

На правах рукописи



НИКИШОВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

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

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2020

Работа выполнена на кафедре естественных наук и техносферной безопасности в ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет».

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

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

Лауреат премий Правительства РФ
в области науки и техники,
доктор технических наук, профессор
Блиничев Валерьян Николаевич,
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
химико-технологический университет»,
профессор кафедры
«Технологические машины и оборудование»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых»

Защита состоится 29 октября 2020 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., д. 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» www.ivgpi.com.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2020 г.

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



Н.В. Заянчуковская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Объемы производства пеностекла с конкурентными теплофизическими свойствами на рынке строительных теплоизоляционных материалов в России в десятки раз меньше по сравнению с другими теплоизоляционными материалами. Связанно это, прежде всего, с высокой себестоимостью готового продукта и отсутствием технологий, позволяющих получать пеностекло с требуемыми свойствами. Для решения данных проблем требуется разработка научно обоснованных математических моделей, способных описывать весь процесс производства пеностекла. В технологии производства пеностекла процесс высокотемпературной термической обработки, в ходе которого формируются теплофизические свойства материала, является наиболее энергозатратным, поэтому исследования, направленные на определение оптимальных температурных режимов оборудования, являются приоритетными задачами стоящими перед промышленностью 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. – и современных исследователей – Китайгородского А.А., Демидовича Б.К., Шилла Ф., Федосова С.В., Рудобашты С.П., Блиничева В.Н., Христофорова А.И., Щепочкиной Ю.А.

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.

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 пеностекольной 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»).

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, определена научная новизна и практическая значимость, а также представлены основные вопросы, выносимые на защиту.

Обзор современного состояния производства пеностекла в России и за рубежом проведен в **первой главе**. При этом обозначены основные преимущества и недостатки пеностекла в сравнении с другими теплоизоляционными материалами, рассмотрены существующие способы производства, используемые сырьевые материалы и выделены основные факторы, сдерживающие развитие производства пеностекла в России.

Производство теплоизоляционного пеностекла в настоящее время активно развивается в строительной отрасли. Наиболее популярным является порошковый способ производства пеностекла. Принципиальная схема технологического процесса производства пеностекла порошковым способом представлены на рисунке 1.

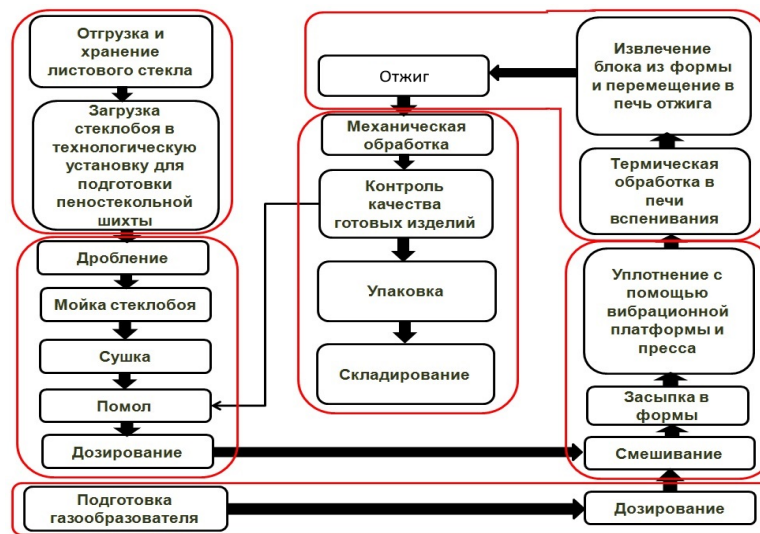


Рисунок 1 – Технологическая схема производства пеностекла

Данный способ не до конца изучен и основан на эмпирических подходах к определению рациональных режимов термической обработки пеностекла. Самым энергоемким процессом является термическая обработка сырьевой смеси на этапах спекания, вспенивания и отжига. Отсутствие математических зависимостей и физически ясных представлений об этом процессе, безусловно, сдерживает развитие отрасли в целом, а также влияет непосредственно на себестоимость материала.

В результате проведенного анализа сформулированы конкретные задачи диссертации.

