

На правах рукописи



Городов Роман Владимирович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛА
ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ПЕНОСТЕКЛЬНОЙ ШИХТЫ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск 2009

Работа выполнена на кафедре «Атомные и тепловые электрические станции» Теплоэнергетического факультета Томского политехнического университета

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Кузьмин Ариан Валерьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Гаврилов Петр Михайлович

доктор физико-математических наук,
Соловьев Сергей Викторович

Ведущая организация: Томский государственный университет

Защита состоится «18» июня 2009 г. в 14³⁰ в ауд. 228 10 учебного корпуса ТПУ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 при Томском политехническом университете.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «15» мая 2009 г.

Ученый секретарь совета ДС 212.025.01
кандидат физико-математических
наук, доцент



О.Ю. Долматов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Вопрос теплоизоляции жилых и промышленных зданий, трубопроводов и прочих строительных объектов в России сегодня стоит довольно остро. В нашей стране на отопление тратится в три раза больше энергии, чем, например, в скандинавских странах. Причиной тому является недостаточная тепловая изоляция агрегатов ТЭЦ, теплопроводов и самих отапливаемых объектов. Сегодня выбор теплоизоляционных материалов велик – пенополиуретан, пенопласт, монтажные быстротвердеющие пены, газобетон, минераловолокнистые плиты, стекловата, керамзит и т.п. Но все они по тем или иным параметрам уступают пеностеклу. Например, минераловатные волокна накапливают влагу и со временем слеживаются; газобетон адсорбирует влагу, обладает худшими, чем у пеностекла плотностными и тепловыми характеристиками.

В настоящее время развитой технологией промышленного производства пеностекла обладают США, Япония, Китай и Беларусь. Россия после распада СССР, утратила собственное промышленное производство пеностекла и до сих пор не имеет восстановленной или запущенной вновь промышленной линии. Изучая вопросы зарубежного применения пеностекла, следует отметить, что в Европейском Союзе оно является признанным и одним из самых эффективных теплозащитных строительных материалов.

Технология получения пеностекла достаточно полно изложена в литературе. Несмотря на это, в настоящее время надежных методов оценки и прогнозирования основных стадий производства пеностекла не предложено. Оптимальный температурный режим является одним из важнейших этапов в рациональной технологии производства пеностекла, так как в зависимости от выбранного режима можно получить пеностекло с широким диапазоном свойств.

Для научно-обоснованного объяснения свойств и структуры пеностекла на различных этапах его возникновения необходимо достаточно полно знать механизм формирования исходной системы, из которой в результате постепенного накопления газообразных продуктов при нагревании формируется пеностекло. При разработке теоретической кривой вспенивания необходимо учитывать взаимосвязь между физическим состоянием смеси на каждом технологическом этапе и динамикой изменения ее теплофизических свойств.

Исходя из этого, возникает научно-техническая задача выбора и анализа температурных режимов на первой стадии производства пеностекла – стадии нагрева шихты до температуры спекания, а также анализа влияния теплового состояния пенообразующей смеси на последующие стадии формирования пеностекла – спекание и вспенивание.

Цель работы – теоретическое обоснование технологических параметров цикла тепловой обработки шихты до температуры спекания в процессе производства пеностекла с учетом основных значимых факторов (режим нагрева, теплофизические свойства шихты, геометрия объекта).

Основные задачи исследования:

1. Создание математической модели процесса нестационарного теплопереноса в системе «греющий газ – металлическая форма – пеностекольная шихта».

2. Математическое моделирование теплового состояния пеностекольной шихты на стадии нагрева до температуры спекания в двумерной постановке, учитывающей реальную геометрию объекта.

3. Экспериментальное определение температурных зависимостей теплофизических характеристик пеностекольной шихты.

4. Анализ влияния режимов нагрева на равномерность прогрева шихты в момент начала спекания.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Впервые решена нелинейная нестационарная задача теплопереноса в системе «греющий газ – металлическая форма – пеностекольная шихта» с учетом реальной геометрии объекта и зависимостей теплофизических свойств шихты от температуры. В результате решения поставленной задачи определены температурные поля в шихте на стадии нагрева до температуры спекания, значительно влияющие на качество получаемого пеностекла.

2. Экспериментально получены температурные зависимости температуропроводности и теплоемкости шихты, позволяющие выделить основные факторы, влияющие на равномерность прогрева слоя пенообразующей смеси до температуры спекания.

3. Сделана оценка конвективной и радиационной составляющих подвода тепла к шихте и проведено сравнение результатов с данными других авторов, что позволило определить влияние отдельных составляющих теплопереноса в системе «греющий газ – металлическая

форма – пеностекольная шихта» и уточнить существующую модель нагрева.

4. Даны рекомендации по выбору температурных режимов нагрева с точки зрения равномерности прогрева шихты к моменту начала спекания и последующего вспенивания пеномассы.

