

УДК 66-977

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЕНОСТЕКЛЬНОЙ ШИХТЫ Часть 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ

<sup>1</sup>С. В. Федосов, <sup>2</sup>М. О. Баканов

<sup>1</sup>Ивановский государственный политехнический университет,  
<sup>2</sup>Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
(г. Иваново)

*Аннотация.* В настоящее время внимание ученых привлекает математическое моделирование процессов термической обработки при получении пеностекла. При моделировании процессов термической обработки пеностекляной шихты необходимо учитывать процессы газообразования, испарения влаги и спекания частиц стекла, которые входят в исходную сырьевую смесь. Теоретической базой для моделирования процессов термической обработки, создания инженерных методов их расчета и оптимизации является теория теплопереноса, учитывающая взаимосвязь и взаимозависимость между тепловыми характеристиками обрабатываемого материала и источником высокой температуры.

В работе показаны особенности воздействия высокотемпературной обработки на пеностекляную шихту при ее термической обработке. Описаны физические механизмы изменения размеров пор в ходе вспенивания в зависимости от времени выдержки. Отмечено, что распределение температурных полей по пеностекляной шихте проходит от приповерхностных слоев засыпки шихты к центральной границе. Рассмотрен механизм образования пористой структуры в засыпке измельченного стекла при термической обработке материала. Варьирование временными показателями, составом шихты, количеством газообразователя на различных этапах производства пеностекла предполагает получение материалов с широким диапазоном физико-механических и теплоизоляционных параметров. Показано, что распределение температурных полей по пеностекляной шихте проходит от приповерхностных слоев засыпки шихты к центральной границе. Общим характерным признаком пеностекла как пористого тела является наличие пустот в твердом теле. Пустоты, как и скелет твердого тела, могут иметь сложную форму и различные геометрические размеры. Закономерности переноса тепла и вещества в капиллярно-пористых телах определяются структурными характеристиками тела. Сложность и разнообразие капиллярной структуры пористого пеностекла вызывает необходимость в создании адекватных математических моделей, способных учесть как физические, так и теплотехнические параметры при получении данного материала на всех этапах воздействия высоких температур в процессе термической обработки.

*Ключевые слова:* пеностекло; моделирование тепловых процессов; теплоизоляционный материал; температурные поля.

**Введение.** Складывающаяся экономическая ситуация и постоянно меняющиеся социальные условия предполагают последовательную адаптацию производителей строительных и теплоизоляционных материалов к динамически меняющимся условиям рынка. В настоящее время потребитель желает приобретать материалы не только с высокими конструктивными показателями, но и обладающие хорошей теплоизоляционной способностью и

декоративными свойствами. На рынке появляются композиционные материалы, сочетающие в себе как конструкционные, так и теплоизоляционные свойства (керамзитобетон, пенобетон, газобетон, пемзобетон, арболит, вермикулитбетон, перлитбетон, бетоны на основе пеностекла) [2]. Набирают популярность материалы на основе стекла, такие как пеностекло.

Наиболее рациональным и популярным

способом производства пеностекла в блоках является порошок, который дает возможность получать пеностекло с различной структурой и свойствами в зависимости от зернового состава порошков, вида и количества газообразователя, температуры и продолжительности процесса спекания [6].

Для получения пеностекла применяют мелкозернистый порошок. Чем меньше размер зерен спекаемого материала, тем равномерней структура пеностекла. Мелкозернистый порошок позволяет получать материал с малым объемным весом, низким коэффициентом теплопроводности и большой механической прочностью. На практике применяют порошок, тонкость помола которого определяется полным прохождением сквозь сито с 2500-6400 отв./см<sup>2</sup> [6].

Повышение до известного предела содержания газообразователя в шихте и, следовательно, увеличение газовой фазы при нагреве материала приводят к уменьшению объемного веса пеностекла. Однако при этом, как правило, повышается диаметр пор.

