

*Розглядається зміна енергії Гіббса в момент виникнення пори. Виводяться умови існування пори, час виникнення пори і знайдена ймовірність виникнення пори. Також наводяться експериментальні дослідження швидкості пороутворення і швидкості росту пор глиноземистих матеріалів. Отримані результати застосовні для таких теплоізоляційних матеріалів як керамзит і вогнетриви, а також інших матеріалів на основі глинозему*

*Ключові слова: пори, пориста система, швидкість пороутворення, енергія Гіббса, глинозем, керамзит, вогнетриви*

*Рассматривается изменение энергии Гиббса в момент возникновения поры. Выводятся условия существования поры, время возникновения поры и найдена вероятность возникновения поры. Также приводятся экспериментальные исследования скорости порообразования и скорости роста пор глиноземистых материалов. Полученные результаты применимы для таких теплоизоляционных материалов как керамзит и огнеупоры, а также прочих материалов, на основе глинозему*

*Ключевые слова: поры, пористая система, скорость порообразования, энергия Гиббса, глинозем, керамзит, огнеупоры*

УДК 53.09, 536.4.033, 536.416, 66.040.262

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.66033

# ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СКОРОСТИ РОСТА ПОР ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГЛИНОЗЕМА

**А. А. Чейлытко**

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра теплоэнергетики

Запорожская государственная

инженерная академия

пр. Ленина, 226,

г. Запорожье, Украина, 69006

E-mail: cheylitko@yandex.ua

## 1. Введение

Изучение энергетических процессов в пористых материалах является отдельным направлением для теплофизики и теплоэнергетики, так как благодаря своей структуре в них происходят довольно сложные тепломассообменные процессы, которые до сих пор являются недостаточно изученными. Существующие теории для частных случаев и полуэмпирические зависимости не охватывают всю область и все разнообразие пористых материалов.

Для энергетики наиболее интересными для рассмотрения из всего множества пористых материалов является тепловая изоляция. От теплофизических характеристик тепловой изоляции зависит эффективность энергосберегающих мероприятий и технологий. Из множества тепловой изоляции следует выделить среднетемпературную и высокотемпературную изоляцию, которую используют как в строительстве, так и в металлургическом производстве – это материалы на основе глинозема и силикаты. В данных материалах пористость существенно влияет на теплофизические характеристики [1, 2]. Но пористость – это не единый параметр, а целый комплекс параметров. Так, при одинаковой общей пористости, но при различном их количестве теплопроводность материала будет различной [3].

Актуальность работы определяется изучением кинетики изменения пористости, благодаря чему можно

создать базу для разработки новых высокоинтенсивных технологий в различных областях промышленности, в частности технологию производства теплоизоляционных материалов на основе глинозема.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Существуют как различные подходы к пористости, так и разнообразная классификация пор [3, 4]. Но для получения необходимых теплофизических свойств материала важно уметь прогнозировать изменение, как самой пористости, так и количества пор. Так, в [3] описывается уравнение, которое аналитически позволяет посчитать количество центров порообразования в необходимый момент времени. Но данное уравнение включает в себя энергию активации центров порообразования, которую можно определить только из кинетических опытов. Метод проведения кинетических экспериментов для нахождения энергии активации порообразования не описывается.

В [5] дано описание пористой структуры материала, позволяющее математически описать теплофизические процессы, протекающее в нем. Но автором не рассмотрена возможность управления пористой структурой.

В [6] рассматривается пористая структура силиката углерода (SiC) в керамических изделиях. Показаны

основные реакции получения силиката углерода и зависимость пористости полученного керамического изделия от синтеза исходных компонентов. В статье [6] снимками предоставляется полученная структура материала и ее пористость, но при одинаковой пористости можно наблюдать абсолютно разную структуру. Также показана зависимость теплопроводности от пористости. Из показателей пористой структуры кроме общей пористости рассматривается только однородность расположения и формы пор.

В [7] авторами рассматривается математическая модель роста парового пузырька в неограниченном пространстве. Теоретически, данную модель можно использовать при вспучивании керамзита парами воды. Но экспериментальных подтверждений этому нет.

В работе [8] были получены керамзитобетоны с различной структурой пор, которая получалась путем вариаций состава исходной смеси и температуры термообработки. В работе [9] керамзит подвергался воздействию тепла с использованием стандартной температурной кривой по ISO-834 и исследовалась полученная структура. Тем не менее, авторы не привели четкой закономерности влияния температуры и состава исходной смеси на получаемую пористую структуру.

В [10] предложено математическое описание пористой структуры в трехмерном пространстве. Автор исследует диффузионные и микроконвективные токи в пористом материале. Предложенный метод не учитывает ни размеры пор, ни их форму. К тому же автор не рассматривает пути создания данной пористой структуры.