Во **второй главе** описываются исходные материалы и методы проведения исследования. В качестве сырьевых материалов служили бой листового стекла и мел природный сухомолотый. Материалы подвергались помолу в снечковой дробилке, до прохождения через сито 0,063. Химический состав применяемых материалов указан в таблицах 1, 2.

Таблица 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 – 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

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 последующим уплотнением. Затем форма помещалась в печь, где происходила термическая обработка пенообразующей смеси до получения пеностекла.

Температурные режимы и временные интервалы термической обработки в ходе проведения серии экспериментов показаны на рисунке 2.

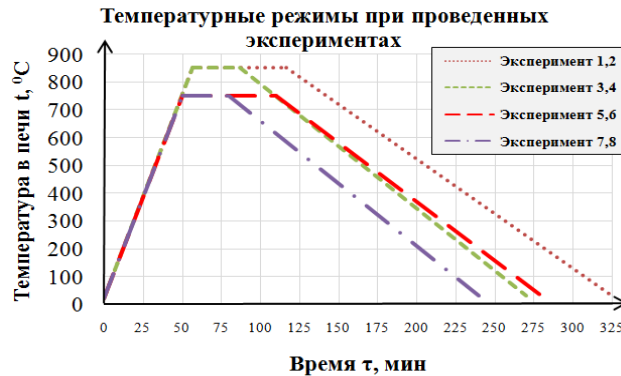


Рисунок 2 – Температурные кривые условий термической обработки пенообразующей смеси

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. Общая схема подключения показана на рисунке 3. Для проведения измерений использовалась муфельная печь и система контроля температуры КТС-5.8-RS485 (рисунок 4).

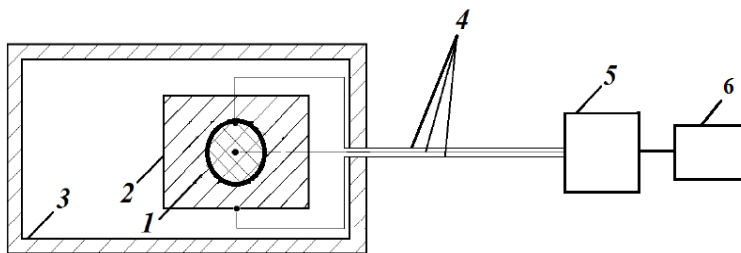


Рисунок 3 – Схема измерительного устройства:

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

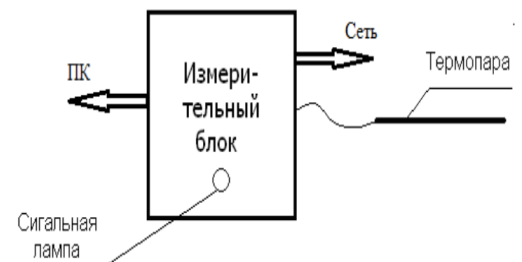


Рисунок 4 – Схематическое изображение системы контроля температуры КТС-5.8-RS485

В третьей главе представлена разработанная математическая модель процесса нагрева с учетом реальной геометрии – металлической формы, в которой исходная смесь подается в печь.

В общем случае краевые задачи переноса теплоты и массы вещества могут быть представлены нелинейными неоднородными дифференциальными уравнениями параболического типа в частных производных. Для краевой задачи теплопроводности уравнение имеет следующий вид:

$$\rho(u, t) \cdot c(u, t) \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(u, t) \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right]; \quad (1)$$

- начальное условие:

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

- граничные условия, соответственно, первого и второго рода:

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

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=L/2} = 0. \quad (4)$$

Начальное условие (2) показывает, что в момент времени, принимаемый за начало отсчета, в сырьевом материале имеется произвольное распределение температур по координате.

Граничное условие (3) показывает, что в зоне контакта стенок металлической формы для вспенивания, принимается равенство значений температуры формы и материала, от которой отсчитывается координата x . Условие (4) показывает, что задача может рассматриваться как симметричная.

На первых этапах моделирования целесообразно задать граничные условия и решить плоскую задачу для одной из координат. На рисунке 5 представлена геометрическая модель используемая для постановки задачи.