Практическая значимость. Проведенные численные исследования вносят вклад в развитие представлений о режимах нагрева шихты до температуры спекания в процессе производства пеностекла. В диссертации разработаны теоретические основы выбора эффективных режимов нагрева на основе численного анализа температурных полей в шихте. Полученные новые результаты по математическому моделированию температурных полей в шихте при нагреве до температуры спекания являются основой для создания моделей последующих стадий производства пеностекла – спекания и порообразования, а также могут быть использованы при разработке и усовершенствовании температурных кривых туннельных печей, в которых производится пеностекло.

Достоверность полученных результатов гарантируется использованием корректных математических моделей рассматриваемых процессов теплопереноса и методов их решения, а также подтверждается сравнением результатов с известными экспериментальными данными работ других авторов. Достоверность результатов экспериментов по определению температурных зависимостей теплофизических свойств шихты следует из проведенных проверок работы установок на эталонных образцах и подтверждения результатов другими экспериментальными методами.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель теплопереноса в системе «греющий газ – металлическая форма – пеностекольная шихта» с учетом реальной геометрии объекта и температурных зависимостей теплофизических свойств шихты от температуры.

2. Экспериментальные данные по температуропроводности и теплоемкости шихты в зависимости от температуры.

3. Результаты численного исследования механизмов теплопереноса от газов печного пространства к металлической форме и пеностекольной шихте.

4. Результаты численного моделирования температурных полей в шихте к началу спекания и факторов, влияющих на подвод тепла к шихте.

Личный вклад автора состоит в планировании и проведении экспериментов по определению зависимостей температуропроводности и теплоемкости пеностекольной шихты от температуры, постановке задач о теплопереносе при нагреве пеностекольной шихты в печи с учетом реальной геометрии объекта и при последующем вспенивании пенообразующей смеси, выборе методов и разработке алгоритмов их решения, определении численных значений основных характеристик процессов, проведении теоретических исследований влияния различных факторов на эффективность подвода тепла к шихте, обработке и анализе полученных результатов, формулировке основных выводов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях: XIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (Томск, 2007, 2008 г.); IV Всероссийской научной конференции молодых ученых и студентов «Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах». (Анапа, 2007 г.); Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации» (Новосибирск, 2007 г.); VIII Всероссийском совещании «Энергоэффективность и использование возобновляемых источников энергии – основные резервы энергетической безопасности регионов России» (Томск, 2007 г.); XIV Международной научно-практической конференции молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2008 г.); VII Международной научно-практической конференции «Высокие технологии, фундаментальные исследования, образование» (Санкт-Петербург, 2009).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в трудах вышеуказанных научных мероприятий, а также в журнале «Известия ТПУ». Всего по материалам диссертации опубликовано 11 работ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 83 наименования, содержит 21 рисунок, 29 таблиц, 1 приложение, 118 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные решаемые задачи, отражена практическая значимость и новизна полученных численных результатов, представлены защищаемые автором положения.

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.

Во **второй главе** приведены результаты экспериментов по определению зависимостей температуропроводности и теплоемкости пеностекляной шихты от температуры, а также обоснована достоверность полученных результатов. Исследуемая шихта представляла собой стекольный порошок с удельной поверхностью $S_{уд} \approx 6000 \text{ см}^2/\text{г}$, что соответствует типичному технологическому процессу производства пеностекла.

Определение зависимости температуропроводности шихты от температуры проводилось по методу, предложенному О.А. Краевым. Суть метода заключается в том, что, осуществляя в опыте нагрев или охлаждение образца в необходимом интервале температур и измеряя при этом температуры в двух точках образца, удастся найти температурную зависимость коэффициента температуропроводности, расчетная формула которого имеет вид:

$$a = \frac{R^2}{4\Delta t_R} \cdot \frac{d}{d\tau} \left(t_0 + \frac{1}{4} \Delta t_R \right) - \frac{5}{2304} \frac{R^4}{a\Delta t_R} \frac{d^2 \Delta t_R}{d\tau^2} + \frac{1}{18432} \frac{R^6}{a^2 \Delta t_R} \frac{d^3 \Delta t_R}{d\tau^3} - \dots \quad (1)$$

где t_0 – температура в центре образца ($r=0$), °C; Δt_R – разность температур между точкой на радиусе R и центром. По результатам проведенных опытов максимальное расхождение между значениями температуропроводности, вычисленными по формуле (1) с учетом одного и двух членов ряда, составило $0,015 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Это подтверждает малость второго и последующих членов ряда по сравнению с первым и позволяет при обработке данных использовать без большой ошибки только первое слагаемое формулы (1).