В [11] проведены исследования по влиянию давления в порах на эластомеры с закрытой пористостью. Рассмотрено изменение давления в порах при различных гидростатических нагрузках и показано, что это давление может существенно изменить макроскопическую реакцию и стабильность эластомеров с закрытой пористостью. Однако во время исследования не было предложено способа расчета давления в порах и за первоначальное давление было принято давление окружающей среды. Также принято, что давление в порах является функцией только плотности.

В [12] изучено изменение структуры с закрытой пористостью под воздействием сжатия и растяжения при различных начальных давлениях в порах. Результаты эксперимента показали, что давление в порах положительно влияет при сжатии и отрицательно при растяжении. Но не было рассмотрено методов достижения тех или иных давлений в порах материала и способа их расчета.

В [13] показано, что пористость положительно влияет даже на металлические сплавы, но отсутствует методология управления пористостью.

На основании анализа литературы, можно сделать вывод о том, что расчет скорости порообразования и скорости роста пор во вспучивающихся материалах является нерешенным. Также отсутствует математическое решение расчета термодинамических параметров состояния газа внутри замкнутой поры. Данные проблемы не дают возможности управлять теплофизическими свойствами материала, на основе глинозема, при его формировании.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследования скорости образования новых пор и исследование скорости роста данных пор в теплоизоляционных материалах на основе глинозема.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- нахождение условий существования поры;
- аналитическое нахождение времени возникновения поры;
- определение общих зависимостей изменения количества пор и пористости при вспучивании материалов, на основе глинозема;
- составление математической модели, которая описывает изменение количества пор в материале на основе глинозема.

### 4. Критический радиус ядра сферической поры и условия роста поры

Энергия Гиббса системы материал–пора при порообразовании будет изменяться на величину  $\Delta G$ . Данная величина будет состоять из двух членов, первый из которых равняется произведению разности химических потенциалов нового и первоначального газа на количество образующегося агента-порообразователя. Второй член уравнения обусловлен поверхностной энергией.

$$\Delta G = (\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)}) \cdot M^{(1)} + \sigma \Omega,$$

где  $\Delta G$  – масса агента-порообразователя;  $\Omega$  – наружная поверхность порообразователя;  $\varphi^{(1)}$  – химический потенциал порообразующего газа; индекс (1) относится к газовой поре; индекс (pre) относится к агенту-порообразователю.

Для сферической частицы

$$\Delta M^{(1)} = \frac{4}{3} \pi r^3; \Omega = 4\pi r^2.$$

Поэтому

$$\Delta G = \frac{4\pi}{3} (\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)}) \frac{r^3}{v^{(1)}} + 4\pi \sigma r^2. \quad (1)$$

Продифференцируем уравнение изменения энергии Гиббса по радиусу и приравняем уравнение к нулю

$$(\varphi_{\infty}^{(1)} - \varphi_{\infty}^{(pre)}) \frac{\left(\frac{r_{kr}^{(1)}}{v^{(1)}}\right)^2}{v^{(1)}} + 2\sigma r_{kr}^{(1)} = 0.$$

В данном уравнении приняты значения химических потенциалов веществ при бесконечном радиусе (при линейном разделе фаз) для того, что бы вынести их за знак дифференцирования.

Значение критического радиуса будет равняться

$$r_{kr}^{(1)} = \frac{2\sigma v^{(1)}}{\varphi_{\infty}^{(pre)} - \varphi_{\infty}^{(1)}},$$

где  $\varphi_{\infty}^{(pre)}$  – химический потенциал исходного материала агента-порообразователя;  $\varphi_{\infty}^{(1)}$  – химический потенциал агента-порообразователя вне поры.

Если в исходном материале образываается зародыш поры радиусом  $r_{kr}^{(1)}$ , то он будет находиться в

равновесии с окружающим его материалом. Давление газа агента-порообразователя будет меньше давления того же газа в окружающей среде и меньше давления оказываемого окружающим материалом [2]. Это означает, что состояние равновесия будет метастабильным. Без подвода внешней энергии к поре или уменьшения тензора напряжения зародыш поры исчезнет – будет поглощён материалом.

При  $r^{(i)} > r_{kr}^{(i)}$  возможны несколько вариантов развития.

Первая возможность, если  $\phi^{(i)} - \phi^{(pre)} < 0$  и  $r$  мало, то второй член в выражении (1) будет преобладать. При дальнейшем росте  $r$ ,  $\Delta G$  будет возрастать, т. е. образование зародыша поры очень малого размера будет приводить к возрастанию энергий Гиббса. Возрастание  $\Delta G$  будет продолжаться до тех пор, пока первый и второй члены в выражении для  $\partial G / \partial r$  не сравняются, т. е. пока  $r$  не достигнет такого значения  $r = r_{kr}^{(i)}$ , при котором энергия Гиббса достигает максимума, а при  $r > r_{kr}^{(i)}$  убывает. Сказанное схематически отображено на рис. 1.

