. 27–31.

92. Рудобашта, С. П. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики /С. П. Рудобашта, М. К. Кошелева. – Текст : непосредственный// Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 6 (360). – С. 175–180.

93. Рудобашта, С. П. Влияние топологии тела на его массопроводность / С. П. Рудобашта, Э. М. Карташов, Г. А. Зуева. – Текст : непосредственный// Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92. – № 4. – С. 927–935.

94. Саакян, Э. Р. Ячеистые стекла из осадочных кремнеземистых пород / Э. Р. Саакян. – Текст : непосредственный// Стекло и керамика. – 1981. – № 3. – С.3–4.

95. Саакян, Э. Р., Дарбинян М.В. Дилатометрические исследования спекания камня / Э. Р. Саакян, М. В. Дарбинян. – Текст : непосредственный// Неорганические материалы. – 1970. – Т. 6. – № 6. – С.1161–1164.

96. Сангадиев, С. Ш. Определение параметров уравнения Фогеля–Фульчера–Таммана для температурной зависимости вязкости в области перехода жидкость–стекло / С. Ш. Сангадиев, С. Б. Мункуева, Д. С. Сандитов. – Текст : непосредственный// Вестник бурятского государственного университета. – 2009. – № 3. –С. 153–156.

97. Сбор, переработка и направления использования отходов стекла / С. В. Дуденков, В. Ф. Кроткова, Е. С. Гендлина, Д. К. Портнойн. – Текст :непосредственный // Обзорная информация. Серия: Рацион, использ. материальных ресурсов. –Москва : ЦНИИТЭИМС, 1978. – 47 с.

98. Семейных, Н. С. Анализ использования различных сырьевых компонентов в производстве гранулированного пеностекла / Н. С. Семейных, Г. В. Сопегин. – Текст : непосредственный// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8. – № 1. – С. 60–74.

99. Семенов, А. О. Модель мониторинга и управления при ликвидации крупных пожаров : монография / А. О. Семенов, М. О. Баканов, Д. В. Тараканов. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – 128 с.– Текст : непосредственный.

100. Сигаев, В. Н. Использование горных пород для получения пеностекла / В. Н. Сигаев, Б. Е. Жакипбаев, Ю. А. Спиридонов. – Текст : непосредственный// Стекло и керамика. – 2013. – №4. – С. 47–50.

101. Смирнова, Л. Б. Гранулированное пеностекло из боя стекла / Л. Б. Смирнова. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 1990. – №12. – С. 22–23.

102. Современные теплоизоляционные материалы на стройках России / В. И. Белан, А. А. Быков, И. В. Белан, В. К. Кинебас. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. Наука. – 2005. – № 5. – С. 18–19.

103. СП 112.13330.2011 «СНиП 21–01–97* Пожарная безопасность зданий и сооружений». – Москва : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2002.– Текст : непосредственный.

104. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23–02–2003 (с Изменением №1). – Москва : Минрегион России, 2012. – Текст : непосредственный.

105. Спиридонов, Ю. А., Орлова Л.А. Проблемы получения пеностекла / Ю. А. Спиридонов, Л. А. Орлова. – Текст : непосредственный// Стекло и керамика. – 2003. – №10. – С. 10–11.

106. Стешенко, А. Б. Модифицированный теплоизоляционный пенобетон с пониженной усадкой : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Б. Стешенко. – Томск, 2015. – 189 с. – Текст : непосредственный.

107. Таганцев, Д. К. Стеклообразные материалы: учебное пособие / Д. К. Таганцев. – Санкт-Петербург : Изд-во политехн. ун-та, 2010. – 204 с. – Текст : непосредственный.

108. Топольский, Н. Г. Теоретические основы поддержки управления пожарными подразделениями на основе мониторинга динамики пожара в здании: монография/ Н. Г. Топольский, Д. В. Тараканов, К. А. Михайлов ; под

общ. ред. д–ратехн. наук, проф. Н.Г. Топольского. – Москва :Академия ГПС МЧС России, 2019. –320 с. – Текст : непосредственный.

109. Файнер, Ф. Ш. Введение в математическое моделирование технологии бетона / Ф. Ш. Файнер. – Львов:Изд–во «Свит», 1993. – 240 с. – Текст : непосредственный.

110. Факторович, Л. М. Тепловая изоляция. Справочное руководство / Л. М. Факторович. –Ленинград : Недра, 1966. – 456 с.– Текст : непосредственный.

111. Федосов, С. В. Вариативность подходов к математическому моделированию процессов термической обработки пеностекольной шихты / С. В. Федосов, М. О. Баканов, С. Н. Никишов. – Текст : непосредственный// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова:научно–теоретический журнал. – 2017. – № 11. – С. 110–116.

112. Федосов, С. В. 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 :Св–во регистрации программы ЭВМ№2018661062. Дата регистрации: 31.08.2018 г.– Текст : непосредственный.

113. Федосов, С. В. Разработка комплексного подхода к математическому моделированию процесса термической обработки пеностекольной шихты. Ч. 1. Физические представления о процессе / С. В. Федосов, М. О. Баканов. – Текст : непосредственный// Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – №2. – С. 95–100.

114. Федосов, С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии : монография / С. В. Федосов. – Иваново:ПрессСто, 2010. – 364 с. – Текст : непосредственный.

115. Федосов, С. В. 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 :Св–во регистрации программы ЭВМ№2019614723. Дата регистрации: 10.04.2019 г.– Текст : непосредственный.

116. Христофоров, А. И. Высокоэффективный теплоизоляционный негорючий материал многоцелевого назначения /А. И. Христофоров, Е. В. Лазарев. – Текст : непосредственный// Кровельные и изоляционные материалы. – 2005. – № 2. – С. 20.

117. Христофоров, А. И. Зависимость свойств керамических изделий от состава и технологических параметров / А. И. Христофоров, С. А. Ястребова. –

Текст : непосредственный//Огнеупоры и техническая керамика. – 2006. – № 9. – С. 32–36.

118. Христофоров, А. И. Механизм структурообразования модифицированного мелкозернистого бетона / А. И. Христофоров, И. А. Христофорова, Д. И. Кузьмин. – Текст : непосредственный// Строительство и реконструкция. – 2011. – № 1 (33). – С. 80–84.

119. Христофоров, А. И. Нанокерамика: учеб. пособие в 3 ч. / А. И. Христофоров, Э. П. Сысоев, И. А. Христофорова ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2007. Том Ч. 3. – Текст : непосредственный.

120. Христофоров, А. И. Разработка технологии получения нового ячеистого теплоизоляционного материала / А. И. Христофоров, Д. И. Шаркаев, И. А. Христофорова. – Текст : непосредственный// Огнеупоры и техническая керамика. – 2006. – № 10. – С. 30–32.

121. Христофоров, А. И. Расчет физико-химических свойств стекол : учеб. пособие : [Для студентов всех форм обучения спец. 250800 – Хим. технология тугоплав. неметал. и силикат. материалов] / А. И. Христофоров, И. А. Христофорова; М-во образования Рос. Федерации, Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2004.– Текст : непосредственный.

122. Христофоров, А. И. Улучшение свойств цементно-песчаного бетона путем введения пав и органических веществ в бетонную смесь / А. И. Христофоров, И. А. Христофорова, О. Л. Еропов.– Текст : непосредственный// Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2012. – Т. 17. – № 2. – С. 714–717.

123. Христофоров, А. И. Математическое моделирование композиций для производства керамики / А. И. Христофоров, Е. С. Пикалов. – Текст : непосредственный// Приволжский научный журнал. – 2011. – № 3 (19). – С. 59–63.

124. Христофоров, А. И. Модификация шихты для производства керамики / А. И. Христофоров, Е. С. Пикалов. – Текст : непосредственный// Строительство и реконструкция. – 2010.– № 4 (30). – С. 78–81.

125. Черепанов, Б. С. Особенности образования пористой структуры пенокерамических материалов / Б. С. Черепанов, В. Е. Гонтмахер. – Текст : непосредственный// Промышленность строительных материалов:аналит. обзор ВНИИЭСМ. Сер. Керамическая промышленность. – 1992. – №1. – С. 10–11.

126. Черняк, Я. Н. Некоторые вопросы теории вспучивания легкоплавких глин и пеностекла / Я. Н. Черняк. – Текст : непосредственный// Науч. тр. НИИСтройкерамика. –Москва :Прогмстройиздат, 1958. – Вып. 13. – С. 136–154.

127. Шилл, Ф. Пеностекло / Ф. Шилл. – Москва :Стройиздат, 1965. – 307 с. – Текст : непосредственный.
128. Шпильков, Е. М. Влияние окислов кальция и магния на процесс получения пеностекла из витрофиров/ Е. М. Шпильков, С. Т. Сулейменов, В. Д. Скопина. – Текст : непосредственный//Тр. Института строительства и стройматериалов Академии наук Казахской ССР. –Алма-Ата:Изд-во АН Каз. ССР, 1959. – Т. 2. – С.167–178.
129. Пеностекло: монография / А.И. Шутов, П.А. Воля, В.И. Мосьпан [и др.]. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. – 108 с. – Текст : непосредственный.
130. Эффективные акустические стеклокомпозиты / С. С. Вайсера, О. В. Пучка, В. С. Лесовик [и др.]. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2016. –№6. – С. 28–31.
131. Chmieleński J. Szkloiceramika. – 1949. – №2. – P. 11–12.
132. Domnina, K. Mathematical Model for Improvement of Concrete Quality / K. Domnina, E. Pivarčiová // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 952. – pp. 356-362.
133. Fedosov S. V., Bakanov M. O., Nikishov S. N. Kinetics of Cellular Structure Formation at Thermal Treatment Processes Simulation in the Cellular Glass Technology// Materials Science Forum. 2018. Vol. 931, pp. 628–633.
134. Fedosov S. V., Bakanov M. O., Nikishov S. N. Modeling of Macro-Physical Parameters of Foam Glass under Exposure of Cyclic Thermal Effects// Materials Science Forum. 2019. Vol. 974, pp 464–470.
135. Fedosov S. V., Bakanov M. O., Nikishov S. N. Parametric optimization of the thermal processing of foam glass on basis of heat transfer models // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 044047. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/709/4/044047> (датаобращения 09.01.2020) doi:10.1088/1757-899X/709/4/044047).
136. Fedosov, S. The construction of the function of the ultimate goal of the technological process of non-autoclaved foam concrete obtaining / Sergey Fedosov, KseniaDomnina, Elena Pivarčiová. ActaTecnología – International Scientific Journal about Technologies. Volume 5, issue 3 (2019). pp. 59-62.
137. Köse S. Untersuchungen zur Blähdynamik des Schaumglases. PhD thesis, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Switzerland, 1981.
138. Lakatos T., Johansson L.-G. and Simmingsköld B. Viscosity temperature relation in the glass system SiO₂–Al₂O₃–Na₂O–K₂O–CaO–MgO in the composition range of technical glasses. Glass Technol., 13(3):88–95, 1972.
139. Lord Rayleigh. Oh the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1917. – Vol. 34. –№ 199. –P. 94–98.