Расчетная формула (1) получена для бесконечно длинного цилиндра. Для цилиндрического образца конечной длины вследствие торцевых эффектов возможна ошибка, которая составила величину:

$$\frac{\Delta a}{a} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{R^2}{L^2} \cdot \frac{\Delta t_L}{\Delta t_R} = \frac{1}{2} \cdot \frac{9^2}{240^2} \cdot 0,54 \cdot 100 \% = 0,04 \%, \quad (2)$$

где R , L – радиус и высота цилиндра соответственно; Δt_L – разность температур между точками $z=0$ и $z=L$ на образующей цилиндра.

Исходя из полученного результата, сделан вывод о том, что в условиях проведенного эксперимента образец можно считать бесконечно длинным и определять зависимость температуропроводности от температуры по формуле (1) с использованием только первого слагаемого.

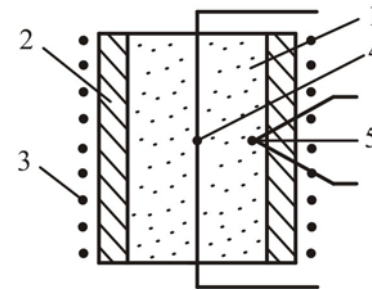


Рис. 1. Принципиальная схема установки для измерения коэффициента температуропроводности:
1–исследуемое вещество;
2–керамическая трубка; 3–нагреватель;
4–термопара ($r=0$); 5–термопара ($r=9$)

Печью сопротивления образец нагревался до температуры ≈ 600 °С, т.к. при больших температурах происходит спекание шихты. Температура в центре образца t_0 измерялась термопарой 4 (рис. 1), разность температур Δt_R измерялась дифференциально включенными термопарами 4 и 5. Для нахождения зависимости температуропроводности от температуры была проведена серия из пяти опытов, в которых одновременно измерялись t_0 и Δt_R .

Для проверки результатов эксперимента, был проведен опыт по определению температуропроводности шихты другим методом – методом регулярного режима I рода. На рис. 2 сопоставлены результаты определения зависимости температуропроводности от температуры двумя методами. Из сравнения этих результатов видно, что они достаточно хорошо согласуются между собой и в интервале температур 25...600 °С аппроксимируются выражением

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

Измерение теплоемкости шихты проводились в интервале температур 50...400 °С методом монотонного режима. После выполнения градуировки прибора с целью определения постоянных измерительных

ячеек проводилась поверка приборов на эталонных образцах (кварцевом стекле). Предел основной погрешности при измерении теплоемкости эталонных образцов не превышал 10 %. Для образцов шихты при измерении теплоемкости проводилась серия из десяти экспериментов в диапазоне температур 50...400 °С с шагом 25 °С. Результаты измерения теплоемкости шихты приведены на рис. 3. Аппроксимирующая кривая получена в виде:

$$C(t) = -3 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,5354 \cdot t + 738,15. \quad (4)$$

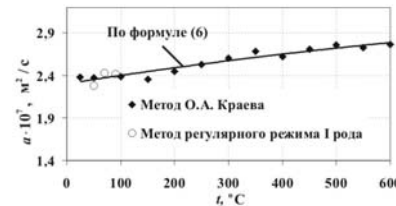


Рис. 2. Экспериментальная зависимость температуропроводности шихты от температуры

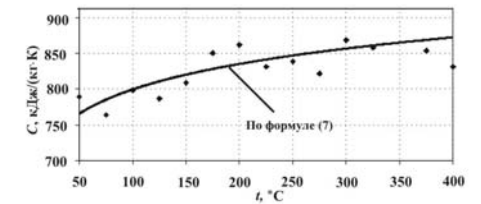


Рис. 3. Экспериментальная зависимость теплоемкости шихты от температуры

В третьей главе проведен численный анализ механизмов подвода тепла к форме и шихте на стадии нагрева до температуры спекания с учетом реальной геометрии объекта и температурных зависимостей теплофизических свойств шихты. Показан принцип выбора оптимальных температурных режимов нагрева с точки зрения равномерности прогрева шихты и последующего вспенивания пенообразующей смеси.

Для оценки механизмов подвода тепла к форме от газов печного пространства рассмотрена двумерная задача нагрева шихты в металлической форме, схематическое изображение которой приведено на рис. 4. Нагрев осуществляется до температуры спекания шихты, которая принимается равной 600 °С.