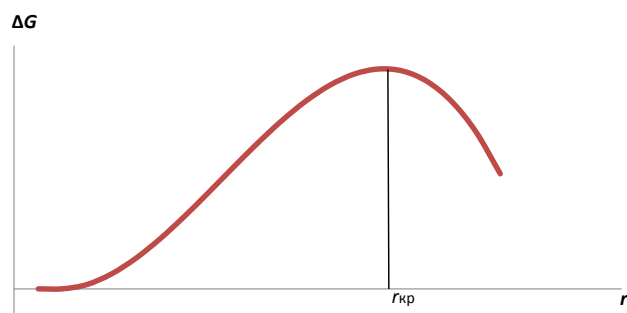


Рис. 1. Изменение энергии Гиббса  $\Delta G$  от радиуса  $r$  при  $\phi^{(i)} - \phi^{(pre)} < 0$  и малом радиусе

Вторая возможность – при  $\phi^{(i)} - \phi^{(pre)} > 0$ , тогда при любых значениях  $r$  энергия Гиббса возрастает, и система стремится поглотить пору.

В любом случае, если изначальный размер возникшего зародыша менее чем  $r_{kr}^{(i)}$ , то данный зародыш не может существовать в течение длительного времени и будет быстро уменьшаться в своих размерах до полного исчезновения.

Для существования поры необходимо, чтобы  $\phi^{(i)} - \phi^{(pre)} < 0$ . При этом критический радиус прямо пропорционален коэффициенту поверхностного натяжения, т. е. пора в исходной смеси с большей вероятностью возникнет в местах с малым поверхностным натяжением (данные области могут образовываться за счет флуктуаций плотности).

## 5. Работа образования поры и время возникновения ядра поры

Работа обратимого образования сферического ядра поры  $l_{min}^{(i)}$  в условиях  $T = \text{const}$ ,  $V = \text{const}$

$$l_{min}^{(i)} = -\left(p^{(i)} - p\right) \frac{4}{3} \pi r^{(i)3} + 4\pi r^{(i)2} \sigma.$$

До образования ядра объем исходной фазы был равен  $V + V^{(i)} \left( V^{(i)} = \frac{4}{3} \pi r^{(i)3} \right)$ , а давление  $p$ ; после образования зародыша объем остался тот же, а давление в

той области пространства, где появился зародыш, стало равным  $p^{(i)}$ , т. е. уменьшилось на  $p - p^{(i)}$ . Соответственно этому была затрачена работа  $-\int V^{(i)} dp = -\left(p^{(i)} - p\right) \frac{4}{3} \pi r^{(i)3}$ , кроме того, в выражение  $l_{min}^{(i)}$  вошла поверхностная энергия  $4\pi r^{(i)2} \sigma$ .

Так как по [2]

$$p^{(i)} - p = \frac{2\sigma}{r^{(i)}},$$

то выражение для  $l_{min}^{(i)}$  приводится к виду

$$l_{min}^{(i)} = \frac{4}{3} \pi \sigma r^{(i)2}.$$

Как видно из уравнения работа по возникновению ядра пор и работа роста поры различны.

Работа образования ядра поры критического размера будет равняться

$$l_{kr}^{(i)} = \frac{16}{3} \pi \sigma^2 \frac{v^{(i)}}{\phi_{\infty}^{(pre)} - \phi_{\infty}^{(i)}},$$

или учитывая, что  $r^{(i)} = \frac{2\sigma}{p^{(i)} - p}$

$$l_{kr}^{(i)} = \frac{16}{3} \pi \frac{\sigma^3}{\left(p_{kr}^{(i)} - p\right)^2}.$$

Частота спонтанного возникновения ядра может быть представлена в виде [2]

$$J = N_1 \cdot B \cdot e^{-\frac{l_{kr}^{(i)}}{k_B \cdot T}},$$

где  $N_1$  – число молекул агента-порообразователя в единице объема;  $B$  – кинетический множитель, неоделенный авторами;  $\frac{l_{kr}^{(i)}}{k_B \cdot T}$  – относительная высота барьера свободной энергии при зародышеобразовании, данный член уравнения можно рассматривать как параметр устойчивости материала порообразованию.

Время обнаружения ядра поры можно представить в виде

$$\tau_s = \bar{\tau}_3 + \tau_p,$$

где  $\tau_s$  – время наблюдения;  $\bar{\tau}_3$  – среднее время ожидания зародыша поры;  $\tau_p$  – время релаксации системы, обусловленное генезисом пор.

Так как частота возникновения ядер пор это количество ядер, возникшее в единицу наблюдаемого времени, то

$$\bar{\tau}_3 = \frac{n_{пор}}{N_1 \cdot B \cdot e^{-\frac{l_{kr}^{(i)}}{k_B \cdot T}}} - \tau_p. \quad (2)$$

В данном уравнении неизвестным остается кинетический множитель  $B$ , который необходимо найти эмпирически.