При введении газообразователя в количестве более 3-5 % по массе получается пеностекло с неравномерной крупнопористой структурой из-за высоких давлений, развиваемых газовой фазой при нагревании.

Пеностекляную массу спекают, как правило, при температуре 750-850 °С: чем выше температура спекания, тем меньше объемный вес материала. Объемный вес пеностекла изменяется также в зависимости от продолжительности процесса (при одной и той же температуре): чем длительней процесс (чем в большей мере разложился газообразователь), тем меньше объемный вес пеностекла [3].

Сказанное заставляет полагать, что порошок метод изготовления пеностекла дает возможность в весьма широких пределах регулировать процесс порообразования в спекаемой массе [5].

**Объект исследования.** В настоящее время внимание ученых привлекает математическое моделирование процессов термической обработки при получении пеностекла. Теоретической базой для моделирования процессов

термической обработки, создания инженерных методов их расчета и оптимизации является теория теплопереноса, учитывающая взаимосвязь и взаимозависимость между тепловыми характеристиками обрабатываемого материала и источником высокой температуры [1].

**Физическая модель.** При рассмотрении физических основ процесса необходимо учитывать, что тепловые характеристики будущего материала напрямую зависят от других физических параметров, которые меняются с течением времени и при изменении температуры. Безусловно, не стоит упускать тот момент, когда пеностекляная шихта до воздействия на нее необходимых температур является пористой средой, в которой порами выступают микропространства, не заполненные измельченным стеклом и газообразователем. Немаловажен и тот факт, что перенос тепла в измельченной пеностекляной шихте происходит следующими путями: теплопроводностью через твердую и газообразную фазы, в частности теплопроводностью через твердую и газообразную фазы последовательно или параллельно, и радиацией между поверхностями твердых частиц [7-9].

Пеностекляная шихта, засыпанная в металлическую форму для вспенивания, представляет собой хаотическую структуру, что вызывает определенные трудности при математическом описании, поэтому необходимо эту модель заменить упорядоченной, которая будет отражать все основные особенности исходной структуры [3].

Необходимо описать процессы, происходящие при постепенном нагревании пеностекляной шихты.

Существующая влага в пеностекляной шихте начинает испаряться и выходить из пеностекляной шихты в камеру печи вспенивания. При значениях температуры в камере печи близких к значениям, при которых начинается плавление зерен стекла, первыми начинают оплаиваться приповерхностные слои, те, которые находятся при непосредственном контакте с металлическими гранями формы для вспенивания, и несколько позже

(по времени) – слой, который прогревается за счет конвекции [4]. Происходит процесс приповерхностного оплавления пеностеклольной шихты – центральные области материала все еще не прогреты (из-за низкой теплопроводности окружающего материала). Вследствие этого источники газовой выделения в порах, которые находятся ближе к геометрическому центру относительно формы вспенивания (центр засыпки шихты), не работают, тогда как окружающий этот центр материал шихты уже вспенивается и в нем продолжается увеличение радиуса пор. Таким образом, материал шихты по порообразованию формируется неравномерно, что сказывается на теплофизических свойствах конечного продукта.

В случаях, когда время выдержки пеностеклольной шихты при вспенивании недостаточное, для того чтобы зерна стекла оплавившись по всему объему материала, в центральной границе засыпки стекловидные зерна не успевают оплавиться, и тем самым центр материала остается не поризованным. Когда время вспенивания значительно превышает время плавления зерен стекла, происходит спекание приповерхностных слоев засыпки так как источники газообразования посредством прогрева полностью выгорают, вязкость стекла уменьшается и поверхностное напряжение не позволяет задержать выделенную газовую фазу в образовавшихся сферах пор, которая выходит в камеру печи для вспе-

нивания. В таких случаях центр материала становится более поризованным, чем в приповерхностных слоях шихты.