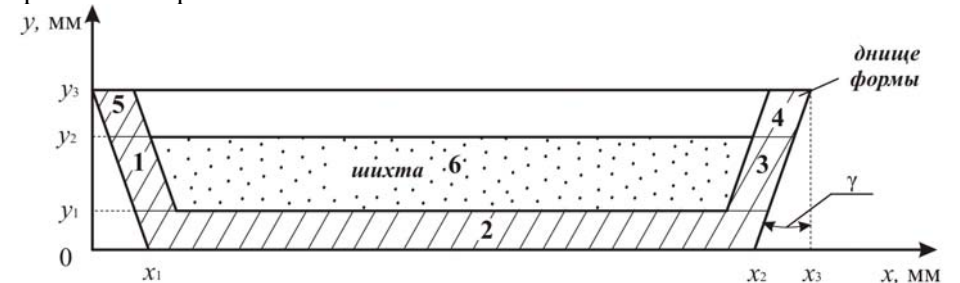


Рис. 4. Схема подвода тепла к шихте за счет конвекции и радиации

Подвод тепла к форме в печи осуществляется дымовыми газами, которые омывают ее снаружи. Рассмотрены все возможные механизмы подвода тепла: за счет только конвекции, только радиации и их совместного действия. В стенках формы тепло передается теплопроводностью. К шихте тепло подводится следующим образом (рис. 4): снизу и по бокам – за счет контакта со стенками формы (участки 1–3); сверху – от дымовых газов (участок 6).

При постановке задачи приняты следующие допущения:

1. На границах между стенками формы и шихты выполняется условие идеального теплового контакта.

2. Плотность шихты не зависит от температуры и остается постоянной на всем рассматриваемом интервале температур. Данное допущение объясняется тем, что, согласно экспериментальным данным, до температур спекания объем шихты практически не изменяется и лишь при спекании он уменьшается на 6...10 %.

Математическая постановка задачи включает уравнения теплопроводности для шихты и днища формы со следующими краевыми условиями: температура шихты и днища формы в начальный момент времени принималась равной 20 °С; на внешних границах системы задавались граничные условия третьего рода; на границах контакта между стенками днища формы и шихты – граничные условия четвертого рода. Решение задачи проведено численно, при этом величины y_i , x_i имели следующие значения в мм: $y_1=12$; $y_2=47$; $y_3=75$; $x_1=20$; $x_2=530$; $x_3=550$.

Таблица 1. Подведенное к шихте количество теплоты в зависимости от времени, температуры греющего газа и механизма подвода тепла

Время нагрева, с	$t_{\partial z}=400\text{ }^{\circ}\text{C}$			$t_{\partial z}=800\text{ }^{\circ}\text{C}$		
	$Q_{\partial z}^K$, кДж/кг	$Q_{\partial z}^P$, кДж/кг	$Q_{\partial z}^{K+P}$, кДж/кг	$Q_{\partial z}^K$, кДж/кг	$Q_{\partial z}^P$, кДж/кг	$Q_{\partial z}^{K+P}$, кДж/кг
100	8	10	16	16	62	68
600	43	57	81	89	262	280
1800	101	131	172	211	493	524
3600	155	194	241	327	629	644
7200	224	266	297	473	670	671

Для оценки вклада радиационной и конвективной составляющих в общем подводе тепла проведен анализ решения поставленной задачи

нагрева шихты в интервале температур печных газов 400...800 °С, для чего определено количество подведенного к шихте тепла, соответствующего различным моментам времени (табл. 1). Индексы K , P и $K+P$ обозначают конвективный, радиационный и конвективно-радиационный подводы тепла к шихте соответственно.

Из табл. 1 видно, что конвективная и радиационная составляющие соизмеримы по величине в исследуемом интервале температур. Поэтому при расчетах процессов нагрева стекольной шихты необходимо учитывать как конвективную, так и радиационную составляющие подвода тепла.

Реальная геометрия рассматриваемого объекта по сравнению с представленной на рис. 4, более сложная. Металлическая крышка формы и газовый объем над шихтой создают дополнительные термические сопротивления при передаче тепла от газов печного пространства к шихте. Поэтому для оценки влияния крышки формы на подвод тепла к шихте рассмотрена задача нагрева шихты, схематическое изображение которой приведено на рис. 5.

Подвод тепла к форме в печи осуществляется дымовыми газами, которые омывают ее снаружи, при этом учитываются как конвективная, так и радиационная составляющие подвода тепла. В стенках формы тепло передается за счет теплопроводности. Снизу и по бокам к шихте тепло подводится за счет контакта со стенками формы (участки 1–3).

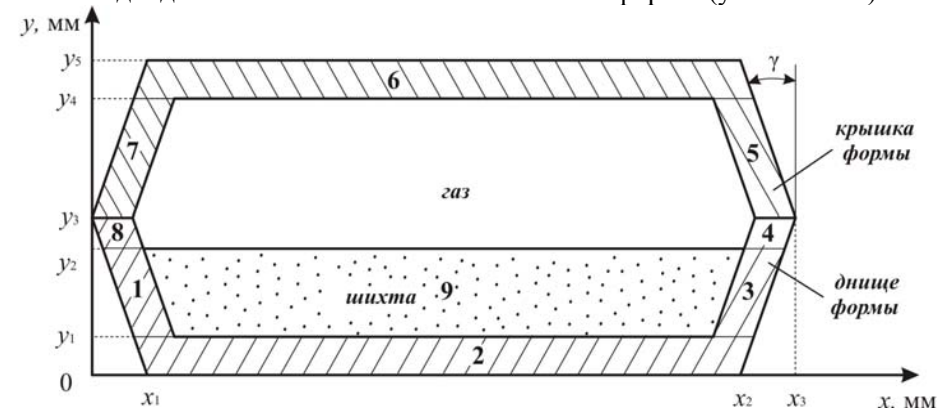


Рис. 5. Схема поперечного сечения металлической формы с шихтой

Механизм подвода тепла к верхней поверхности шихты не изучен, поэтому проведен анализ всех возможных процессов – теплопереноса теплопроводностью газа, конвекцией и тепловым излучением от

внутренних поверхностей формы, не испытывающих прямого контакта с шихтой (участки 4–8).