## 6. Вероятность возникновения поры из зародыша критического радиуса

Введем параметр вероятности образования поры из зародыша –  $P$ , и под ним будем понимать число по-

явления пор  $k$  в единицу времени, отнесенное к числу зародышей  $n_{\text{pore}}$ .

$$p = \frac{k}{\Delta\tau \cdot n_{\text{pore}}}.$$

Согласно биномиальному распределению, вероятность того, что  $k$  зародышей пор станет порами, описывается уравнением

$$P(k) = C_n^k \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k},$$

где  $C_n^k$  – биномиальный коэффициент,

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}.$$

Введем обозначения  $p \cdot n = w$  – математическое ожидание. Это последовательность появления пор во времени, которая составляет поток порообразования. Физический смысл – плотность вероятности возникновения пор, т. е. предел отношения вероятности возникновения хотя бы одной поры во временном интервале, к этому интервалу

$$w(\tau) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{P(\tau, \tau + \Delta\tau)}{\Delta\tau}.$$

Вероятность того, что зародыш критического радиуса самоликвидируется, будет  $q=1-p$ .

Так как в поставленной задаче необходимо достичь условия наибольшего перехода зародыша в пору, то самоликвидация зародыша отвечает требованиям распределения Пуассона и, используя его, получим

$$Q(k) = \frac{w_0^k}{k!} e^{-w_0},$$

где  $w_0$  – математическое ожидание самоликвидации зародыша  $w_0 = q \cdot n$ .

По условиям распределения Пуассона  $w_0 = \text{const.}$  Для данных условий вероятность образования  $k$  пор из  $n$  зародышей критического радиуса будет равна

$$P(k) = 1 - \frac{w_0^k}{k!} e^{-w_0}.$$

из этого, появление хотя бы одной поры за время  $\tau$  будет равно

$$\int_{Q(0)}^{Q(\tau)} \frac{dQ(\tau)}{Q(\tau)} = \int_0^\tau -w_0 d\tau,$$

$$\ln Q(\tau) = -w_0 \tau,$$

$$Q(\tau) = e^{-w_0 \tau},$$

или

$$P(\tau) = 1 - e^{-w_0 \tau}.$$

Данные уравнения дают возможность предсказать вероятность появления необходимого количества пор при наличии статистических данных (матрицы возникновения пор). Другими словами, можно спрогнозировать пористость материала (с определенной погрешностью) при наличии базы наблюдений порообразования в данном материале.

## 7. Результаты и анализ эксперимента по определению пористости и количества пор во вспучивающемся материале на основе глинозема

Эксперимент проходил следующим образом. В пронумерованную сухую керамическую тару насыпали влажную исходную смесь, после чего подвергли смесь термообработке в муфельной печи при различных температурных режимах для выявления энергии активации порообразования за счет образовавшихся газов. Температуры выбраны 120 °С и 200 °С. Было выбрано два образца на основе глинозема. Оба образца насыщались влагой примерно до 30 %. Основой первого образца послужила смесь глины с шамотом, а второго – глина, шамот и пластификатор. В каждом случае один образец подвергается сушке при комнатной температуре (без вспучивания образца) и его пористость и объем принимаются за начальные. Также по одному образцу отбирается из печи через 3, 5, 10, 15 и 20 минут после начала термообработки. Константа скорости порообразования и константа роста пористости находилась для каждого момента времени, а после находились их среднее значение. Количество пор считалось на площади 9 мм<sup>2</sup>.

В табл. 1, 2 представлены результаты эксперимента. Количество испарившейся влаги определялось косвенным методом.

Таблица 1

Количество пор и пористость образца №1 в зависимости от времени термообработки

$\tau$ , min	$t$ , °C					
	120			200		
	$n$ , пс/9 мм <sup>2</sup>	$P/P_0$ , %	$W_{\text{ev}}$ , %	$n$ , пс/9 мм <sup>2</sup>	$P/P_0$ , %	$W_{\text{ev}}$ , %
3	13	1,05	6,98	23	1,1	20,59
5	9	1,08	15,24	21	1,12	26,72
10	8	1,01	27,73	18	1,13	27,11
15	7	1,011	30,01	10	1,15	30,01
20	5	1,01	30,01	9	1,17	30,01

Таблица 2

Количество пор и пористость образца №2 в зависимости от времени термообработки

$\tau$ , min	$t$ , °C					
	120			200		
	$n$ , пс/9 мм <sup>2</sup>	$P/P_0$ , %	$W_{\text{ev}}$ , %	$n$ , пс/9 мм <sup>2</sup>	$P/P_0$ , %	$W_{\text{ev}}$ , %
3	8	1,01	5,23	10	1,7	18,02
5	8	1,4	12,36	9	1,95	27,12
10	7	1,5	22,63	6	2,2	28,41
15	5	1,6	27,6	4	2,1	29,27
20	5	1,58	29,25	4	1,5	29,27

По результатам эксперимента (табл. 1, 2) построены зависимости, позволяющие определить закономерности роста пористости и изменение количества пор в материалах на основе глинозема.