140. Lynsvage B. Wirtschaftsnachrichten. Sprechsaal für Keramik, Glass, Email. 1955, № 88, B. 17, P. 383.
141. Nemeč L., Klouzek J. Modelling of glass refining kinetics Part 1. Single bubbles. *Ceramics – Silikáty*, 2003, 1980, Vol. 47 Number 3, pp. 81–87.
142. P. Beyersdorfer. *Glasshüttenkunde*. Leipzig, 1964, pp. 333–337.
143. Pakleza J. Experimental investigation of vapor bubble growth / Pakleza J., M.–c. Duluc, T. Kowalewski. Selected Papers from the Twelfth International Heat Transfer Conference. – Grenoble, 2002. – P. 479–484.
144. Plesset M.S. The dynamics of cavitation bubbles. *Journal of Applied Mechanics*. – 1949. – Vol. 16. – P. 228–231.
145. Postnikova I.V., Blinichev V.N. System approach to calculating processes in the apparatus of combined action. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2014. – Vol. 48. № 3. – P. 241–248.
146. Princen H.M., Aronson M.P., Moser J.C. Highly concentrated emulsions, II. Real systems. The effect of film thickness and contact angle on the volume fraction in creamed emulsions. *J. Colloid. Interface Sci.*, 1980, Vol. 75. Number 1. – P. 246–270.
147. Scholze H. *Glas Natur, Struktur und Eigenschaften*. Springer–Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1988.
148. Steiner A.C. Foam glass production from vitrified municipal waste fly ashes: proefschrift...doctoral degree / A.C. Steiner.– Eindhoven, 2006. – 222 p.
149. Schill F. *Sklár a keramik*, 1960, № 7.
150. Yamada K. Time–evolution of bubble formation in a viscous liquid / K. Yamada, H. Emori, K. Nakazawa. *Earth Planets Space*. – 2008. – Vol. 60. – № 6. – P. 661–679.
151. Zueva G.A., Blinichev V.N., Pokrovskii A.A., Padokhin V.A. Mathematical model of synthetic leather drying // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2002. – Vol. 36. № 4. – P. 365–369.
152. <http://a-stess.com/about/publication/budem-gretsya-penosteklom.html>.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица – Результаты измерения температуры
в различных точках блока пеностекла

Время, мин.	Показания термомпар, °С							
	№1 (-10 см) верх блока	№2 (-2 см) верх блока	№3 (-2 см) торец по длине	№4 (-10 см) верх блока	№5 (-2 см) торец по ширине	№6 (-10 см) верх блока	№7 (-2 см) дно блока	№8 (-2 см) торец по длине
1	597	515	448	591	405	584	454	409
2	599	513	440	596	400	593	432	382
3	599	501	424	598	384	594	413	362
4	598	489	408	598	369	593	397	345
5	596	477	394	597	355	591	383	331
6	594	467	381	595	343	588	371	319
7	591	457	369	593	332	585	360	308
8	588	449	359	591	322	582	350	298
9	584	440	349	588	313	578	342	290
10	580	433	340	585	305	574	334	282
11	576	426	331	581	297	570	327	274
12	571	420	323	577	290	566	321	267
13	567	414	315	573	284	561	315	260
14	562	408	308	569	277	557	309	254
15	557	402	301	565	271	552	304	248
16	552	397	295	560	265	548	300	242
17	547	392	289	556	260	543	295	237
18	542	387	283	551	254	538	290	233
19	537	383	277	546	249	533	286	228
20	533	378	272	541	244	529	282	223
21	527	374	267	536	240	524	278	218
22	522	369	262	531	235	519	274	214
23	517	365	257	526	231	514	271	209
24	513	361	252	521	226	509	267	205
25	508	357	247	516	222	504	264	201
26	503	353	243	511	218	500	261	197
27	498	349	239	505	215	495	257	194
28	493	346	235	500	211	491	254	190
29	489	342	231	496	207	486	251	187
30	484	338	227	491	204	481	248	184
31	480	335	223	486	200	476	246	180

Время, мин.	Показания термопар, °С							
	№1 (-10 см) верх блока	№2 (-2 см) верх блока	№3 (-2 см) торец по длине	№4 (-10 см) верх блока	№5 (-2 см) торец по ширине	№6 (-10 см) верх блока	№7 (-2 см) дно блока	№8 (-2 см) торец по длине
32	475	331	219	481	197	472	243	177
33	471	328	215	476	194	467	240	174
34	466	324	212	472	191	463	237	171
35	462	321	209	467	188	459	235	169
36	458	318	205	462	185	454	232	167
37	454	314	202	458	183	450	230	163
38	449	311	199	453	180	445	227	161
39	445	308	196	449	177	441	225	159
40	441	305	193	445	175	437	222	156
41	437	302	190	440	172	433	220	153
42	433	299	187	436	170	429	218	151
43	430	296	185	432	167	425	215	149
44	426	293	182	428	165	421	213	147
45	422	290	180	424	163	417	211	145
46	418	287	177	420	160	413	209	143
47	415	284	174	416	158	409	206	141
48	411	282	172	412	156	405	204	139
49	407	279	170	408	154	402	202	137
50	404	276	168	404	152	398	200	134
51	400	274	165	401	149	394	198	133
52	397	271	163	397	148	391	196	131
53	394	268	161	393	146	387	194	129
54	390	266	159	390	144	384	193	127
55	387	263	157	386	142	380	191	125
56	384	261	154	383	140	377	189	124
57	380	258	152	379	138	373	187	123
58	377	256	150	376	137	370	185	121
59	374	254	148	372	135	367	183	120
60	371	251	147	369	133	364	182	118
61	368	249	145	366	132	360	180	117
62	365	247	143	363	130	357	178	115
63	362	244	141	359	129	354	176	114
64	359	242	140	356	127	351	175	112
65	356	240	138	353	126	348	173	111
66	353	238	136	350	125	345	171	110
67	350	236	135	347	123	342	170	108

Время, мин.	Показания термопар, °С							
	№1 (-10 см) верх блока	№2 (-2 см) верх блока	№3 (-2 см) торец по длине	№4 (-10 см) верх блока	№5 (-2 см) торец по ширине	№6 (-10 см) верх блока	№7 (-2 см) дно блока	№8 (-2 см) торец по длине
68	347	233	133	344	122	339	168	107
69	345	231	131	341	120	336	167	106
70	342	229	130	338	119	333	165	105
71	339	227	128	335	117	330	164	104
72	336	225	127	332	116	327	162	103
73	334	223	126	329	115	325	161	101
74	331	221	124	326	114	322	159	100
75	328	219	123	324	112	319	158	99
76	326	217	121	321	111	316	156	98
77	323	215	120	318	110	314	155	97
78	321	213	119	315	109	311	153	96
79	318	212	118	313	108	309	152	95
80	316	210	116	310	107	306	151	94
81	313	208	115	307	105	303	149	93
82	311	206	114	305	104	301	148	92
83	308	204	113	302	103	299	147	91
84	306	203	111	300	102	296	145	90
85	303	201	110	297	101	294	144	89
86	301	199	109	295	100	291	143	88
87	299	197	108	292	99	289	142	88
88	297	196	107	290	98	286	140	87
89	294	194	106	288	97	284	139	86
90	292	192	105	285	96	282	138	85
91	290	191	104	283	96	280	137	84
92	288	189	103	281	95	277	136	84
93	285	187	102	278	94	275	134	83
94	283	186	101	276	93	273	133	82
95	281	184	100	274	92	271	132	81
96	279	183	99	272	91	269	131	81
97	277	181	98	270	90	266	130	80
98	275	180	97	267	90	264	129	79
99	273	178	96	265	89	262	128	78
100	271	177	95	263	88	260	127	78
101	269	175	95	261	87	258	126	77
102	267	174	94	259	86	256	125	77
103	265	173	93	257	86	254	124	76