Математическая постановка задачи включает уравнения теплопроводности для шихты, крышки и днища формы, а также для газа, заключенного в полости между шихтой и формой в случае теплопереноса теплопроводностью этого газа с соответствующими краевыми условиями: температура всех элементов системы в начальный момент времени принималась равной 20 °С; на внешних границах днища и крышки формы задавались граничные условия третьего рода; на границах контакта между стенками днища формы и шихты – граничные условия четвертого рода; на внутренних границах крышки и днища формы, не испытывающих непосредственного контакта с шихтой, и верхней поверхности шихты – граничные условия третьего рода в случае теплопереноса конвекцией и излучением или граничные условия четвертого рода в случае теплопереноса теплопроводностью газа. Решение задачи проведено численно, при этом величины y_i , x_i имели следующие значения в мм: $y_4=148$; $y_5=150$.

Таблица 2. Подведенное к шихте количество теплоты в зависимости от времени, температуры греющего газа и механизма подвода тепла

Время нагрева, с	$t_{\partial z}=400\text{ }^{\circ}\text{C}$				$t_{\partial z}=800\text{ }^{\circ}\text{C}$			
	Q_0 , кДж/кг	Q_T , кДж/кг	Q_P , кДж/кг	Q_K , кДж/кг	Q_0 , кДж/кг	Q_T , кДж/кг	Q_P , кДж/кг	Q_K , кДж/кг
100	0,3	0,3	0,3	0,3	3,6	3,6	3,9	3,6
600	12	12	15	12	52	53	72	54
1800	54	55	74	56	230	239	357	239
3600	124	128	163	128	463	478	584	478
7200	228	233	259	233	636	644	667	644

Для оценки механизмов теплопереноса к верхней поверхности шихты проведен анализ решения поставленной задачи нагрева в интервале температур печных газов 400...800 °С, для чего определено количество подведенного к шихте тепла, соответствующего различным моментам времени (табл. 2). Полученные результаты сопоставлены с подведенным теплом, полученным при условии тепловой изоляции верхней поверхности шихты, т.е. когда тепло подводится только снизу и по бокам. Индексы 0, T, P и K обозначают подведенное к шихте тепло

при условии тепловой изоляции ее верхней поверхности, за счет теплопроводности газа, излучения от внутренних поверхностей формы и конвекции газа, соответственно.

По данным в табл. 2, сделан вывод о том, что подвод тепла к верхней поверхности шихты за счет теплопроводности и конвекции газа намного меньше подвода тепла за счет излучения от внутренней поверхности формы. Исходя из этого, при расчетах процессов нагрева стекольной шихты в форме без большой потери точности можно не учитывать конвективную и кондуктивную составляющие подвода тепла к шихте, а в качестве основного механизма теплопередачи от формы к шихте принять лучистый теплообмен.

Результаты, представленные в табл. 1 и 2 позволили сделать оценку дополнительного термического сопротивления, создаваемого крышкой формы. Из сопоставления $Q_{\partial \varepsilon}^{K+P}$ (табл. 1) и Q_P (табл. 2) видно, что крышка формы обладает достаточно большим термическим сопротивлением и при моделировании процесса нагрева шихты должна быть учтена.

По разработанной математической модели (рис. 5) с учетом конвективно-радиационного подвода тепла от дымовых газов к металлической форме и радиационного подвода тепла от внутренних поверхностей формы к верхней поверхности шихты проведен расчет температурных полей в шихте на стадии нагрева до температуры спекания по типовым режимам нагрева, используемым при производстве пеностекла, в которых температура греющих газов на стадии нагрева линейно изменяется от 400 до 800 °С за время 1...2 часа (обозначим их как режимы №1 и №2). Получено, что температура спекания достигается на поверхности слоя шихты, при этом температура центра слоя отстает от температуры поверхности на $\Delta t=65,45...130,40$ °С, соответственно.