На рис. 2 отображены зависимости влажности двух исследуемых образцов от времени термической об-

работки (при температурах термообработки 200 °C и 100 °C). За нулевую влажность принято воздушно-сухое состояние. По данным зависимостям видно, что кривая изменения влажности в образцах, при порообразовании, соответствует стандартной кривой изменению влажности при сушке. При этом первый участок кривой – участок постоянной влажности – не выражен из-за своей малости, что объясняется завышенными температурами по сравнению с сушкой.

Так как вид зависимости изменения влажности при вспучивании совпадает с изменением влажности при сушке, то интересно проанализировать кривую скорости сушки. На рис. 3 отображена скорость сушки исследуемых образцов при температурах 120 °C и 200 °C. Из-за большого шага по времени сложно выделить отдельные периоды скорости сушки. При температуре 120 °C условно можно выделить период нарастающей, постоянной и убывающей скорости удаления влаги, но при 200 °C происходит слишком резкое возрастание скорости удаления влаги. Рис. 3 дает нам представление об изменении скорости удаления влаги, а значит (с учетом времени запаздывания) о порообразовании в материале. Сравнение данной зависимости с характером изменения пористости, крайне интересно с научной точки зрения.

На рис. 4 представлено изменение количества пор в образцах во времени при термообработке. Количество пор определялось фотографированием сечения образца с последующим нанесением сетки и увеличением выбранных фрагментов. Количество пор считалось на площади 9 мм<sup>2</sup> и переводилось на площадь 1 м<sup>2</sup> для соблюдения размерностей по СИ. Учитывались поры только с наибольшим геометрическим размером более 0,1 мм. Вид полученных кривых подобен изменению влажности материала. Из рис. 4 видно, что температура неоднозначно влияет на количество пор. В образце № 1 количество пор увеличилось практически в 2,5 раза, а в более пластичном образце № 2 – не значительно, с дальнейшим понижением.

Исходя из (2) можно предположить, что количество пор будет постоянно расти, однако, из рис. 4 видно, что это не так. Это вызвано ростом самих пор и объединением нескольких ядер пор в единую пору. Это показывает, что для математического анализа

пористой структуры необходимо решать систему уравнений увеличения количества пор и роста пористости.

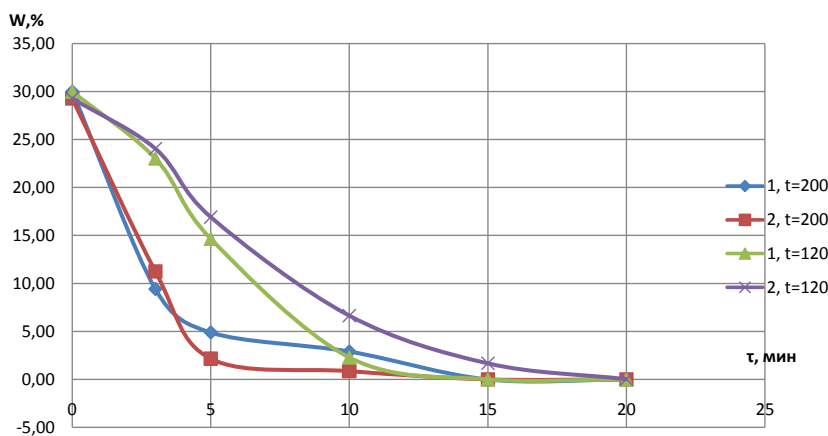


Рис. 2. Изменение влаги  $W$  в исследуемых образцах 1 и 2 от времени  $\tau$  при их термообработке