Учитывая вышеизложенное, предполагаем, что распределение температурных полей по пеностеклольной шихте проходит от приповерхностных слоев засыпки шихты к центральной границе.

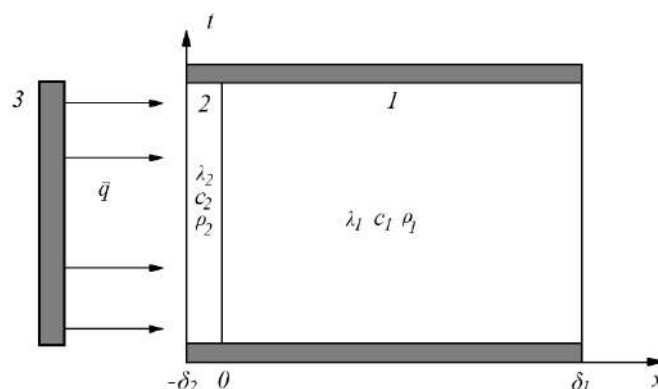
**Цель исследования** состоит в том, чтобы найти и описать распределение температурных полей в объеме пеностеклольной шихты с учетом изменения коэффициента теплопроводности вследствие постепенного формирования пористой структуры шихты от периферии (приповерхностных слоев) к центру –  $a(t, x, y, z)$ .

Достичь эту цель можно по двум сценариям:

а) построение математической модели распределения температурных полей с учетом теоретической зависимости меняющегося со временем и координатами коэффициента теплопроводности при заданных начальных и граничных условиях;

б) построение математической модели распределения температурных полей при компьютерном моделировании меняющегося со временем и координатами коэффициента теплопроводности  $a(t, x, y, z)$  при определенных начальных и граничных условиях.

Схематично процесс можно представить в виде рисунка.



**Иллюстрация модели термообработки:** 1 – пеностеклольная шихта, 2 – стенка формы для вспенивания, 3 – источник излучения,  $\delta_1$  – слой материала с половиной толщины засыпки

Система «стенка формы для вспенивания и масса пеностеклольной шихты» (см. рисунок) может быть представлена двумя находящимися в контакте неограниченными пластинами,

каждая из которых характеризуется своими размерами: слой материала с половиной толщины засыпки  $\delta_1$  находится в контакте со стенкой формы  $\lambda \delta_2$  (см. рисунок) и свойствами: теплопроводностями  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , теплоемкостями  $c_1$  и  $c_2$  и плотностями  $\rho_1$  и  $\rho_2$  соответственно. Индекс «1» относится к пеностеклянной шихте, индекс «2» – к стенке формы.

**Заключение.** При моделировании тепловых процессов термической обработки пеностеклянной шихты немаловажную роль играет выбор системы координат при моделировании процесса термообработки, так как, исходя от постановки задачи, от этого зависит ее решение в целом. Например, при рассмотрении пеностеклянной шихты как однородной среды с заданными свойствами и моделировании тепловых процессов необходимо использовать декартову систему координат  $x, y, z$ , а при моделировании тепловых процессов внутри пористой структуры шихты – уже сферические координаты  $r, \varphi, \theta$ , где  $r$  – радиус поры,  $\varphi$  – долгота,  $\theta$  – полярный угол. Безусловно, решение каждой краевой задачи при заданных граничных условиях является лишь частным случаем во всем многообразии физико-химических процессов, протекающих при термической обработке пеностеклянной шихты.

В настоящее время внимание инженеров и исследователей направлено на математическое моделирование различных этапов технологических процессов при производстве различных строительных и теплоизоляционных материалов. Безусловно, при адекватных моделях становится возможным регулировать процесс получения материалов на любом этапе производственного цикла.