Для оценки эффективности нагрева смеси до температуры спекания проведен анализ температурных полей в смеси на стадии порообразования с точки зрения равномерности вспенивания. Для этого, рассмотрен слой пенообразующей смеси толщиной $L/2=17,5$ мм (рис. 6 а), верхняя граница которого нагрета до температуры начала спекания 600 °С (температурное поле получено по типовым режимам нагрева). В процессе нагрева пенообразующая смесь проходит такие стадии как спекание (рис. 6. б), которое начинается при температуре смеси равной 600 °С и заканчивается при достижении температуры 670 °С, и порообразование (рис. 6 в), которое, в свою очередь, начинается по окончании спекания при 670 °С и продолжается до температуры спека

770 °С. Следует отметить, что спекание протекает с уменьшением объема за счет увеличения плотности, а вспенивание, наоборот, с увеличением объема за счет выделения газа в спеке и, как результат, снижения плотности. В конце процесса должен получиться равномерно вспененный слой пеностекла (рис. 6 г).

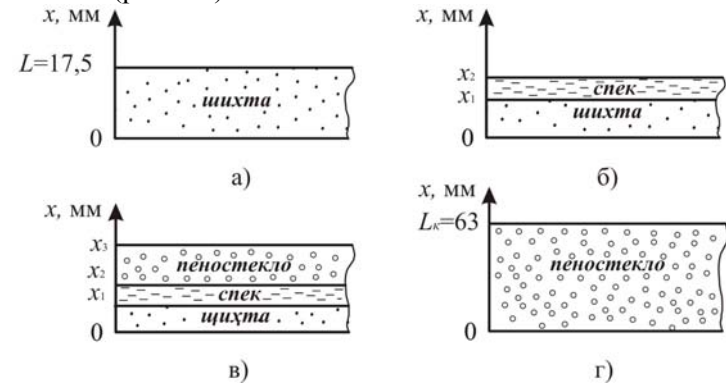


Рис. 6. Принципиальная схема структурных преобразований при производстве пеностекла: а) исходное состояние (шихта); б) спекание; в) порообразование; г) готовое пеностекло

Математическая постановка задачи включает уравнения теплопроводности для шихты, спека и пеностекла со следующими краевыми условиями: температурное поле в шихте в начальный момент времени задавалось по результатам расчета задачи нагрева шихты до температуры спекания (рис. 5); на внешней границе шихты задавались граничные условия третьего рода; на границах контакта между слоями шихты, спека и пеностекла – граничные условия четвертого рода, при этом x_1 , x_2 и x_3 – подвижные границы, скорости которых определялись выражениями:

$$0 < \tau < \tau_1, \quad x_1 = L / 2 - v_1 \cdot \tau, \quad x_2 = \left(1 - \frac{\bar{\rho}_{ш}}{\bar{\rho}_{cn}}\right)(L - v_1 \cdot \tau) + L \cdot \frac{\bar{\rho}_{ш}}{\bar{\rho}_{cn}}; \quad (5)$$

$$\tau > \tau_1, \quad x_1 = L - v_1 \cdot \tau; \quad x_2 = \left(1 - \frac{\bar{\rho}_{ш}}{\bar{\rho}_{cn}}\right)(L - v_1 \cdot \tau_1) + L \cdot \frac{\bar{\rho}_{ш}}{\bar{\rho}_{cn}} - v_2 \cdot (\tau - \tau_1),$$

$$x_3 = x_2 + v_2 \cdot (\tau - \tau_1) \cdot \frac{\bar{\rho}_{cn}}{\bar{\rho}_n}, \quad (6)$$

где $\bar{\rho}$ – средняя плотность, кг/м³; τ_1 – время начала процесса вспенивания (достижение температуры 670 °С на поверхности спека).

Данные эксперимента по спеканию пеностеклянных шихт показывают, что время спекания составляет $\tau_{сп} = 5$ мин. Исходя из этого, средняя скорость движения фронта спекания составит

$$v_1 = \frac{L / 2}{\tau_{сп}} = \frac{17,5}{300} = 0,0583 \text{ мм/с} = 5,83 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}. \quad (7)$$

Аналогично определена средняя скорость движения границы процесса вспенивания ($\tau_{вспен} = 60$ мин)

$$v_2 = \frac{L^*}{\tau_{вспен}} = \frac{14}{3600} = 0,0039 \text{ мм/с} = 3,90 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}. \quad (8)$$

Результаты решения задачи вспенивания для типовых режимов нагрева приведены в табл. 3.

Таблица 3. Температурные поля в пенообразующей смеси в момент времени $\tau_k = 65$ мин. при нагреве до температуры спекания по существующим режимам

Координата	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,063
Режим №1	642	643	649	662	682	709	786
Режим №2	672	672	677	688	705	728	789

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что в центральных слоях пенообразующей смеси по истечении 65 минут процесс вспенивания или только начинается, если нагрев ведется по режиму №2, либо не начинается вообще, если нагрев производится по режиму №1. Это объясняется тем, что температура в центре засыпки ниже температуры порообразования или незначительно превосходит ее. Поэтому поризация ядра смеси происходит на следующем этапе производства пеностекла – отжиге, что негативно сказывается на качестве получаемого пеностекла. Также сделан вывод, что более равномерный прогрев шихты на стадии ее нагрева до температуры спекания позволит получить более равномерное температурное поле в пенообразующей смеси и на этапе вспенивания. Исходя из анализа результатов, изложенных выше, сделано предположение, что выдержка шихты при постоянной температуре дымовых газов на уровне близком к температуре спекания не приведет к превышению температурой поверхности шихты температуры спекания и в то же время позволит получить более равномерный прогрев в целом.