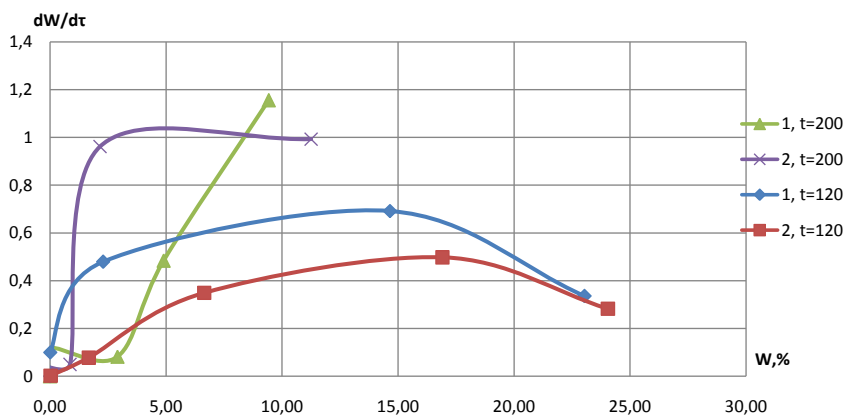


Рис. 3. Скорость сушки образцов 1 и 2 при различных температурах  $t$

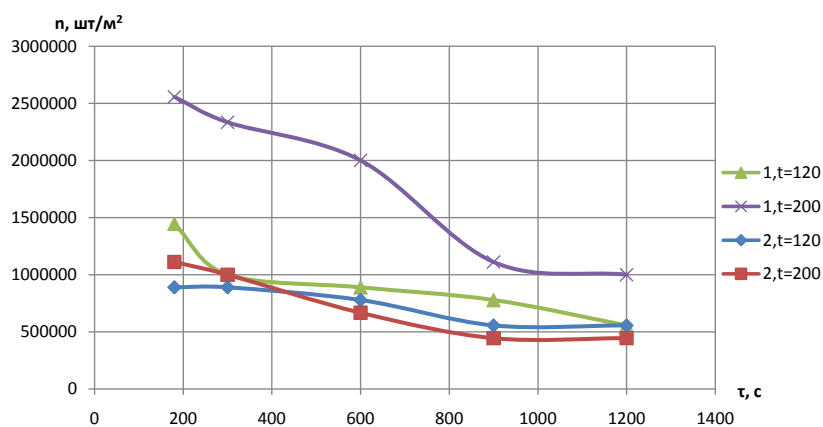


Рис. 4. Изменение количества пор  $n$  в исследуемых образцах во времени  $\tau$

На рис. 4 можно условно выделить три периода образования пор. Первый период зависит от самого материала. У более пластичного образца № 2 первый этап – этап незначительного снижения количества пор. В образце № 1 это этап существенного уменьшения количества пор. Второй этап – равномерное (линейное) уменьшение количества пор в материале.



С повышением температуры данная зависимость становится более крутой, т.е. уменьшение количества пор происходит более интенсивно, за счет более интенсивного увеличения объема пор. Если сопоставить данный этап с рис. 5, то можно заметить обратную зависимость с увеличением пористости. Третий этап – этап последующего плавного уменьшения количества пор при уменьшающемся или постоянном объеме, т.е. этап застарения пор. Разбиение на данные этапы позволяет более четко спрогнозировать граничные условия задачи.

Изменения общей пористости в исследуемых образцах отображено на рис. 5. На рис. 5 отображены зависимости пористости образцов во времени. Можно выделить существенное увеличение пористости в более пластичном образце, что согласовывается с ранее высказанной теорией вспучивания материалов. Стоит отметить увеличение пористости при росте температуры термообработки в обоих образцах.

На рис. 6, 7 отображены зависимости скорости порообразования и скорости изменения пористости образцов. Для удобства визуализации данных на рис. 6 скорость представлена с обратным знаком. Скорость порообразования для первого образца отличается от всех остальных. Это связано со скоростью диффузии влаги и скоростью образования поверхностной корки. Так как температура и пластичность материала малы, то водяные пары выходят из материала ранее, чем образуются поры. Характер остальных кривых показывает, что скорость порообразования вначале увеличивается, а после – медленно затухает. При этом скорость увеличения пористости постоянно уменьшается и является максимальной в начальный момент времени – в момент превращения жидкости в пар. Образец № 2 на рис. 7 имеет отрицательную скорость роста пор – усадку, что вызвано большой пластичностью и длительной термообработкой.

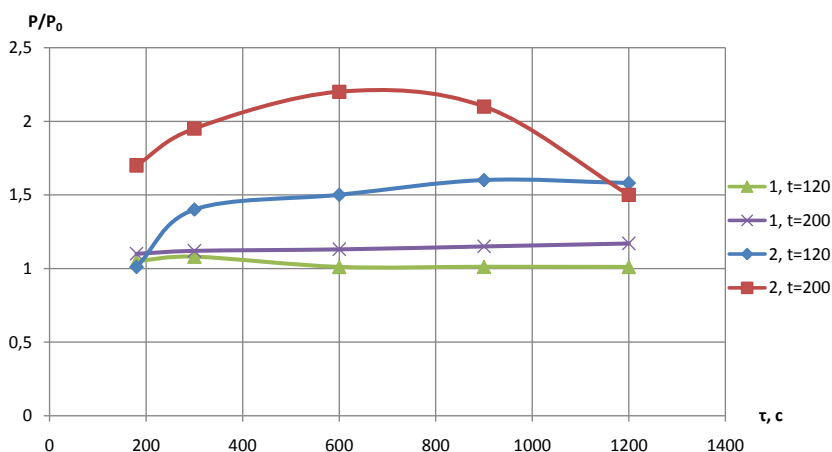


Рис. 5. Изменение общей пористости в исследуемых образцах от времени термообработки  $\tau$