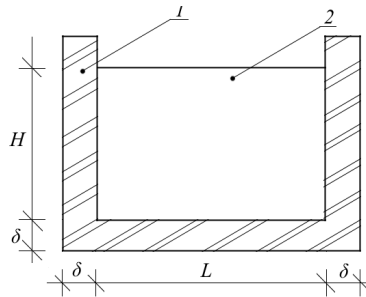


Рисунок 5 – Геометрическая модель используемая для постановки задачи: металлическая форма (1); сырьевая смесь (2).

Вводятся безразмерные переменные:

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_H - t_0}; \quad Fo = \frac{a\tau}{(L/2)^2}; \quad \bar{x} = \frac{x}{(L/2)}. \quad (5)$$

И тогда задача (1) – (4) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}; \quad Fo > 0; \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1; \quad (6)$$

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_H - t_0} = T_0(\bar{x}); \quad (7)$$

$$T(\bar{x}, Fo) \Big|_{\bar{x}=0} = \frac{t_H - t_0}{t_H - t_0} = 1; \quad (8)$$

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

Используя метод интегральных преобразований Лапласа, было получено окончательное решение краевой задачи теплопроводности:

$$T(\bar{x}, Fo) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{x}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{x}\right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\xi\right] d\xi \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right]. \quad (10)$$

Результаты расчетов по уравнению (10) приведены на рисунке 6. Для большей наглядности расчеты выполнялись для случая равномерного начального распределения температур в сырьевой смеси.

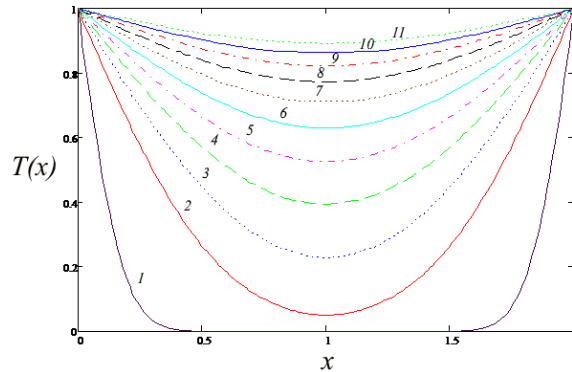


Рисунок 6 – Иллюстрация расчетов по выражению (10).

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 6 иллюстрируют динамику полей безразмерных температур в сырьевой смеси.

Преобразование уравнения (10) в размерный вид позволяет получить следующее уравнение:

$$t(x, \tau) = t_n - (t_n - t_0) \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + \right. \\ \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \right). \quad (11)$$

По уравнению (11) производится моделирование процесса термической обработки при температурах от 20 °С до 750 °С, так как большая часть применяемых газообразователей при порошковом способе производства пеностекла имеет температуру термического разложения в пределах 680–800 °С. В диапазоне моделируемых температур значения температуропроводности изменяются, что влияет на показатели числа Фурье, тем самым предлагается производить его расчет на каждом этапе моделирования по формуле (11), при этом принимается, что a – температуропроводность – изменяется по следующему закону:

$$a = (-3,1 \cdot 10^{-7} \cdot t_n^2 + 9,92 \cdot 10^{-4} \cdot t_n + 2,305) \cdot 10^{-7}. \quad (12)$$

Шаг по времени при расчетах принимается равным 20 минутам. Моделирование температурных полей осуществлялось поэтапно. Полученное распределение температурных полей на каждом этапе расчета аппроксимировалось полиномом 5 степени и закладывалось в качестве начального на следующем шаге расчета. Полученные результаты показаны на рисунке 7.

Из рисунка 7 видно, что через 180 минут с момента начала нагрева сырьевой смеси со скоростью 5 °С в минуту температура в центре материала достигнет 452 °С. Дальнейший нагрев может привести к деструктивным процессам из-за большой разницы значений температур на поверхности и в центре, поэтому моделируется ситуация с отключением источника теплоты для возможности равномерного нагрева материала по всему объему на этапе, когда температура на поверхности уже очень высокая, но недостаточная для начала процесса разложения газообразователя.

На рисунке 8 показаны номограммы распределения температурных полей для различных значений Fo .