Время, мин.	Показания термодатчиков, °С							
	№1 (-10 см) верх блока	№2 (-2 см) верх блока	№3 (-2 см) торец по длине	№4 (-10 см) верх блока	№5 (-2 см) торец по ширине	№6 (-10 см) верх блока	№7 (-2 см) дно блока	№8 (-2 см) торец по длине
104	263	171	92	255	85	252	123	75
105	261	170	91	253	84	250	122	75
106	259	169	90	251	84	248	121	74
107	257	167	90	249	83	246	120	74
108	255	166	89	247	82	244	119	73
109	253	165	88	245	82	242	118	73
110	251	163	87	243	81	240	117	72
111	250	162	87	241	80	239	116	71
112	248	160	86	239	80	237	115	71
113	246	159	85	237	79	235	114	70
114	244	158	85	236	79	233	114	70
115	242	157	84	234	78	231	113	69
116	241	156	83	232	77	230	112	69
117	239	154	83	230	77	228	111	68
118	237	153	82	228	76	226	110	67
119	236	152	81	227	76	224	109	67
120	234	151	81	225	75	223	109	67
121	232	150	80	223	75	221	108	66
122	230	148	79	221	74	219	107	66
123	229	147	79	220	73	218	106	65
124	227	146	78	218	73	216	105	65
125	226	145	78	216	72	214	105	64
126	224	144	77	215	72	213	104	64
127	222	143	76	213	71	211	103	63
128	221	142	76	211	71	209	102	63
129	219	141	75	210	70	208	102	62
130	218	140	75	208	70	206	101	62
131	216	138	74	207	69	205	100	61
132	214	137	74	205	69	203	99	61
133	213	137	73	204	68	202	99	61
134	212	135	73	202	68	200	98	60
135	210	134	72	200	67	199	97	60
136	209	133	72	199	67	197	97	59
137	207	132	71	197	66	196	96	59
138	206	131	71	196	66	194	95	59
139	204	131	70	195	66	193	95	58

Время, мин.	Показания термодатчиков, °С							
	№1 (-10 см) верх блока	№2 (-2 см) верх блока	№3 (-2 см) торец по длине	№4 (-10 см) верх блока	№5 (-2 см) торец по ширине	№6 (-10 см) верх блока	№7 (-2 см) дно блока	№8 (-2 см) торец по длине
140	203	130	70	193	65	192	94	58
141	201	129	69	192	65	190	93	58
142	200	128	69	190	64	189	93	57
143	199	127	68	189	64	187	92	57
144	197	126	68	187	64	186	92	57
145	196	125	67	186	63	185	91	56
146	195	124	67	185	63	183	90	56
147	193	123	66	183	63	182	90	56
148	192	122	66	182	62	181	89	55
149	191	121	66	181	62	179	89	55
150	189	121	65	179	61	178	88	55
151	188	120	65	178	61	177	87	54
152	187	119	64	177	61	175	87	54
153	186	118	64	175	60	174	86	54
154	184	117	64	174	60	173	86	53
155	183	116	63	173	60	172	85	53
156	182	116	63	171	59	170	85	53
157	180	115	62	170	59	169	84	53
158	179	114	62	169	58	168	84	52
159	178	113	62	168	58	167	83	52
160	177	112	61	166	58	166	83	52
161	176	112	61	165	57	164	82	51
162	174	111	61	164	57	163	81	51
163	173	110	60	163	57	162	81	51
164	172	109	60	162	57	161	81	51
165	171	109	59	160	56	160	80	50
166	170	108	59	159	56	159	79	50
167	169	107	59	158	55	157	79	50
168	167	106	58	157	55	156	79	50
169	166	106	58	156	55	155	78	49
170	165	105	58	155	55	154	78	49
171	164	104	57	153	54	153	77	49
172	163	104	57	152	54	152	77	49
173	162	103	57	151	54	151	76	48
174	161	102	56	150	53	150	76	48
175	160	102	56	149	53	149	75	48

Время, мин.	Показания термодатчиков, °С							
	№1 (-10 см) верх блока	№2 (-2 см) верх блока	№3 (-2 см) торец по длине	№4 (-10 см) верх блока	№5 (-2 см) торец по ширине	№6 (-10 см) верх блока	№7 (-2 см) дно блока	№8 (-2 см) торец по длине
176	159	101	56	148	53	148	75	48
177	157	100	56	147	53	147	75	47
178	156	100	55	146	53	146	74	47
179	155	99	55	145	52	145	74	47
180	154	98	55	144	52	144	73	47
181	153	98	54	143	52	143	73	47
182	152	97	54	142	52	142	72	46
183	151	97	54	141	51	141	72	46
184	150	96	53	140	51	140	72	46
185	149	95	53	139	51	139	71	46
186	148	95	53	138	51	138	71	46
187	147	94	53	137	50	137	70	45
188	146	94	52	136	50	136	70	45
189	145	93	52	135	50	135	70	45
190	144	92	52	134	50	134	69	45
191	143	92	52	133	49	133	69	45
192	142	91	51	132	49	132	69	45
193	141	91	51	131	49	131	68	44

Графики распределения температурных полей
на поверхности блока пеностекла

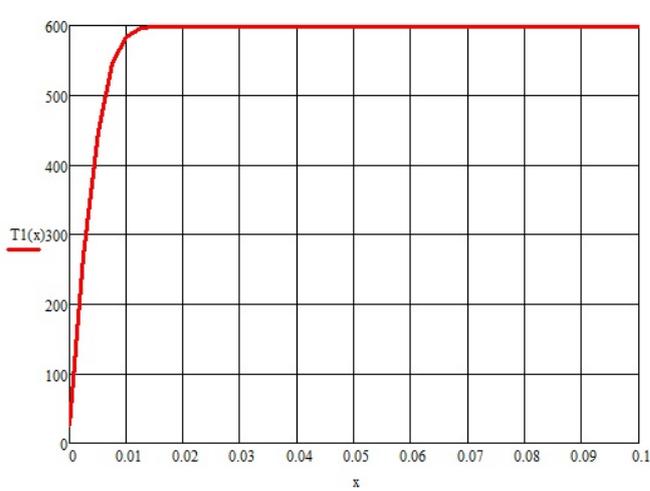


Рисунок 1 – Распределение температур
на момент времени 1 мин.

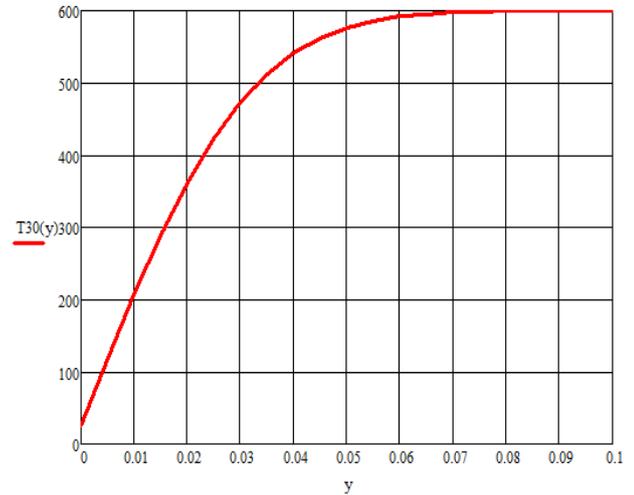


Рисунок 4 – Распределение температур
на момент времени 30 мин.

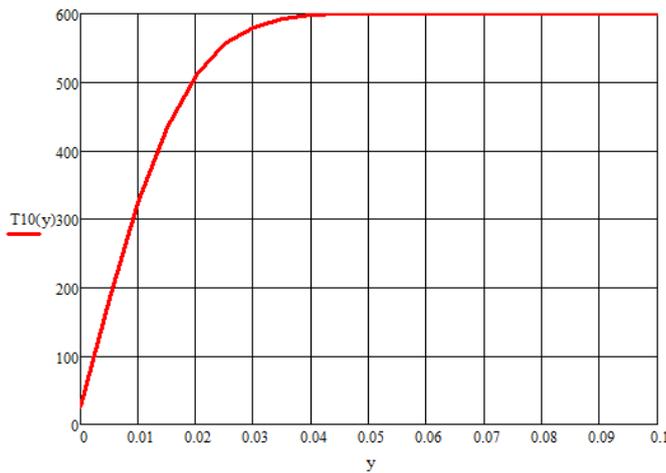


Рисунок 2 – Распределение температур
на момент времени 10 мин.

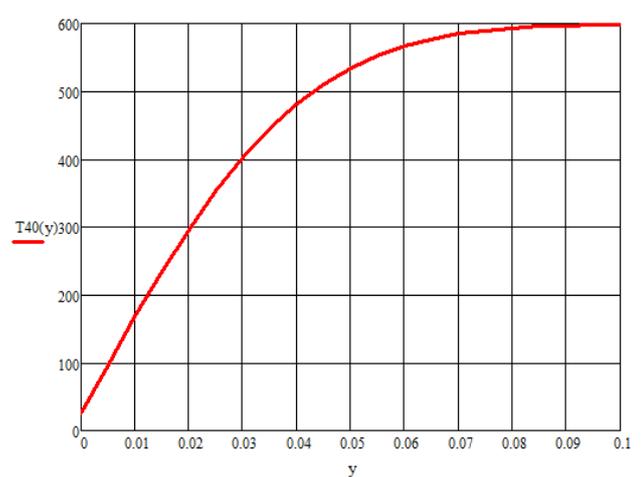


Рисунок 5 – Распределение температур
на момент времени 40 мин.

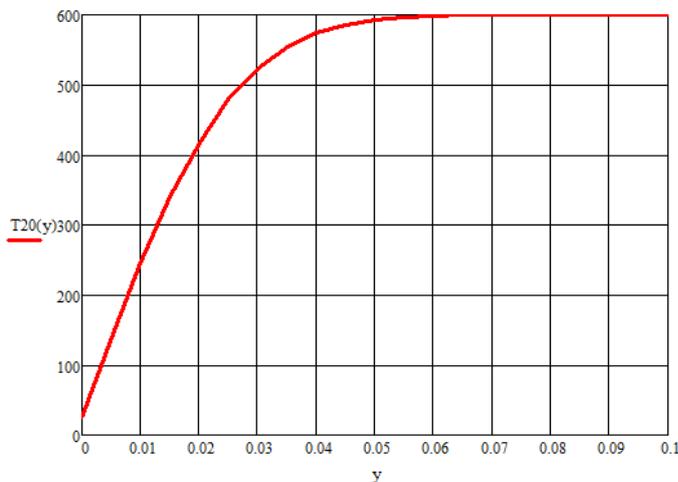


Рисунок 3 – Распределение температур
на момент времени 20 мин.