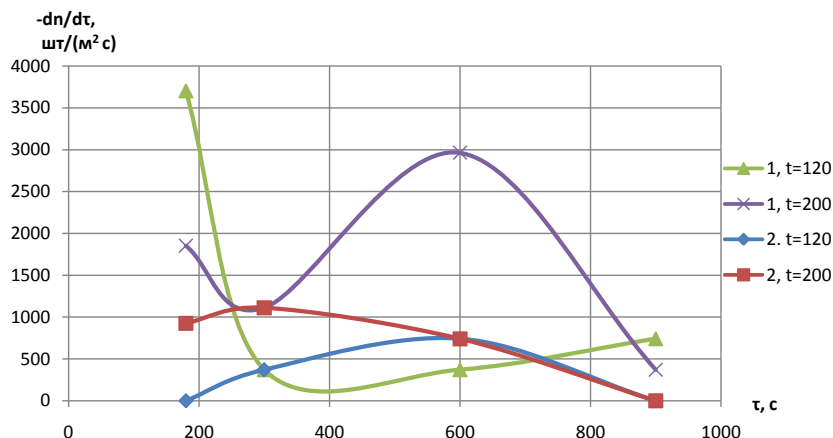


Рис. 6. Изменение скорости порообразования от времени термообработки  $\tau$

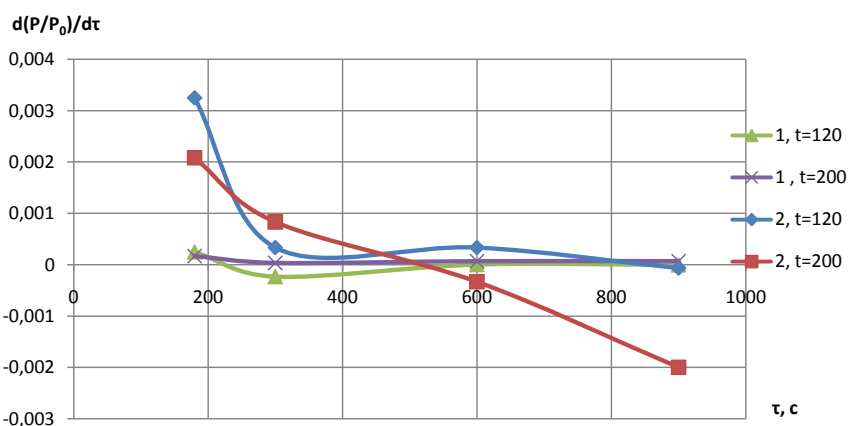


Рис. 7. Динамика изменения пористости от времени термообработки  $\tau$

Проведенные эксперименты позволяют определить основные закономерности изменения количества пор и пористости в глиноземистых материалах при их термообработке.

С учетом полученных результатов составим итоговую модель, описывающую изменение пористости в материале.

$$\begin{cases} n_{\text{pore}} = \tau_s \cdot N_1 \cdot B \cdot e^{-\frac{16\pi\sigma^3}{3k_B T (p_{kr}^{(0)} - p)^2}} & \text{if } \tau_s < \tau_1; \\ n_{\text{pore}} = \tau_s \cdot \xi_1 \cdot (1 - P) & \text{if } \tau_1 < \tau_s < \tau_2; \\ n_{\text{pore}} = \tau_s \cdot \xi_2 \cdot P & \text{if } \tau_s > \tau_2, \end{cases}$$

где  $\xi_1, \xi_2$  – эмпирические коэффициенты.

Благодаря полученным данным можно прогнозировать характеристики итоговой пористости материала, что позволит управлять теплофизическими свойствами глиноземистого материала, изменяя процесс термообработки.

## 8. Выводы

1. Условием существования поры является  $\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)} < 0$  (при этом пора

в исходной смеси с большей вероятностью возникнет в местах с малым поверхностным натяжением);

2. Получено уравнение, позволяющее просчитать среднее время ожидания возникновения поры. Оно представляет собой отношение количества пор (из статистической матрицы) к частоте спонтанного возникновения пор за вычетом времени релаксации. Это дает возможность спрогнозировать пористость материала при наличии базы наблюдений порообразований в данном материале. Также показана взаимосвязь количества пор с критической работой поры и временем;

3. Анализ изменения влажности пористого материала, изменения количества пор и пористости при вспучивании материалов, на основе глинозема показал, что кривые скорости изменения влажности во вспучиваемом материале подобны кривым сушки и также имеют три периода (период нарастающей, постоянной

и убывающей скорости удаления влаги). При образовании пор можно выделить три периода:

– первый период – этап снижения количества пор, зависит от материала (у более пластичного – незначительное снижение количества пор, а у менее пластичного – существенного уменьшения количества пор);

– второй этап – равномерное уменьшение количества пор в материале (с повышением температуры уменьшение количества пор происходит более интенсивно, за счет более интенсивного увеличения объема пор);

– третий этап – этап зарастания пор.