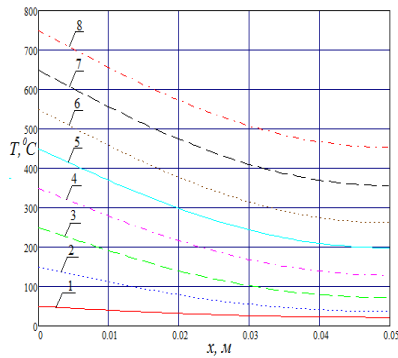


Рисунок 7 – Номограмма температурных полей от 20 °С до 750 °С

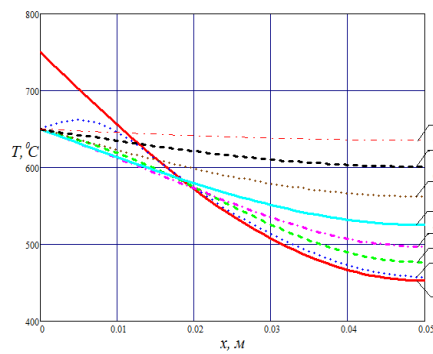


Рисунок 8 – Номограмма температурных полей после остывания до температуры на поверхности материала до 650 °С:

- 1 – последний этап расчета нагрева материала рисунок 9. 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.)

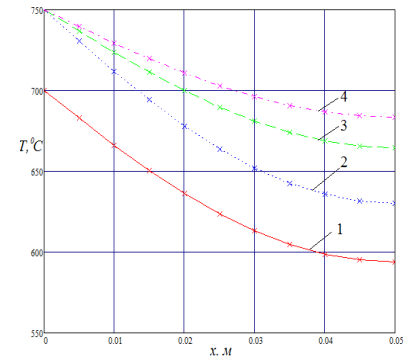


Рисунок 9 – Номограмма температурных полей при поэтапном нагреве до температуры на поверхности материала

- 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.)

Представленные расчеты показывают, 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 8). 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 9). Общее расчетное время момента начала процесса вспенивания составляет 255 минут.

Четвертая глава посвящена подтверждению адекватности разработанной математической модели теплопереноса в сырьевой смеси.

Блок пеностекла после вспенивания был извлечен из печи и размещен на поддоне (на воздухе). В блоке были зафиксированы термопары (на разной глубине) в соответствии с рисунком 10.

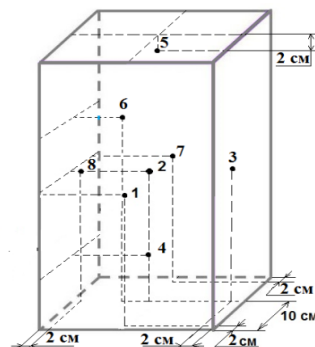


Рисунок 10 – Распределение термопар на исследуемом блоке

Используя уравнение (11), были проведены расчеты температурных полей при остывании блока пеностекла. Исходные параметры пеностекла были приняты как при эксперименте, описанном выше. По полученным результатам построены графики изменения расчетных и экспериментальных значений показателей температуры при остывании блока для поверхности и центра.

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений температуры показаны на рисунках 11–12.