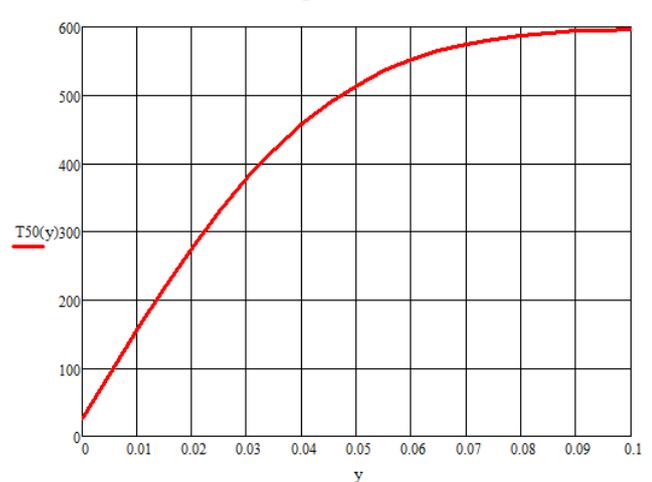


Рисунок 6 – Распределение температур
на момент времени 50 мин.

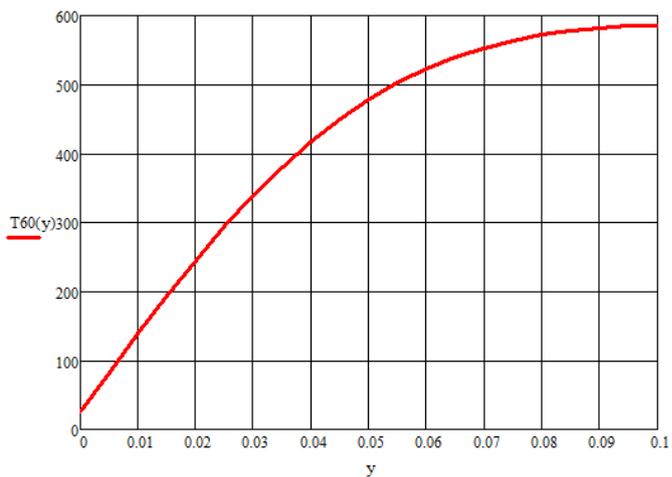


Рисунок 7 – Распределение температур на момент времени 60 мин.

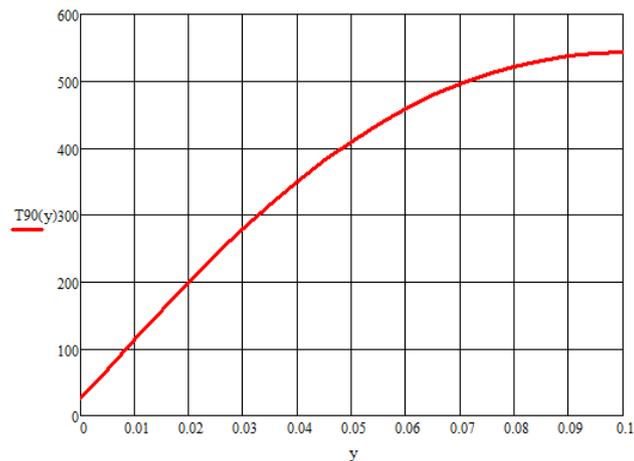


Рисунок 10 – Распределение температур на момент времени 90 мин.

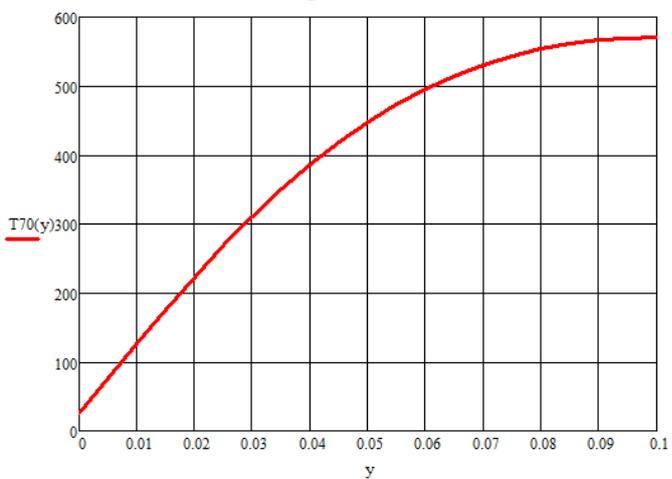


Рисунок 8 – Распределение температур на момент времени 70 мин.

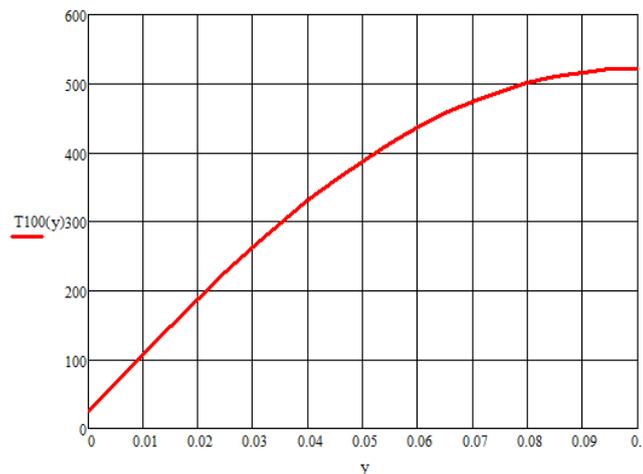


Рисунок 11 – Распределение температур на момент времени 100 мин.

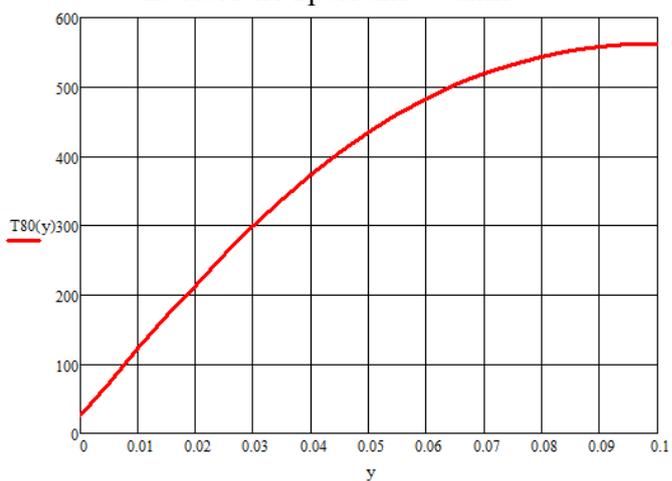


Рисунок 9 – Распределение температур на момент времени 80 мин.

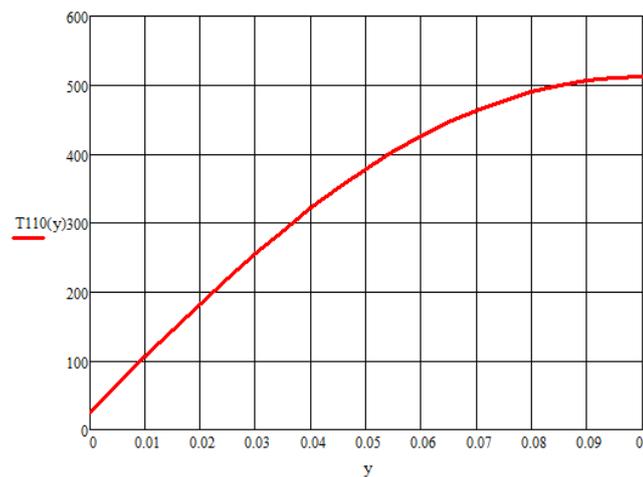


Рисунок 12 – Распределение температур на момент времени 110 мин.

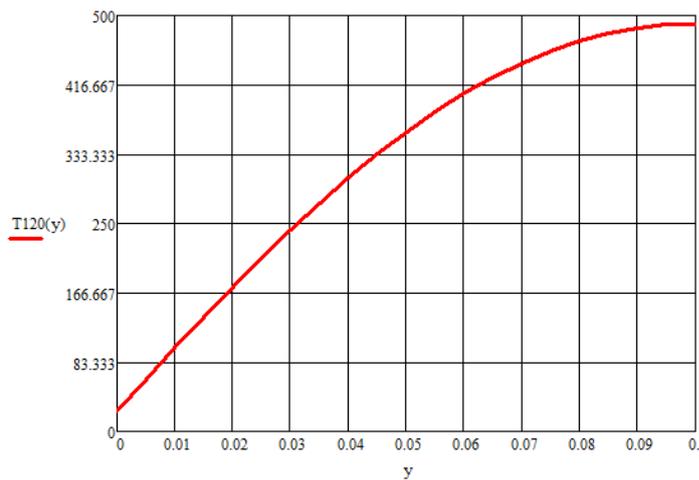


Рисунок 13 – Распределение температур на момент времени 120 мин.

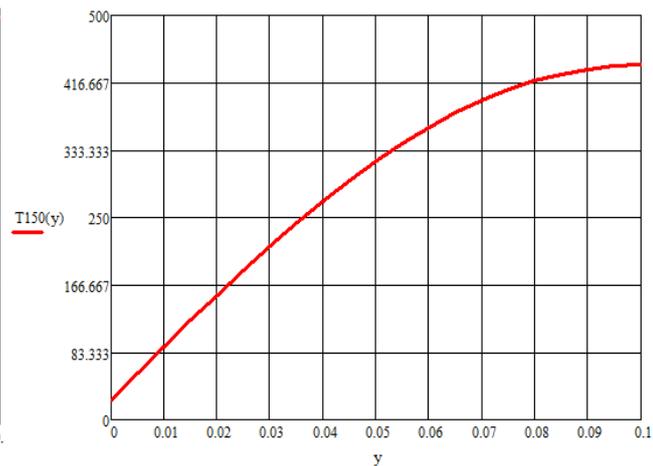


Рисунок 16 – Распределение температур на момент времени 150 мин.