При моделировании процессов термической обработки пеностеклянной шихты используются различные математические модели, поскольку общим характерным признаком пеностекла как пористого тела является наличие пустот в твердом теле. Пустоты, как и скелет твердого тела, могут иметь сложную форму и различные геометрические размеры. Закономерности переноса тепла и вещества в капиллярно-пористых телах определяются структурными характеристиками тела. Сложность и разнообразие капиллярной структуры пористого пеностекла вызывает необходимость в создании адекватных математических моделей, способных учесть как физические, так и теплотехнические параметры при получении данного материала на всех этапах воздействия высоких температур при его получении.

#### Список литературы

1. Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы теории теплопроводности: учебное пособие для вузов. Ч. 2. М.: Высш. шк. 1982. 304 с.
2. Вишневецкий А. А., Гринфельд Г. И., Смирнова А. С. Производство автоклавного газобетона. Итоги 2015 года. Прогноз на 2016 год // Строительные материалы. 2016. № 5. С. 4-9.
3. Демидович Б. К. Пеностекло. Минск: Наука и техника, 1975. 247 с.
4. Романков П. Г., Фролов В. Ф. Теплообменные процессы химической технологии. Л.: Химия, 1982. 288 с.
5. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М., 1980. 248 с.
6. Спиридонов Ю. А., Орлова Л. А. Проблемы получения пеностекла // Стекло и керамика. 2003. № 10. С. 10–11.
7. Математическая модель динамики процесса порообразования при термической обработке пеностеклянной шихты / С. В. Федосов, М. О. Баканов, А. В. Волков и др. // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2014. Т. 57, вып. 3. С. 73–79.
8. Федосов С. В., Кисельников В. Н., Шертаев В. У. Применение методов теории теплопроводности для моделирования процессов конвективной сушки. Алма-Ата: Гылым, 1992. 167 с.
9. Федосов С. В. Процессы термической обработки дисперсных материалов с фазовыми и термическими превращениями: дис. ... д-ра техн. наук. Ленинград, 1987. 350 с.

#### Информация об авторах

*ФЕДОСОВ Сергей Викторович* – доктор технических наук, академик РААСН, президент Ивановского государственного политехнического университета, г. Иваново. Область науч-

ных интересов – разработка новых строительных материалов на базе прогрессивных энерго- и ресурсосберегающих технологий с использованием техногенных отходов, термическая обработка материалов в технологических процессах. Автор более 350 публикаций.

*БАКАНОВ Максим Олегович* – кандидат технических наук, начальник кафедры, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново. Область научных интересов – моделирование тепловых процессов при производстве пористых материалов. Автор около 40 публикаций.

---

UDC 66-977

## **DEVELOPING AN INTEGRATED APPROACH TO MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMAL PROCESSING FOAM GLASS CHARGE**

### **Part 1. OF THE PHYSICAL IDEAS ABOUT THE PROCESS**

<sup>1</sup>*S. V. Fedosov, <sup>2</sup>M. O. Bakanov*

<sup>1</sup>*Ivanovo State Polytechnic University,*

<sup>2</sup>*Ivanovo Fire and Rescue Academy of SFS of EMERCOM of Russia,  
(Ivanovo)*

*Abstract.* Currently, the scientists focus on mathematical modeling of thermal processing upon receipt of the foam glass. In modeling of thermal processing foam glass charge must be considered as the process of gassing, evaporation and sintering of the glass particles, which are the original raw mixture. The theoretical basis for the simulation of heat treatment, engineering methods of their calculation and optimization is the theory of heat transfer, taking into account the interrelationship and interdependence between the thermal characteristics of the processed material and a source of high temperature.

The work demonstrates the characteristics of the impact of high temperature treatment on the foam glass batch mixture by its heat treatment. Describes the physical mechanisms of change of pore sizes during the foaming depending on the exposure time. It is noted that the distribution of temperature fields in the foam glass material is from the surface layers of the filling of the charge to the Central border. The mechanism of formation of porous structure in the filling of glass during heat treatment of the material, the variation of the time values, the composition of the charge, the amount of blowing agent in the various stages of manufacture of foam glass involves getting materials with a wide range of physical-mechanical and insulating parameters. It is shown that the distribution of temperature fields in the foam glass material is from the surface layers of the filling of the charge to the Central border.