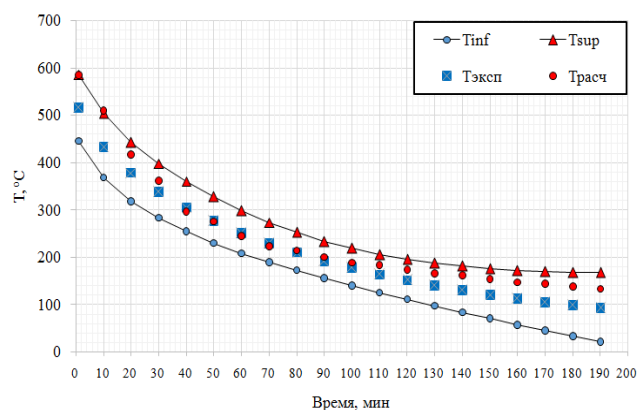


Рисунок 11 – Изменение температуры на поверхности блока

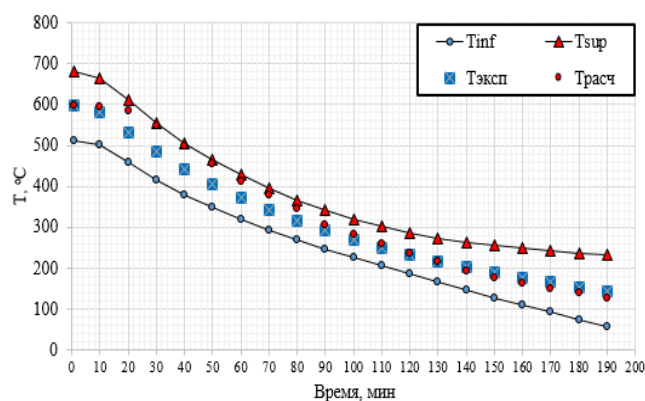


Рисунок 12 – Изменение температуры в центре блока

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

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

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

$$\frac{dR_2}{dt} = \frac{3V_{жс}/4\pi + R_1^3}{4\mu \cdot 3V_{жс}/4\pi} (\Delta p R_1 - 2\sigma). \quad (13)$$

Для проведения расчетов и графической интерпретации уравнения (13) применялся метод Рунге-Кутты IV порядка в программе MathCAD.

Результаты расчетов представлены на рисунке 13.

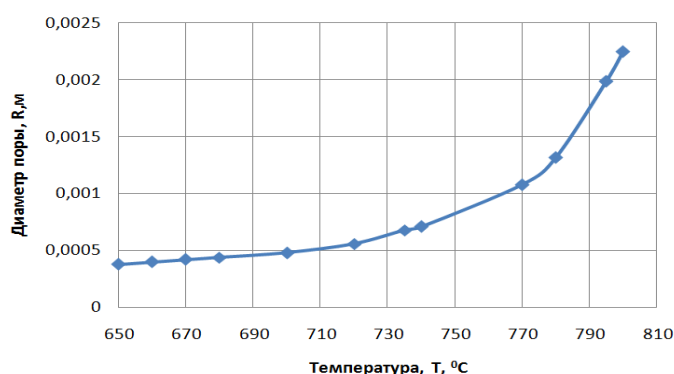


Рисунок 13 – График роста радиуса поры в зависимости от температуры

Динамика роста радиуса поры рассматривалась при начальной температуре 25 °С. Значение k принималось равным 0,25, что позволило задать изменение температуры с шагом 15 °С/мин., то есть, весь процесс вспенивания моделировался в течение 1 часа.

Как видно из графика (рисунок 13), радиус поры начинает медленно увеличиваться при достижении температуры 650 °С, при этом увеличение температуры до 700 °С приводит к росту радиуса всего на 0,0001 м.

Однако при температурах выше 700 °С начинается активный процесс оплавления частиц стекла, концентрация и давление газообразователя становятся достаточными, чтобы преодолеть силы поверхностного натяжения, и радиус поры начинает увеличиваться. При достижении температур в 850 °С радиус поры увеличивается до размеров 2–2,5 мм, после чего рост радиуса поры замедляется и затем останавливается. Установлено, что 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 °С 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.

Для оптимизации технологического процесса производства пеностекла были определены управляющие факторы и интервалы их варьирования (таблица 3).

Таблица 3 – 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 шихты, % (x_1)	3	4	5	1
Время термической обработки при вспенивании пеностекольной шихты, мин. (x_2)	30	45	60	15
Температурный режим термообработки, °С (x_3)	750	800	850	50

Функции отклика описываются уравнением многочлена из всех возможных произведений факторов:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= A_1x_1x_2x_3 + A_2x_1x_2 + A_3x_1x_3 + A_4x_2x_3 + A_5x_1 + A_6x_2 + A_7x_3 + A_8, n \in [1;8] \\ y_2 &= C_1x_1x_2x_3 + C_2x_1x_2 + C_3x_1x_3 + C_4x_2x_3 + C_5x_1 + C_6x_2 + C_7x_3 + C_8, n \in [1;8] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