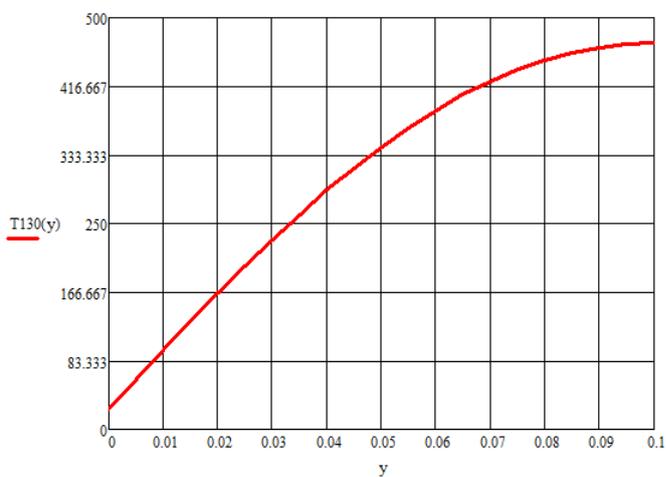


Рисунок 14 – Распределение температур на момент времени 130 мин.

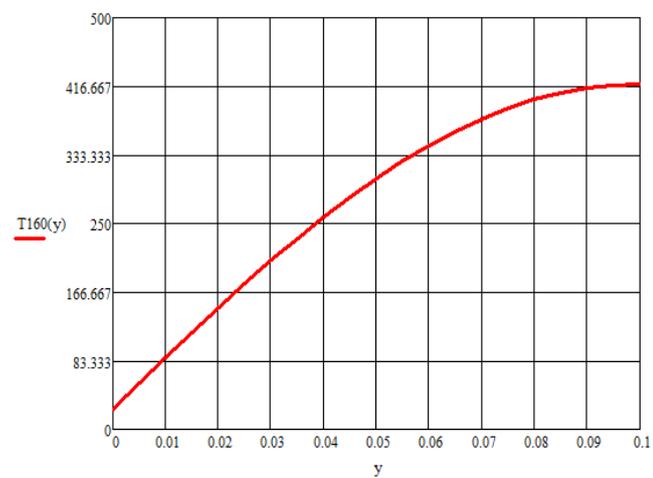


Рисунок 17 – Распределение температур на момент времени 160 мин.

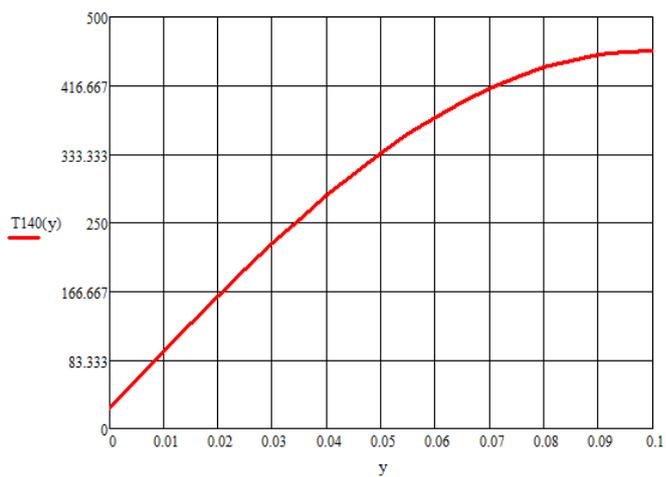


Рисунок 15 – Распределение температур на момент времени 140 мин.

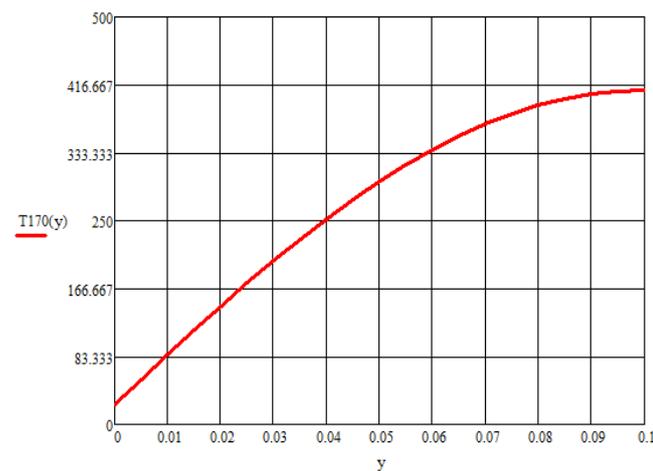


Рисунок 18 – Распределение температур на момент времени 170 мин.

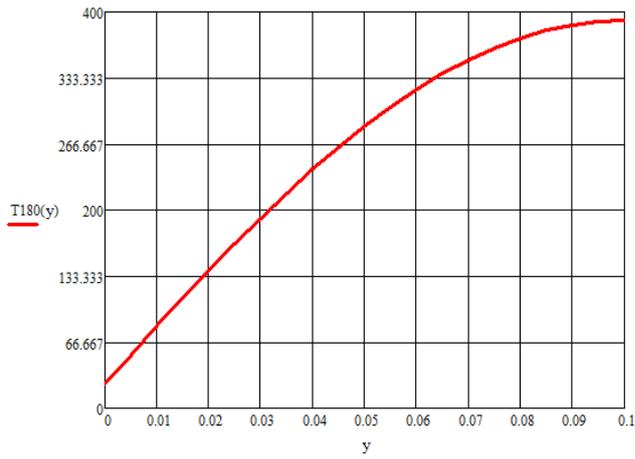


Рисунок 19 – Распределение температур на момент времени 180 мин.

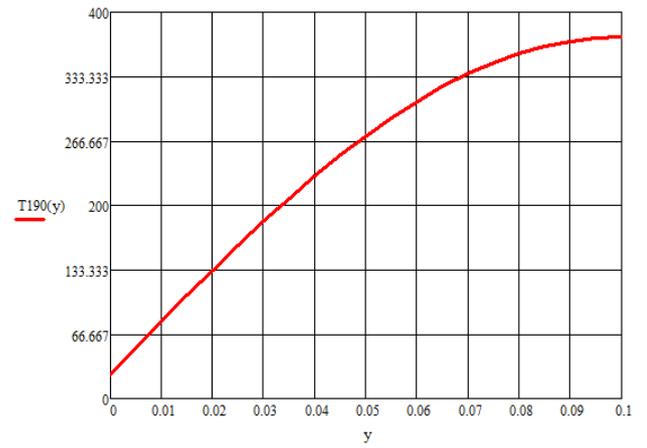


Рисунок 20 – Распределение температур на момент времени 190 мин.

Графики распределения температурных полей в центре блока пеностекла

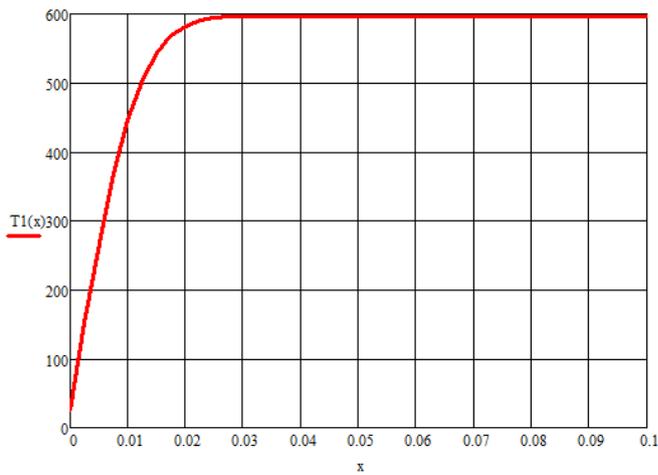


Рисунок 1 – Распределение температур на момент времени 1 мин.

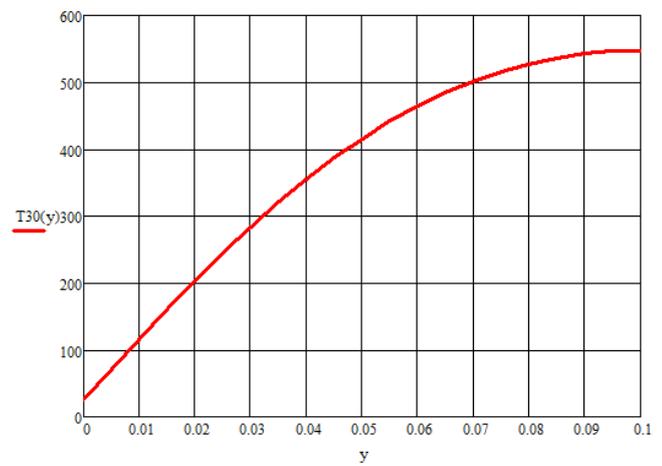


Рисунок 4 – Распределение температур на момент времени 30 мин.

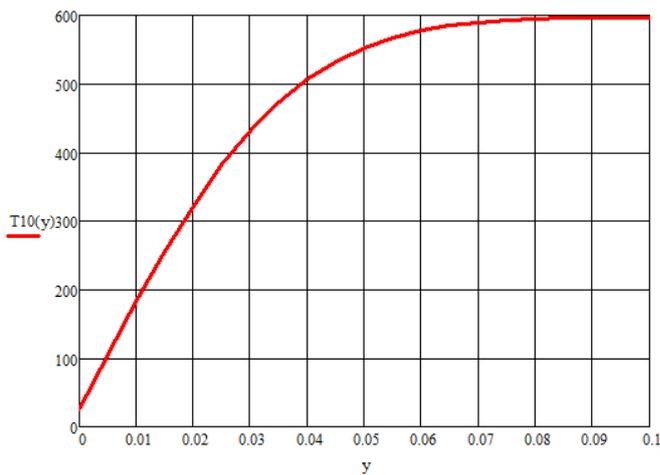


Рисунок 2 – Распределение температур на момент времени 10 мин.

