

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Рудобашты Станислава Павловича на диссертационную работу Баканова Максима Олеговича «Теоретические и прикладные основы процессов высокотемпературной термической обработки и особенности технологии при производстве теплоизоляционного пеностекла», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

### Актуальность темы

Тема диссертации представляет интерес для специалистов, работающих в области производства теплоизоляционных строительных материалов, и в первую очередь для тех из них, которые занимаются математическим моделированием и расчетом процесса высокотемпературной термической обработки шихты с целью получения пеностекла и отладки технологического оборудования этого процесса.

Процесс термической обработки шихты является многофакторным, включающим в себя различные физико-химические превращения, перенос тепла и влаги. Он сопровождается динамикой химико-технологической системы, что создает определенные сложности при разработке математических моделей, предназначенных для описания всего комплекса процессов в целом. Работы по развитию математических моделей, направленных на описание высокотемпературной термической обработки пеностекла и определение технологических параметров этого процесса, являются актуальными и востребованными, т.к. способствуют совершенствованию рассматриваемого процесса.

Автор отмечает в диссертации, что существуют два способа производства пеностекла: 1) холодный – порошок метод, при котором смесь тонкоизмельченного стекла и газообразователя нагревается в огнеупорных формах до спекания частиц порошка и 2) горячий - получение его из расплава. В работе справедливо отмечаются достоинства холодного метода, который да-

лее и исследуется в работе. Работа направлена на развитие именно холодного метода производства пеностекла, что подтверждает ее актуальность.

### **Оценка новизны**

В качестве новых научных результатов автором выдвинуты следующие положения:

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

2. Создана и апробирована математическая модель для расчета процессов высокотемпературной термической обработки сырьевой смеси для получения пеностекла, отличающегося тем, что:

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

4. В качестве основы для моделирования динамики расплава сырьевой смеси использовали уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости (Навье–Стокса) и уравнение неразрывности в сферических координатах, принимая во внимание, что скорость движения жидкости вокруг пузырька

имеет только радиальную составляющую и вследствие сферической симметрии пор;

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

6. Создана и апробирована математическая модель, описывающая процессы теплопереноса в результате воздействия высокой температуры на сырьевую смесь для получения пеностекла, а именно:

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

8. Разработан метод экспериментального исследования процесса охлаждения блока пеностекла, в основе которого выявлено соответствие основных положений математического моделирования процессов теплопереноса в структуре пеностекла и результатов натурального эксперимента. Реализован 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.

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

10. Динамические процессы термического вспенивания стекольной шихты для управления пористостью пеностекла;

11. Моделирование и расчет температурных полей в твердых пористых теплоизоляционных материалах при различных условиях термической обработки;

12. Временные параметры вспенивания и отжига сырьевой смеси для получения пеностекла.

13. На основе полученных и известных экспериментальных данных предложен механизм верификации разработанных моделей процессов высокотемпературной термической обработки пеностекла.

Анализ содержания диссертации показывает, что в ней содержатся эти новые научные результаты.

### **Общее описание работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 231 наименование, содержит 330 страниц машинописного текста, включая 18 приложений, 95 рисунков, 21 таблицу.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, поставлены цели и задачи диссертационной работы, определена предметно-объектная область исследований, показана научная новизна, практическая и теоретическая значимость результатов работы, достоверность результатов, обоснована принадлежность диссертации к заявленной научной специальности, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен анализ состояния производства пеностекла на современном этапе развития, специфики получения пористых материалов на основе пеностекла. Рассмотрены области применения ячеистого пеностекла, раскрыты проблемы в области моделирования теплофизических параметров материала.

Отмечено, что при разработке математической модели, способной описать весь цикл термической обработки пеностекла, необходимо его представить как совокупность трех основных стадий, в частности  $\tau_1$  – время первой стадии процесса термической обработки, необходимое для нагрева пеносте-

кольной шихты до температуры разложения газообразователя ( $c$ ),  $\tau_2$  – время, необходимое для формирования поры размером  $R$  ( $c$ ),  $\tau_3$  – время остывания пеностеклянного блока ( $c$ ).

**Вторая глава** раскрывает методы разработки математической модели процесса теплопереноса при термической обработке пеностекла в одномерной постановке задачи. Представлены общие положения математического моделирования процессов теплопереноса при термической обработке пеностекла, сформулирована физическая и математическая постановка задачи для расчета процессов теплопереноса при высокотемпературной обработке пеностекла (расчет одномерного поля температур), а также приведено решение краевой задачи.

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

**В четвертой главе** рассмотрены феноменологические особенности теплопереноса в зависимости от пористости материала, приведен анализ геометрических моделей расположения пор в пространстве теплоизоляционных материалов. Разработана физическая и математическая постановка задачи для моделирования процесса формирования пористой структуры в объеме сырьевой смеси для получения пеностекла.

Поставлена и решена задача по разработке математической модели второго этапа термической обработки ( $\tau_2$ ) пеностекла при котором происходит формирование пор заданного размера  $R$ .