В системе 16 линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов A_1-A_8 , C_1-C_8 . Т.к. число уравнений и неизвестных совпадает, есть единственное решение, поэтому, решая системы уравнений, получаем значения коэффициентов A_1-A_8 , C_1-C_8 . После подстановки многочлен произведений (14) принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= -3,43 \cdot 10^{-6} x_1x_2x_3 + 2,6 \cdot 10^{-3} x_1x_2 + 1,43 \cdot 10^{-4} x_1x_3 + 2,56 \cdot 10^{-5} x_2x_3 - 0,11x_1 - 1,98 \cdot 10^{-2} x_2 - 9,98 \cdot 10^{-4} x_3 + 0,85 \\ y_2 &= -8,99 \cdot 10^{-3} x_1x_2x_3 + 6,65 x_1x_2 + 0,37 x_1x_3 + 0,07 x_2x_3 - 283 x_1 - 61 x_2 - 3,01 x_3 + 2,58 \cdot 10^3 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Полученная математическая модель (15) описывает процесс нахождения экстремальных значений заданных функций или значений, заданных на этапах производства. 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.

В ходе экспериментальных исследований по разработанной математической модели определен рациональный технологический режим получения пеностекла. Однако, используя математическую модель расчета температурных полей в пеностекле, предложено дополнительно применить циклические режимы нагрева (рисунок 14).

Согласно проведенным расчетам по ранее полученному уравнению (11) установлены промежутки времени, при которых реализуется равномерный нагрев центра и поверхности сырьевой смеси. На рисунках 15, 16 показаны расчетные температурные поля в соответствии с температурными режимами, указанными на рисунке 14.

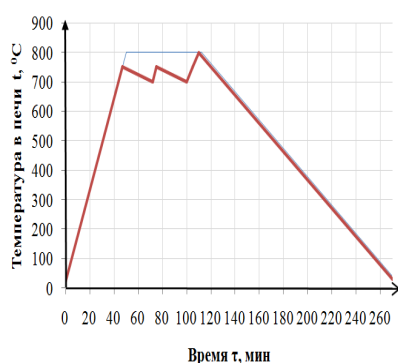


Рисунок 14 – Оптимальный температурный режим получения пеностекла

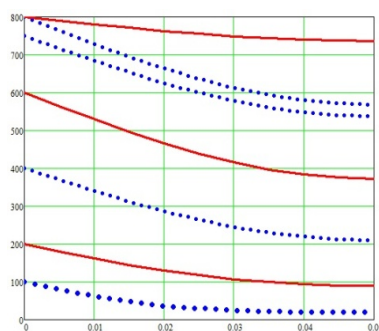


Рисунок 15 – Расчетные значения температурных полей в сырьевой смеси при непрерывном нагреве

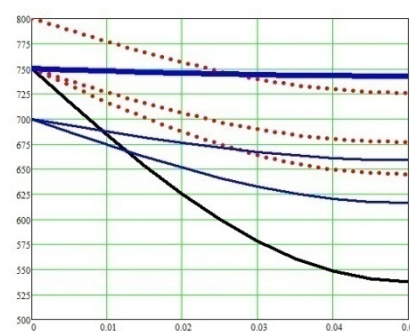


Рисунок 16 – Расчетные значения температурных полей в сырьевой смеси при циклических режимах термической обработки

На основе полученных результатов появляется возможность регулировать процесс вспенивания пеностекла посредством циклического теплового воздействия на сырьевую смесь. Сокращение затрат на энергетические ресурсы позволяет существенно повысить эффективность процесса термической обработки пеностекла и снизить себестоимость единицы готовой продукции. Вместе с тем, предложенная технология позволяет получать пеностекло с более низкими показателями коэффициента теплопроводности и плотности, чем материалы, полученные в процессе непрерывного термического воздействия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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 – 190–340 кг/м³ и коэффициентом теплопроводности – 0,061–0,099 Вт/(м·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±10 °С. Вместе с тем, изменение температуры до значений, равных 730±10 °С, способствует росту радиуса пор на показатели, равные 1·10⁻⁴ м. При температурах выше значений 730±10 °С 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÷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 м³ 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®.