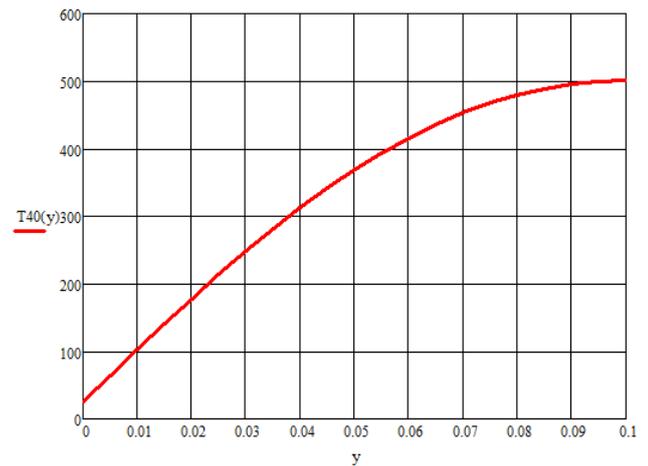


Рисунок 5 – Распределение температур на момент времени 40 мин.

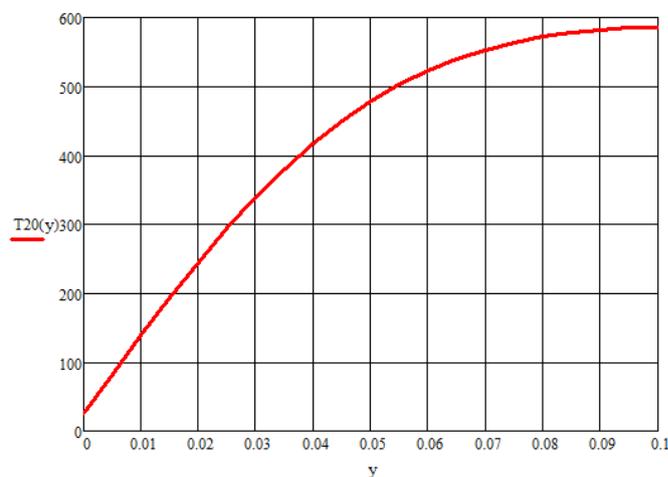


Рисунок 3 – Распределение температур на момент времени 20 мин.

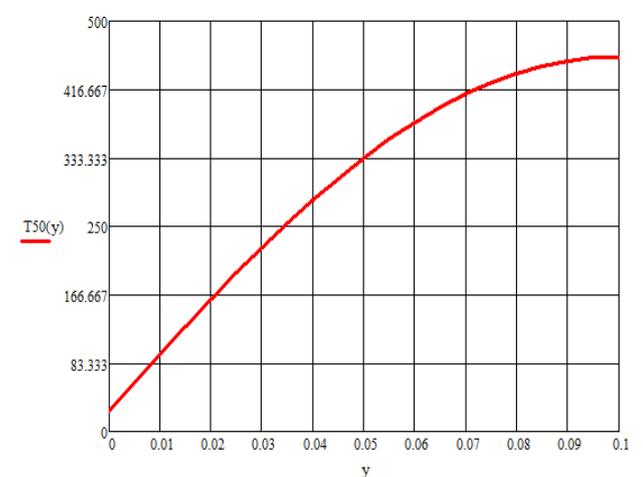


Рисунок 6 – Распределение температур на момент времени 50 мин.

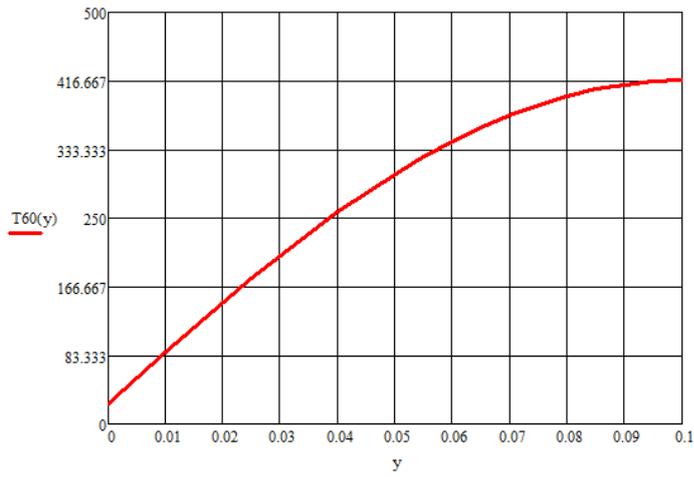


Рисунок 7 – Распределение температур на момент времени 60 мин.

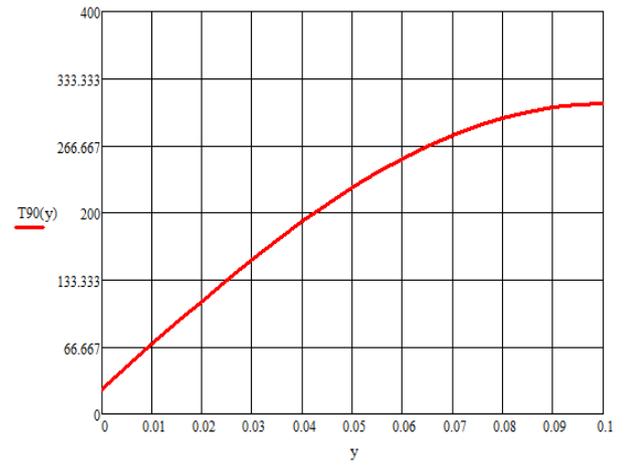


Рисунок 10 – Распределение температур на момент времени 90 мин.

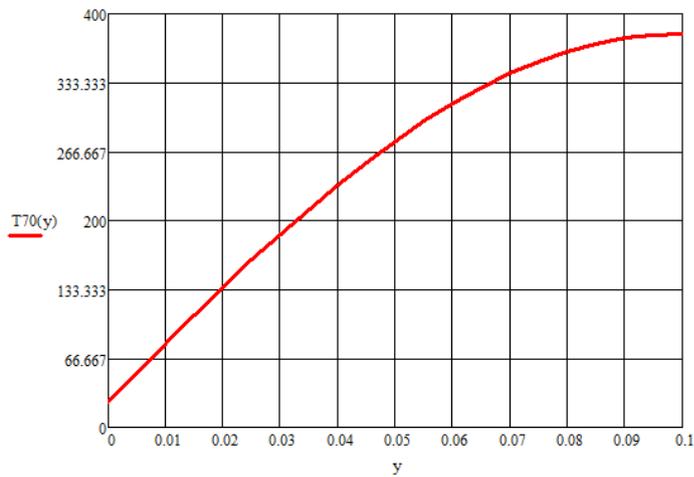


Рисунок 8 Распределение температур на момент времени 70 мин.

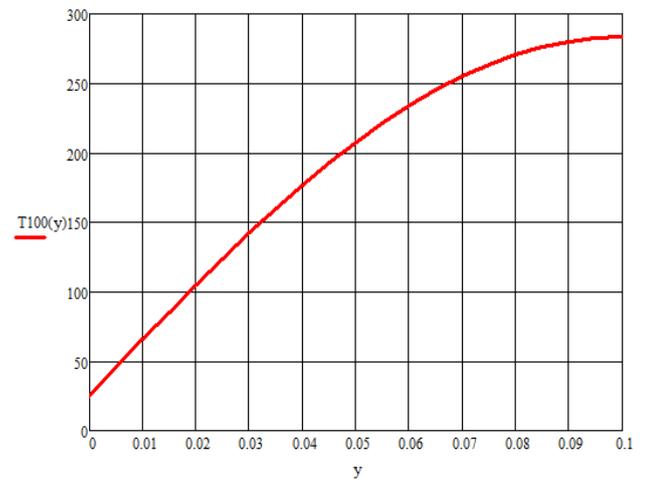


Рисунок 11 Распределение температур на момент времени 100 мин.

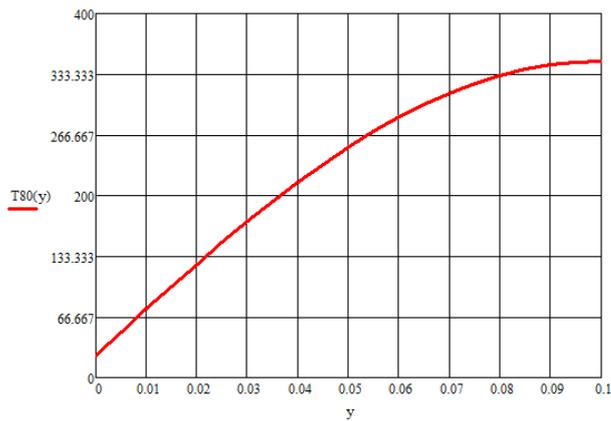


Рисунок 9 – Распределение температур на момент времени 80 мин.

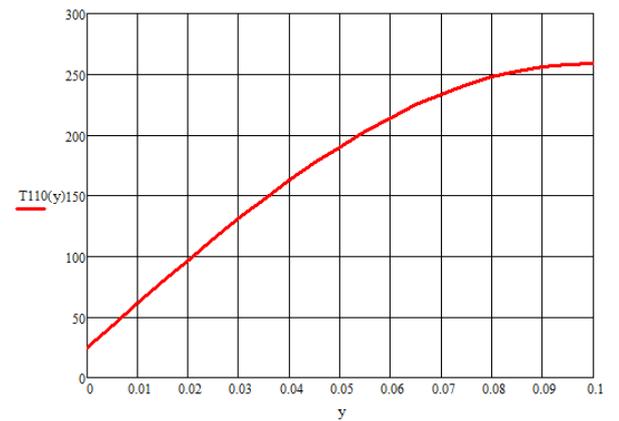


Рисунок 12 – Распределение температур на момент времени 110 мин.