Для оценки этого предположения проведен численный анализ режимов нагрева с линейным увеличением температуры на начальном этапе нагрева с последующей выдержкой при постоянной температуре

дымовых газов до момента начала спекания. При этом скорость увеличения температуры греющих газов на начальном участке принята равной 3,33 и 6,67 °С/мин., что соответствует типовым температурным режимам №1 и 2 (рис. 7).

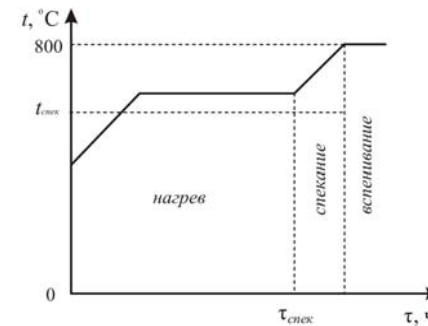


Рис. 7. Режим нагрева с линейным увеличением температуры на начальном этапе и последующей выдержкой при постоянной температуре дымовых газов до момента начала спекания

Таблица 4. Результаты численного решения задачи нагрева шихты до температуры спекания по режимам с выдержкой при постоянной температуре дымовых газов в интервале $t_{\partial c}=620...700$ °С (рис. 7)

Режим нагрева	$\tau_{спек}$, мин	$\tau_{выд}$, мин	$t_{мин}$, °С	Δt , °С	$\bar{t}$, °С
Скорость нагрева на начальном участке 3,33 °С/мин					
$t_{\partial c}=620$ °С	139	72	588	12	592
$t_{\partial c}=640$ °С	118	46	577	23	584
$t_{\partial c}=660$ °С	108	30	566	34	577
$t_{\partial c}=680$ °С	103	18	557	43	571
$t_{\partial c}=700$ °С	100	10	553	47	567
Скорость нагрева на начальном участке 6,67 °С/мин					
$t_{\partial c}=620$ °С	124	91	588	12	592
$t_{\partial c}=640$ °С	102	66	575	25	584
$t_{\partial c}=660$ °С	90	51	563	37	575
$t_{\partial c}=680$ °С	83	41	551	49	568
$t_{\partial c}=700$ °С	76	31	538	62	559

Результаты численного решения поставленной задачи представлены в табл. 4, где $\tau_{спек}$, $\tau_{выд}$ – время достижения температуры спекания и время выдержки шихты при постоянной температуре дымовых газов, соответственно, мин; $t_{мин}$, $\bar{t}$ – минимальная и средняя температуры шихты, °С; $\Delta t = t_{спек} - t_{мин}$.

Оценка эффективности нагрева шихты до температуры спекания по предлагаемым режимам (рис. 7) проведена аналогично тому, как это было сделано для типовых режимов (табл. 5).

Таблица 5. Температурные поля в пенообразующей смеси в момент времени $\tau_k=65$ мин при нагреве до температуры спекания по режимам с выдержкой при постоянной температуре дымовых газов в интервале $t_{\partial z}=620\dots 700$ °C

Координата	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,063
Скорость нагрева на начальном участке 3,33 °C/мин							
$t_{\partial z}=620$ °C	700	700	704	713	727	745	793
$t_{\partial z}=640$ °C	695	696	700	709	724	742	792
$t_{\partial z}=660$ °C	691	691	696	706	720	740	792
$t_{\partial z}=680$ °C	686	687	691	701	717	737	791
$t_{\partial z}=700$ °C	683	683	688	698	714	734	791
Скорость нагрева на начальном участке 6,67 °C/мин							
$t_{\partial z}=620$ °C	700	700	704	713	727	745	793
$t_{\partial z}=640$ °C	694	695	699	709	723	742	79
$t_{\partial z}=660$ °C	689	690	694	704	719	739	791
$t_{\partial z}=680$ °C	683	684	688	698	714	735	791
$t_{\partial z}=700$ °C	677	677	682	693	709	731	790

Полученные результаты свидетельствуют о том, что режимы нагрева шихты с линейным увеличением температуры дымовых газов на начальном этапе и последующей выдержкой при их постоянной температуре, близкой к температуре спекания, позволяют значительно улучшить качество прогрева, и, соответственно, качество получаемого пеностекла.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты и выводы по диссертационной работе заключаются в следующем:

1. Экспериментально исследованы температурные зависимости температуропроводности и теплоемкости пеностекольной шихты в интервале 25...600 °C и предложены функции, их аппроксимирующие:

$$a(t)=(-3,10\cdot 10^{-7}\cdot t^2+9,92\cdot 10^{-4}\cdot t+2,305)\cdot 10^{-7};$$

$$C(t)=-3\cdot 10^{-4}\cdot t^2+0,5354\cdot t+738,15.$$

Полученные результаты экспериментов подтверждены проверкой работы установки на эталонных образцах и использованием других экспериментальных методов.