Принятые обозначения:

$\rho(u, t), c(u, t), \lambda(u, t)$ – теплофизические свойства сырьевого материала (плотность, теплоемкость, теплопроводность); a – температуропроводность; t_n – температура на поверхности материала, °С; n – число точек на временной прямой в которых производится сопоставление расчетных и экспериментальных данных; A – промежуточный вычислительный комплекс, мин²; t_i – значение времени в i -ой точке контроля, мин.; t_{cp} – среднее значение времени относительно всех точек контроля экспериментальных данных, мин.; B – промежуточный вычислительный комплекс, °С²; T_i – экспериментальное значение температуры в контролируемой точке, °С; T_{cp} – среднее экспериментальное значение температуры, °С; $tp(P, k)$ – табличное значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности P и числе степеней свободы k ; $\Delta p = p_g - p_n$ – разность давлений внутри поры и на его поверхности, где p_g – давление газа внутри поры, p_n – давление на внешней (наружной) границе расплава стекла; $\mu = \mu_0 \cdot 10^{\frac{A \cdot (T_0 - T)}{(T - B) \cdot (T_0 - B)}}$ – коэффициент динамической вязкости, где μ_0 – коэффициент динамической вязкости в начальный момент времени, Па·с, T_0 – температура в начальный момент времени, К, T – температура, К, A и B – эмпирические коэффициенты (значение μ_0 принималось равными 10^{10} Па·с., коэффициент A принимался равным 3700, коэффициент B принимался равным 510); $\sigma = \sigma_0 - 0,004 \cdot \frac{T - 1173}{100}$ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м, где σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения в начальный момент времени (принимался равными 0,2), Н/м; $T = T_0 + k \cdot t$ – изменение температуры по времени, где k – коэффициент учитывающий скорость нагрева, t – время, сек; y_1 – теплопроводность; y_2 – плотность; A_1 - A_8 , C_1 - C_8 – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

публикации, входящие в реферативную базу данных Scopus:

1. Fedosov, S.V. Kinetics of Cellular Structure Formation at Thermal Treatment Processes Simulation in the Cellular Glass Technology/ Sergey V. Fedosov, Maksim O. Bakanov, **Sergey N. Nikishov**. Materials Science Forum, 2018, vol. 931, pp. 628–633.

2. Fedosov, S.V. Modeling of Macro-Physical Parameters of Foam Glass under Exposure of Cyclic Thermal Effects / Sergey V. Fedosov, Maksim O. Bakanov, **Sergey N. Nikishov**. Materials Science Forum, 2019, vol. 974, pp. 464–470

3. Fedosov, S.V. Parametric Optimization of the Thermal Processing of Foam Glass on Basis of heat Transfer Models / Sergey V. Fedosov, Maksim O. Bakanov, **Sergey N. Nikishov**. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 044047. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/709/4/044047> (дата обращения 09.01.2020)

публикации, включенные в перечень, определенный ВАК Минобрнауки РФ:

4. Федосов, С. В. Вариативность подходов к математическому моделированию процессов термической обработки пеностеклянной шихты / С. В. Федосов, М. О. Баканов,

С. Н. Никишов. – Текст : непосредственный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 11. – С. 110–116.

5. Fedosov, S.V. Kinetics of Structural Transformations at Pores Formation During High-Temperature Treatment of Foam Glass / Sergey V. Fedosov, Maksim O. Bakanov, **Sergey N. Nikishov**. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2018, issue 2, vol. 14, pp. 158–168.

6. Fedosov, S.V. Study and simulation of heat transfer processes during foam glass high temperature processing / Sergey V. Fedosov, Maksim O. Bakanov, **Sergey N. Nikishov**. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2018, issue 3, vol. 14, pp. 153–160.

в других изданиях:

7. Fedosov, S.V. Modeling of thermal processes in the production of foam glass / S. V. Fedosov, M. O. Bakanov, **S. N. Nikishov**. Yale Review of Education and Science, № 1(16), (January-June), vol. V, «Yale University Press», 2015.– pp. 752–757.