As a common feature of foam glass as a porous body is the presence of voids in the solid body. Emptiness, like the skeleton of a rigid body can have a complex shape and different geometric dimensions. Laws of transfer of heat and substances in capillary-porous bodies are determined by the structural characteristics of the body. The complexity and diversity of the capillary structure of the porous foam glass necessitates the creation of adequate mathematical models able to take into account both physical and thermotechnical parameters when receiving this material at all stages of exposure to high temperatures in the heat treatment process.

*Keywords:* foam glass; modeling of thermal processes; thermal insulation material; temperature field.

#### REFERENCES

1. Belyaev N. M., Ryadno A. A. *Metody teorii teploprovodnosti: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Theory of thermal conductivity: students' manual], ch. 2, Moscow: Vyssh. shk., 1982, 304 p.
2. Vishnevskiy A. A., Grinfeld G. I., Smirnova A. S. *Proizvodstvo avtoklavного gazobetona. Itogi 2015 goda. Prognoz na 2016 god* [Production of autoclaved aerated concrete. 2015 in review. Prognosis for 2016], *Stroitelnye materialy* [Construction materials], 2016, No. 5, pp. 4-9.

3. Demidovich B. K. Penosteklo, Minsk: Nauka i tekhnika, 1975, 247 p.
4. Romankov P. G., Frolov V. F. Teploobmennyye protsessy khimicheskoy tekhnologii [Heat exchange processes of the chemical technology], Leningrad: Khimiya, 1982, 288 p.
5. Rudobashta S. P. Massoperenos v sistemakh s tverдой fazoy [Mass-transfer in systems with solid phase], Moscow, 1980, 248 p.
6. Spiridonov Yu. A., Orlova L. A. Problemy polucheniya penostekla [Problems of sponge-glass production], *Steklo i keramika* [Glass and ceramics], 2003, No.10, pp. 10–11.
7. Fedosov S. V., Bakanov M. O., Volkov A. V. et al. Matematicheskaya model dinamiki protsessa poroobrazovaniya pri termicheskoy obrabotke penostekolnoy shikhty [Mathematical model of the dynamics of the process of pore formation under thermal processing of foam glass mixture], *Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Bulletin of higher education institutions. Chemistry and Chemical Technology], 2014, T. 57, vyp. 3, pp. 73–79.
8. Fedosov S. V., Kisel'nikov V. N., Shertaev V. U. Primenenie metodov teorii teploprovodnosti dlya modelirovaniya protsessov konvektivnoy sushki [Implementing the theoretical methods of heat transmission in order to model the processes of convective drying], Alma-Ata: Gylym, 1992, 167 p.
9. Fedosov S. V. Protsessy termicheskoy obrabotki dispersnykh materialov s fazovymi i termicheskimi prevrashcheniyami: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Processes of heat treat of particulates with phase and thermal transformations: Doctor of Technical Sciences diss.], Leningrad, 1987, 350 p.

#### Information about the authors

*FEDOSOV Sergey Viktorovich* – Doctor of Technical Sciences, Academician of RAACS, President of the Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo. Scientific interests – development of new building materials based on progressive energy and resource saving technologies using industrial wastes, heat treatment of materials in technological processes. Author of over 350 publications.

*BAKANOV Maxim Olegovich* – Candidate of Technical Sciences, Head of Ivanovo Fire and Rescue Academy of SFS of EMERCOM of Russia, Ivanovo. Scientific interests – modelling of thermal processes in production of porous materials. Author of about 40 publications.

#### Библиографическая ссылка

Федосов С. В., Баканов М. О. Разработка комплексного подхода к математическому моделированию процесса термической обработки пеностекольной шихты. Ч. 1: Физические представления о процессе // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – № 2. – С. 95-100.