4. Предложена система уравнений, описывающая изменение количества пор в материале на основе глинозема. Она открывает возможность прогнозирования количества пор во вспучиваемом материале на основе глинозема при его термообработке. Это, в свою очередь, позволит управлять теплофизическими свойствами материала.

### Литература

- Чейлытко, А. О. Исследование формирования пор во вспучиваемом материале [Текст] / А. О. Чейлытко // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – Т. 5, № 4 (13). – С. 38–40. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/tarp/article/view/18251/16063>
- Павленко, А. М. Параметры газа агента–порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия [Текст] / А. М. Павленко, А. В. Кошляк, А. А. Чейлытко, М. А. Носов // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – 2015. – № 62 (1171) – С. 28–35.
- Чейлытко, А. А. Особенности влияния пористости на теплопроводность глиноземастых материалов [Текст] / А. А. Чейлытко. – Днепропетровск: Середняк Т. К., 2015. – 76 с.
- Шпак А. П. Кластерные и наноструктурные материалы. Т. 3. Пористость как особое состояние самоорганизованной структуры в твердотельных материалах [Текст] / А. П. Шпак, П. Г. Черемской, Ю. А. Куницкий, О. В. Соболев. – К.: ВД «Академ-периодика», 2005. – 516 с.
- Freire-Gormaly, M. The Pore Structure of Indiana Limestone and Pink Dolomite for the Modeling of Carbon Dioxide in Geologic Carbonate Rock Formations [Electronic resource] / M. Freire-Gormaly. – University of Toronto, 2013. – Available at: [https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/42840/1/Freire-Gormaly\\_Marina\\_201311\\_MASc\\_thesis.pdf](https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/42840/1/Freire-Gormaly_Marina_201311_MASc_thesis.pdf)
- Eom, J.-H. Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics: A review [Text] / J.-H. Eom, Y.-W. Kim, S. Raju // Journal of Asian Ceramic Societies. – 2013. – Vol. 1, Issue 3. – P. 220–242. doi: 10.1016/j.jascer.2013.07.003
- Pavlenko, A. M. Design of processes of thermal bloating of silicates [Text] / A. M. Pavlenko, H. V. Koshlak // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Vol. 1. – P. 118–122. – Available at: [http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2015\\_1/21%20Pavlenko.pdf](http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_1/21%20Pavlenko.pdf)
- Bajare, D. Lightweight Concrete with Aggregates Made by Using Industrial Waste [Text] / D. Bajare, J. Kazjonovs, A. Korjajins // Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. – 2013. – Vol. 4, Issue 5. doi: 10.5755/j01.sace.4.5.4188
- Bodnárová L. Behaviour of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete Exposed to High Temperatures [Text] / L. Bodnarova, R. Hela, M. Hubertová, I. Nováková // International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. – 2014. – Vol 8, Issue 12. – P. 1205–1208.
- Dincov, D. D. Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating [Text] / D. D. Dincov, K. A. Parrott, K. A. Pericleous // Journal of Food Engineering. – 2004. – Vol. 65, Issue 3. – P. 403–412. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.02.011 – Available at: <http://www.researchgate.net/publication/222658046>
- Lopez-Pamies, O. Effects of internal pore pressure on closed-cell elastomeric foams [Electronic resource] / O. Lopez-Pamies, P. Ponte Castaneda, M. I. Idiart // International Journal of Solids and Structures. – 2012. – Vol. 49, Issue 19-20. – P. 2793–2798. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2012.02.024 – Available at: [http://www.researchgate.net/publication/256733990\\_Effects\\_of\\_internal\\_pore\\_pressure\\_on\\_closed-cell\\_elastomeric\\_foams](http://www.researchgate.net/publication/256733990_Effects_of_internal_pore_pressure_on_closed-cell_elastomeric_foams)
- Vesenjak, M. Influence of pore gas in closed-cell cellular structures under dynamic loading [Electronic resource] / M. Vesenjak, A. Öchsner, Z. Ren. – German LS-DYNA Forum. Bamberg, 2005. – Available at: <https://www.dynamore.de/de/download/papers/forum04/new-methods/influence-of-pore-gas-in-closed-cell-cellular>
- Komissarchuk, O. Pore structure and mechanical properties of directionally solidified porous aluminum alloys [Electronic resource] / O. Komissarchuk, Z. Xu, H. Hao. – China Foundry. China, 2014. – Available at: <https://doaj.org/article/002c72e2e01345db8bf4fef190113057>