8. Баканов, М.О. Моделирование размеров пор при производстве пеностекла / М. О. Баканов, **С. Н. Никишов.** – Текст : электронный // Наука современности – 2015: сборник материалов международной научной конференции. Россия, г. Москва, 29-30 января 2015 г. / под ред. проф. П.М. Саламахина, А.Н. Квитко, Н.А. Алексеевой, М.Т. Луценко, В.Е. Шинкевича. – Киров: МЦНИП, 2015. – С. 94-100 – URL https://arch.susu.ru/images/Sbornik_MKO-2015-011.pdf (дата обращения 09.01.2020).

9. Баканов, М. О. Моделирование процессов теплообмена при термической обработке пеностекла / М. О. Баканов, **С. Н. Никишов.** – Текст : непосредственный // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2015): сборник материалов XVIII Международного научно-практического форума (26-29 мая 2015 года). – Иваново: ИВГПУ, 2015. – С. 270–273.

10. Федосов, С. В. Основные принципы технологии получения теплоизоляционного пеностекла, подходы к моделированию / С. В. Федосов, М. О. Баканов, **С. Н. Никишов.** – Текст : непосредственный // Эффективные строительные композиты: научно практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича. сборник трудов – Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. – С. 690–699.

11. Федосов, С. В. Тепловые процессы при термической обработке пеностекольной шихты / С. В. Федосов, М. О. Баканов, **С. Н. Никишов.** –Текст : непосредственный // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия : сборник материалов XIII международной научно-практической конференции. Новосибирск: Educatio, 2015. – С. 160–162.

12. Подходы к моделированию процессов термической обработки пеностекольной шихты. Постановка задачи / С. В. Федосов, Н. Л. Федосова, М. О. Баканов, **С. Н. Никишов.** – Текст : непосредственный // Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений : сб. науч. тр. – Иваново: ИВГПУ, 2015. – Вып. 1. – С. 10–19.

13. Баканов, М. О. О необходимости комплексного подхода к математическому моделированию процессов термической обработки пеностекольной шихты на всех стадиях его производства / М. О. Баканов, **С. Н. Никишов.** – Текст : непосредственный // Интеллектуальные композиты для зеленого строительства: Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика : сб. докл. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – Ч. 1. – С. 56–60.

14. Баканов, М. О. Особенности теплообмена в теплоизоляционных материалах / М. О. Баканов, **С. Н. Никишов**. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы естествознания: материалы I Межвузовской научно-практической конференции, Иваново, 21 апреля 2016 года / сост.: Н. Е. Егорова, Д. А. Ульев. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно- спасательная академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 51–56.

15. Баканов, М. О. Определение граничных условий при математическом моделировании процессов термической обработки пористых материалов / М. О. Баканов, **С. Н. Никишов**. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы естествознания: материалы II Межвузовской научно-практической конференции, Иваново, 12 апреля 2017 года / сост.: Н. Е. Егорова. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 192–195.

16. Федосов, С. В. Повышение эффективности процесса формирования пор в технологии пеностекла с применением математического моделирования / С. В. Федосов, М. О. Баканов, **С. Н. Никишов**. – Текст : непосредственный // Новые материалы и технологии в машиностроении : сборник научных трудов; под общ. ред. Е. А. Памфилова. – Брянск: БГИТУ, 2018. – Вып. 27. – С. 95–101.

17. Федосов, С. В. Способы моделирования процессов термической обработки в технологии пеностекла / С. В. Федосов, М. О. Баканов, **С. Н. Никишов**. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии в архитектуре и дизайне : тезисы докладов II Международной научно-технической конференции; под общ. ред. д-ра техн. наук В. П. Сопова. – Харьков: ХНУСА, 2018. – С. 117.

18. Федосов, С. В. Динамика макрофизических параметров получения пеностекла при высокотемпературной термической обработке / С. В. Федосов, М. О. Баканов, **С. Н. Никишов**. – Текст : непосредственный // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной Году культуры безопасности, Иваново, 19 сентября 2018 г. Часть I. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 174–183.

свидетельства на программы ЭВМ:

1. 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.

2. Программное средство для моделирования и расчета температурных полей в твердых пористых теплоизоляционных материалах при различных термической обработки. Свидетельство №2019614723 от 10.04.2019 г.

Автор выражает благодарность:

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

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