**Пятая глава** посвящена разработке подходов к совершенствованию технологии получения пеностекла на основе теории графов с использованием методов сетевого моделирования. Приведены сетевые графики технологии

получения пеностекла. Представлены зависимости функции распределения времени реализации исходного и модернизированного сетевого графика технологического процесса производства пеностекла, а также приведена интегральная функция распределения времени выполнения цикла в границах технологического процесса производства пеностекла.

В **шестой главе** приведены результаты моделирования процесса теплопереноса в рассматриваемых точках контроля пеностекла при самопроизвольном остывании ( $\tau_3$ ). Выполнено исследование адекватности математической модели теплопереноса при высокотемпературной термической обработке пеностекла.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

### **Степень обоснованности, достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Автор диссертационной работы в своих исследованиях опирается на целенаправленный анализ как отечественных, так и зарубежных литературных источников области основных способов получения пеностекла.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы, подкреплены теоретическими и экспериментальными исследованиями. Автором достаточно полно реализован комплексный подход к решению поставленных задач.

В диссертационной работе М.О. Бакановым разработана комплексная математическая модель процесса высокотемпературной термической обработки пеностекла, рассматривающая совокупность процессов, входящих в цикл высокотемпературной термической обработки, которые в модели представлены в виде временных стадий, совокупность которых представляет весь цикл термического воздействия как систему с учетом особенностей физических процессов теплопереноса на отдельных стадиях и динамики формирования пористой структуры. Корректность полученных результатов подтверждается согласованностью результатов расчета с экспериментальными дан-

ными, полученными непосредственно при изучении процесса производства пеностекла с использованием порошковой технологии. Таким образом, представленная модель адекватно описывает рассматриваемые процессы.

### **Ценность диссертации для науки и практики.**

Математические модели, развитые в диссертации, представляют интерес для области знаний, в которой рассматривается процесс холодного (порошкового) производства пеностекла. Практическая значимость работы определяется тем, что в ней получены конкретные численные результаты, позволяющие выполнять инженерные расчеты на основе развитых в работе моделей, создании для них алгоритмов и в разработке эффективных программных средств реализации необходимых вычислений.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Согласно автору, научная гипотеза работы заключается «в разработке методологии научного подхода, особенностью которого является то, что весь процесс синтеза теплоизоляционного пеностекляного изделия представляется непрерывной цепью стадий». То, что автор рассматривает всю совокупность стадий холодного формирования пеностекла из шихты, безусловно, похвально, но в чем состоит при этом научный подход, который именуется гипотезой?
2. В работе недостаточно полно отражены технико-экономические показатели имеющейся на рынке продукции на основе пеностекла.
3. Для полной оценки перспектив развития производства пеностекла автором недостаточно полно приведена комплексная методика инженерного расчета основных параметров и режимов термической обработки пеностекла как единой математической системы.
4. В математической модели в четвертой главе не прослеживается степень влияние состава газообразователя на процесс порообразования.
5. В основную часть работы можно бы добавить приложение с кодом программы для ЭВМ, разработанную автором.

6. Слабо прослеживается связь, в четвертой главе, посвященной моделированию процесса порообразования, между моделью и формируемыми в процессе вспенивания теплофизическими свойствами пеностекла.

Однако данные замечания не меняют общей положительной оценки работы.

Основные положения диссертации с достаточной полнотой отражены в публикациях автора. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

### **Заключение**

Диссертация М.О. Баканова является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научно-методическом уровне. В работе приведены научно обоснованные результаты, позволяющие рассматривать их как технико-технологическое решение новой задачи, заключающейся в совершенствовании технологии получения пеностекла, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Разработанные автором математические модели актуальны как для коммерческих, так и для государственных организаций, деятельность которых связана с производством теплоизоляционных материалов и проведением расчетов технологических процессов, сопровождающихся теплопереносом. Применение, разработанных математических методов позволяет значительно снизить энергетические ресурсы, необходимые для обеспечения процессов высокотемпературной термической обработки при получении пеностекла. Полученные автором результаты достоверны, выводы и все пункты заключения обоснованы.

Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет необходимые пояснения, рисунки, графики, примеры, алгоритмы расчетов, написана технически грамотным языком, с применением терминологического аппарата, характерного для области научных исследова-



ний, оформлена аккуратно, имеются выводы, отражающие суть полученных результатов.

Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате, содержание которого соответствует содержанию работы.

Диссертация полностью отвечает критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Баканов Максим Олегович, без сомнения, заслуживает присуждение ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство).

Официальный оппонент

Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
профессор, доктор технических наук,  
научная специальность 05.17.08 – Процессы  
и аппараты химических технологий,  
профессор кафедры «Теплотехника, гидравлика  
и энергообеспечение предприятий»

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный  
Университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 год

С.П. Рудобашта

127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49, ФГБОУ ВО «Российский  
государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»  
Тел.: +7-905-590-23-38  
E-mail: rudobashta@mail.ru

Подпись  
заверяю

*С. П. Рудобашта*



Руководитель службы кадровой  
политики и приема персонала

*О.Ю. Чуркина*