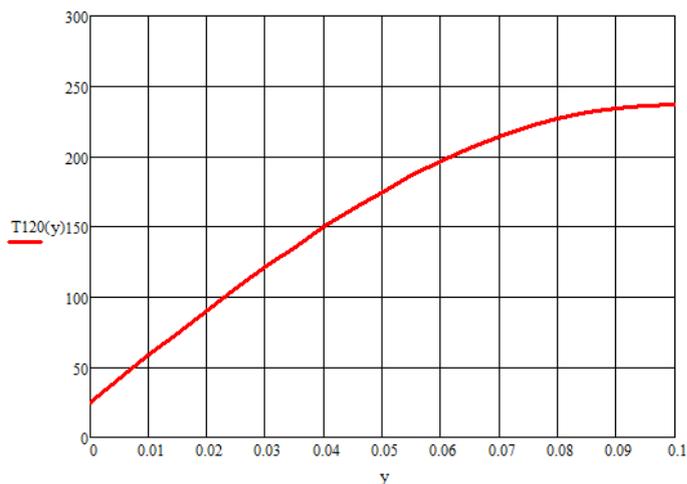


Рисунок 13 – Распределение температур на момент времени 120 мин.

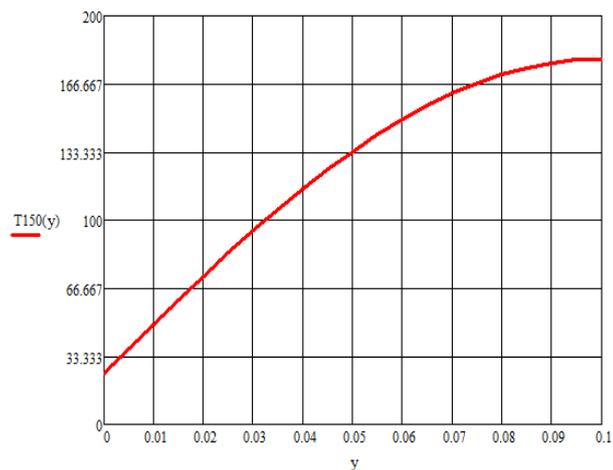


Рисунок 16 – Распределение температур на момент времени 150 мин.

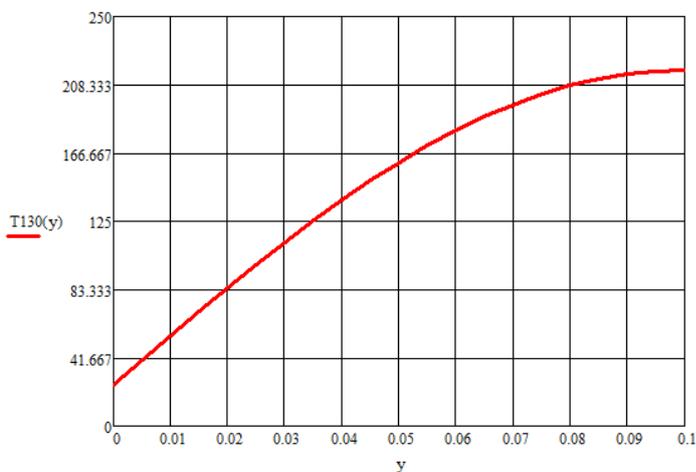


Рисунок 14 – Распределение температур на момент времени 130 мин.

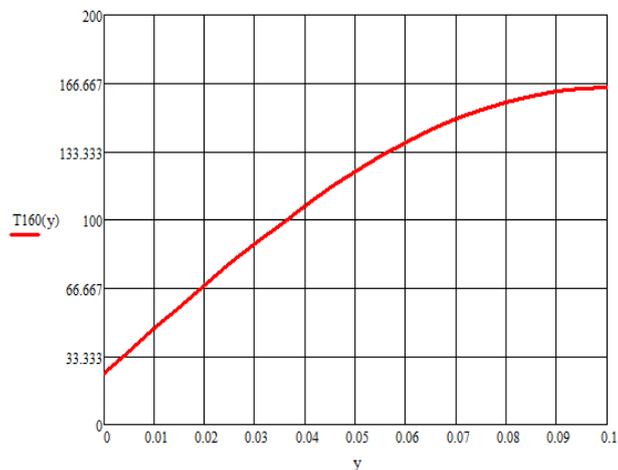


Рисунок 17 – Распределение температур на момент времени 160 мин.

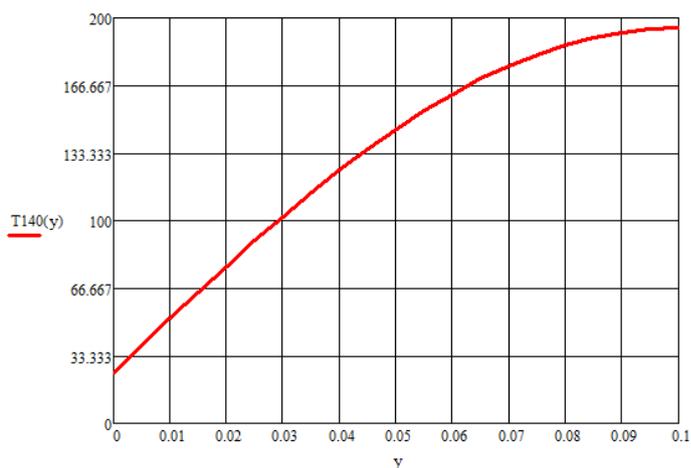


Рисунок 15 – Распределение температур на момент времени 140 мин.

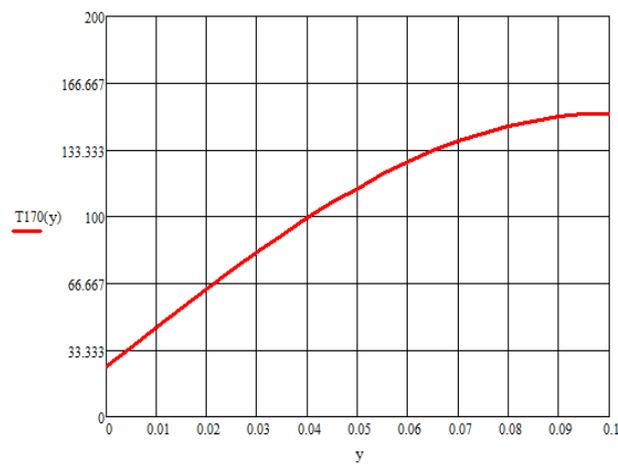


Рисунок 18 – Распределение температур на момент времени 170 мин.

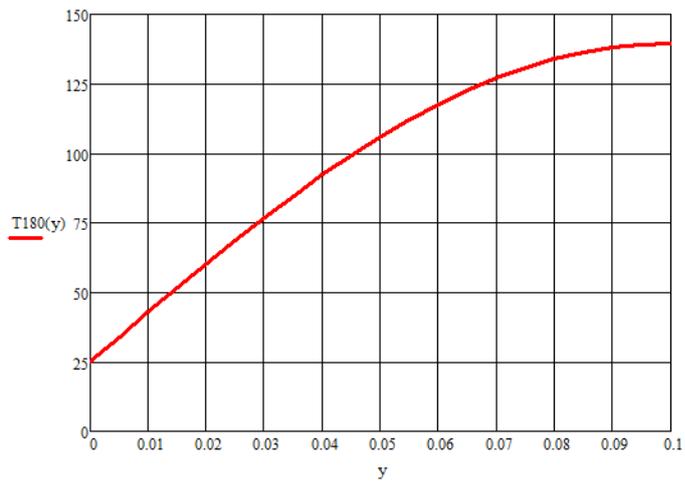


Рисунок 19 – Распределение температур на момент времени 180 мин.

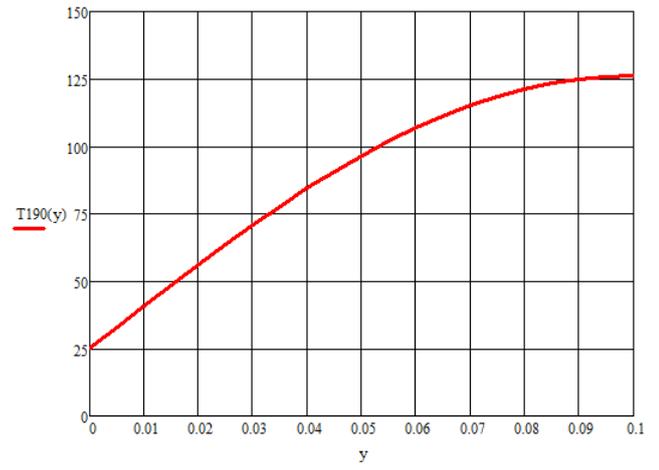


Рисунок 20 – Распределение температур на момент времени 190 мин.



Компания «СТЭС-ВЛАДИМИР»
акционерное общество

600031 Российская Федерация, г. Владимир, ул. Добросельская, д. 216. тел., факс: 8(4922)21-01-42, 21-59-09
Почтовый адрес: 600000 г. Владимир, Главпочтамт, а/я № 59. www.a-stess.com, e-mail: info@a-stess.com

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования

Компания «СТЭС-ВЛАДИМИР» является первым российским предприятием, организовавшим промышленное производство теплоизоляционной продукции из пеностекла. Все стадии производства пеностекла НЕОПОРМ®, включая изготовление и отжиг брутто-блоков пеностекла путём термической обработки, полностью осуществляются на оборудовании Компании «СТЭС-ВЛАДИМИР» по собственной запатентованной технологии. Изделия теплоизоляционные из пеностекла НЕОПОРМ® соответствуют требованиям, предусмотренным постановлением Правительства РФ от 17.07.2015. №719 «О подтверждении производства промышленной продукции на территории Российской Федерации».