2. Разработаны математические модели процессов нестационарного теплопереноса в системах «греющий газ – металлическая форма – пеностекольная шихта» при нагреве шихты до температуры спекания и «шихта – спек – пеностекло» на стадии образования пеностекла,

обеспечивающие теоретическое обоснование выбора эффективных температурных режимов печей, используемых при производстве пеностекла.

3. Обосновано, что при моделировании процессов теплоотдачи от греющих газов печного пространства к поверхности формы в системе «греющий газ – металлическая форма – пеностекольная шихта» необходимо учитывать как конвективную, так и радиационную составляющие подвода тепла, так как их вклад сравним по величине.

4. Установлено, что основным механизмом теплопереноса в газовой полости между шихтой и формой в системе «греющий газ – металлическая форма – пеностекольная шихта» является излучение от внутренней поверхности формы, по сравнению с которым конвективная и кондуктивная составляющие в газе малы.

5. Численным моделированием температурных полей в трехфазной системе «шихта – спек – пеностекло» в процессе образования пеностекла обосновано, что типовые температурные режимы нагрева шихты не являются эффективными с точки зрения равномерности прогрева к моменту начала спекания, так как из-за большой разницы температур между поверхностью и центром, получаемой при этих режимах, начало поризации в ядре пенообразующей смеси значительно отстает по времени от начала вспенивания поверхностных слоев спека.

6. Разработаны рекомендации по изменению параметров технологического режима цикла тепловой обработки шихты до температуры спекания, основанные на равномерности протекания процесса порообразования в слое пенообразующей смеси на стадии вспенивания при производстве пеностекла, которые могут существенно повысить качество выпускаемой продукции.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Городов Р.В., Кузьмин А.В. Оценка конвективной составляющей при нагреве шихты в печи в процессе производства пеностекла // Известия ТПУ. – 2008. – Т313. – №4. – С. 18-22.
2. Городов Р.В. Экспериментальное определение зависимости температуропроводности пеностекольной шихты от температуры // Известия ТПУ. – 2009. – Т314. – №4. – С. 24-30.
3. Городов Р.В., Кузьмин А.В. О некоторых проблемах производства пеностекла // Энергетика: экология, надежность, безопасность:

Материалы докладов XIII Всероссийской научно-тех. конф. – г. Томск, 2007. – С. 104-107.

4. Городов Р.В. Современное состояние производства пеностекла в России // Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах: Материалы докладов IV Всероссийской научной конференции молодых ученых и студентов. – г. Анапа, 2007. – С. 46-48.

5. Городов Р.В. О необходимости разработки математической модели производства пеностекла // Наука, технологии, инновации: Материалы Всерос. научной конф. молодых ученых в 7 частях. – г. Новосибирск, 2007. Часть 1, с. 76–80.

6. Городов Р.В., Кузьмин А.В. Современное состояние и пути увеличения производства пеностекла // Энергоэффективность и использование возобновляемых источников энергии – основные резервы энергетической безопасности регионов России: Материалы VIII Всерос. совещания. – г. Томск, 2007. – с.96-100

7. Городов Р.В., Кузьмин А.В. О необходимости разработки математической модели изготовления пеностекла // Современные техника и технологии: Труды XIV Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – г. Томск, 2008. – Т. 3. – С. 353–356.

8. Городов Р.В., Кузьмин А.В. Математическая модель процесса нагрева шихты при производстве пеностекла // Современные техника и технологии: Труды XIV Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – г. Томск, 2008. – 2008.-Т.3. – С. 356-359.

9. Городов Р.В., Раков Ю.Я., Шаганов С.А. Экспериментальное определение теплоемкости пеностеклянной шихты в зависимости от температуры // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов XIV Всероссийской научно-тех. конф. – г. Томск, 2008. – С. 128-131.

10. Городов Р.В., Кузьмин А.В. Математические модели нагрева шихты в процессе производства пеностекла // Высокие технологии, фундаментальные исследования, образование: Материалы докладов VII Международной научно-практ. конф. – г. Санкт-Петербург, 2009. – С. 321-322.

11. Городов Р.В., Кузьмин А.В. Анализ существующих режимов нагрева шихты в процессе производства пеностекла // Высокие технологии, фундаментальные исследования, образование: Материалы докладов VII Международной научно-практ. конф. – г. Санкт-Петербург, 2009. – С. 322-323.