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Никишова С.Н. на тему: «Совершенствование технологии производства пеностекла при регулируемых режимах процессов термической обработки» обладают высокой актуальностью, представляют практический интерес, были изучены и использованы при разработке новых и оптимизации существующих режимов вспенивания и отжига брутто-блоков пеностекла НЕОПОРМ® в АО «Компания «СТЭС-ВЛАДИМИР».

Директор по научно-технологическому развитию
АО "Компания "СТЭС-ВЛАДИМИР", к.т.н.

Лазарев Е.В.

Подпись Лазарева Е.В. заверяю:
начальник отдела кадров



Щербакова В.А

Общество с ограниченной ответственностью "ГРАНГЛАС"
ИНН 7802752880 КПП 761001001 ОГРН 1117847230610
152915, город Рыбинск, улица Волочаевская д.49.кв.50

АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы
Никишова Сергея Николаевича
на тему: «Совершенствование технологии производства пеностекла при
регулируемых режимах процессов термической обработки»

г. Рыбинск

«26» декабря 2019г.

Настоящим актом подтверждается, что программы ЭВМ «Программное средство для оценки динамики параметров формирования пористой структуры сырьевой смеси для получения пеностекла в процессах высокотемпературной термической обработки (Свидетельство №2018661062 от 31.08.2018 г.)» и «Программное средство для моделирования и расчета температурных полей в твердых пористых теплоизоляционных материалах при различных термической обработки (Свидетельство №2019614723 от 10.04.2019 г.)», разработанных Никишовым С.Н. в рамках диссертационного исследования были применены при оптимизации технологических процессов производства пеностекла, а так же применяются для получения пеностекла с требуемыми теплотехническими характеристиками.

Генеральный директор
ООО «ГРАНГЛАС»
«26» декабря 2019 г.


А.В. Смолькин





АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Результаты диссертационного исследования Никишова Сергея Николаевича на тему: «Совершенствование технологии производства пеностекла при регулируемых режимах процессов термической обработки» были использованы при проведении теплотехнических расчетов в рамках разработки проектов жилых домов и расчетах теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов. Было использовано авторское программное средство для моделирования и расчета температурных полей в твердых пористых теплоизоляционных материалах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019614723 от 10.04.2019 г.

Результаты исследования обладают актуальностью и представляют практический интерес.

Заместитель директора ООО «Квартал-Инвест»
 по архитектурно-градостроительному проектированию,
 Советник РААСН, Почетный архитектор России,
 кандидат архитектуры, профессор.

Захаров А.В.

Главный инженер проектов ОКП

Воронин П.С.





ЗАО «Сланцевский Завод Стальных Конструкций»
188560, Ленинградская обл., г. Сланцы, ул. Ремонтников д.1.
Строительное проектирование, изготовление и монтаж стальных конструкций и изделий. Металлообработка.

ИНН 4707034890, ОКПО 38549450, р/с 40702810255300076701 в Северо-западный банк ОАО Сбербанк
России г. С-Петербург, к/с 3010181050000000653, БИК 044030653

Утверждаю

Генеральный директор

ЗАО «Сланцевский завод стальных конструкций»

Рыбин А.Е.



АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
Никишова Сергея Николаевича на тему: «Совершенствование технологии
производства пеностекла при регулируемых режимах процессов термической
обработки», представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)**

Ведущими специалистами нашей организации были изучены и внедрены результаты диссертационного исследования Никишова Сергея Николаевича при оптимизации процессов высокотемпературной обработки сырьевых материалов. Предложенная в работе оптимизационная модель позволяет определить наиболее эффективные температурные режимы тепловой обработки изоляционных материалов применяемых в строительстве быстровозводимых зданий и сооружений.

*Главный инженер
ЗАО «Сланцевский Завод
Стальных Конструкций»*

А.Н. Терешкин



ТРУБОПРОВОДНАЯ АРМАТУРА
САНТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ

официальный партнер компании "Контур"

КОНТУР



ООО "СНАБАРМАТУРА СПб", ИНН 7814613986, КПП 781401001, 197348, г.
Санкт-Петербург, пр-кт Коломяжский, д. 13, лит. Ф., тел.: +7 (812) 670-83-84

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Никишова Сергея Николаевича на тему: «Совершенствование технологии
производства пеностекла при регулируемых режимах процессов
термической обработки», представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

Настоящим Актом удостоверяется, что результаты диссертационного исследования Никишова С.Н. были изучены. "Программное средство для моделирования и расчета температурных полей в твердых пористых теплоизоляционных материалах при различных режимах термической обработки" (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019614723 от 10.04.2019 года) внедрено в производство и используется при выполнении теплотехнических расчетов изоляционных материалов.

Генеральный директор
ООО "Снабарматура СПб"



П.С. Запатрин



УТВЕРЖДАЮ

Руководитель производства

ООО ТД «СЗПК»

Ивашкин А.Н.

АКТ**о внедрении результатов диссертационной работы****Никишова Сергея Николаевича на тему:****«Совершенствование технологии производства пеностекла****при регулируемых режимах процессов термической обработки»,****представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)**

Настоящим Актом удостоверяется, что результаты диссертационного исследования Никишова С. Н., были рассмотрены и внедрены в повседневную деятельность ООО ТД «СЗПК» при проведении теплотехнических расчетов строительных конструкций с пористыми теплоизоляционными материалами.

Главный инженер ООО ТД «СЗПК»

Т.В. Петренко

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
 ФГБОУ ВО «Национальный
 исследовательский Мордовский
 государственный университет
 им. Н.П. Огарёва»
 доктор филологических наук, доцент

 А.Ю. Маслова

«17» декабря 2019 г.

СПРАВКА

**о внедрении результатов диссертационной работы
 Никишова Сергея Николаевича
 на тему: «Совершенствование технологии производства пеностекла при
 регулируемых режимах процессов термической обработки»
 в учебный процесс**

Результаты диссертационной работы Никишова Сергея Николаевича на тему: «Совершенствование технологии производства пеностекла при регулируемых режимах процессов термической обработки» используются в учебном процессе на Архитектурно-строительном факультете Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва при подготовке бакалавров, специалистов и магистров.

Рассматриваются следующие конкретные результаты, полученные в диссертации при организации и проведении учебных занятий:

1) Результаты исследования физико-механических свойств теплоизоляционных материалов из пеностекла включены в программу преподавания дисциплины «Строительные материалы» (специальность 08.05.01 - Строительство уникальных зданий и сооружений, специализация «Строительство высотных и большепролетных зданий и сооружений»). Наименование раздела дисциплины: «Теплоизоляционные и акустические материалы».

2) Технологические приемы оптимизации процессов термической обработки на основе метода многокритериальной оптимизации и особенностей технологии производства пеностекла включены в программу преподавания дисциплины «Научные проблемы оптимизации в строительстве» (направление подготовки 08.04.01 - Строительство, профиль «Технология строительных материалов, изделий и конструкций»). Наименование раздела дисциплины: «Повышение эффективности строительства за счет оптимизации технологии производства материалов и изделий».

3) Результаты исследования процессов высокотемпературной термообработки в технологии пеностекла включены в программу преподавания дисциплины «Строительные материалы» (направление подготовки 08.03.01 - Строительство, профиль «Промышленное и гражданское строительство»). Наименование раздела дисциплины: «Строительные материалы, получаемые термической обработкой».

Заведующий кафедрой
«Зданий, сооружений и автомобильных дорог»
Национального исследовательского Мордовского
государственного университета им. Н.П. Огарёва
доктор технических наук, профессор

В.Д. Антошкин

Заместитель заведующего кафедрой
«Строительные материалы и технологии»
Национального исследовательского Мордовского
государственного университета им. Н.П. Огарёва
кандидат технических наук, доцент

С.А. Молодых



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



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

Правообладатели: *Федосов Сергей Викторович (RU), Баканов Максим Олегович (RU), Никишов Сергей Николаевич (RU)*

Авторы: *Федосов Сергей Викторович (RU), Баканов Максим Олегович (RU), Никишов Сергей Николаевич (RU)*

Заявка № 2018618396

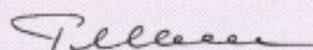
Дата поступления 31 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 31 августа 2018 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

ПрЭВМ №2019614723

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU

2019614723ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства): 2019614723 Дата регистрации: 10.04.2019 Номер и дата поступления заявки: 2019612716 28.03.2019 Дата публикации: 10.04.2019 Контактные реквизиты: нет	Авторы: Федосов Сергей Викторович (RU), Баканов Максим Олегович (RU), Никишов Сергей Николаевич (RU) Правообладатели: Федосов Сергей Викторович (RU) Баканов Максим Олегович (RU) Никишов Сергей Николаевич (RU)
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Название программы для ЭВМ:

Программное средство для моделирования и расчета температурных полей в твердых пористых теплоизоляционных материалах при различных режимах термической обработки

Реферат:

Программа предназначена для аналитической обработки и визуализации динамики распределения температурных полей в твердых материалах при различных режимах термической обработки. Область применения: планирование и наладка технологических циклов термической обработки при производстве твердых пористых теплоизоляционных материалов, в том числе пеностекла. Программа позволяет осуществлять расчет необходимого времени для равномерно нагрева твердого теплоизоляционного материала, при подборе рационального технологического процесса термической обработки.

Язык программирования: HTML, CSS, JavaScript**Объем программы для ЭВМ:** 25 Кб