

УДК 536.775, 539.217.1

ПАРАМЕТРЫ ГАЗА АГЕНТА-ПОРООБРАЗОВАТЕЛЯ ВНУТРИ ЗАМКНУТОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОРЫ В СОСТОЯНИИ РАВНОВЕСИЯ

А. М. ПАВЛЕНКО¹, А. В. КОШЛАК², А. А. ЧЕЙЛЫТКО^{3*}, М. А. НОСОВ³

¹ Факультет нефти, газа и природопользования, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава, УКРАИНА

² Кафедра теплогазоснабжения, вентиляции и теплоснабжения, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава, УКРАИНА

³ Кафедра теплоэнергетика, Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье, УКРАИНА

* email: cheylitko@yandex.ua

АННОТАЦИЯ Существует ряд неизученных вопросов, которые тормозят развитие пористых материалов. Сложность явлений структурообразования, а также их понимание, вызывают наибольший интерес, так как путем изучения кинетики фазовых переходов можно создать теоретическую базу для разработки новых высокоинтенсивных технологий в различных областях промышленности, в частности технологию производства мелкопористых теплоизоляционных материалов. В данной работе найдены: условия равновесия газа агента-порообразователя в пористом материале; давление газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия; температура газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия.

Ключевые слова: пористость, структурообразование, равновесие, агент-порообразователь, давление, сферическая пора, температура.

PARAMETERS OF THE GAS PORE FORMER AGENT INSIDE THE CLOSED SPHERICAL PORE AT EQUILIBRIUM

A. PAVLENKO¹, A. KOSHLAK², A. CHEYLYITKO³, M. NOSOV³

¹ Faculty of oil, gas and natural resources, Poltava national technical Yuri Kondrtyuk university, Poltava, UKRAINE

² Department of the heat and gas supply, ventilation and heat power engineering, Poltava national technical Yuri Kondrtyuk university, Poltava, UKRAINE

³ Department of the heat and power engineering, Zaporozhye state engineering academy, Zaporozhye, UKRAINE

ABSTRACT There are a number of unexplored issues that prevent the development of porous materials. The complexity of the phenomena of structure formation, as well as their understanding is the most interesting, because by studying the kinetics of phase transitions can create a theoretical basis for the development of new high-intensity technologies in various industries, in particular technology of finely porous insulating materials. Objectives of this work were finding: the equilibrium conditions of gas pore former agent in the porous material; gas pore former agent pressure inside the closed spherical pore in equilibrium; temperature of gas pore former agent inside the closed spherical pore in equilibrium. For determining the equilibrium conditions of gas pore former agent in the porous material, as dynamic characteristics, determines the direction of changes in the size of the steam pore will take the voltage difference caused by pressure in the steam field and the resistance of the boundary surface of the pore. For determining the gas pore former agent pressure inside the closed spherical pore in equilibrium, was differentiated equation, which characterizing the dynamics of growth or reduce the steam bubble, by pressure p at $T = \text{const}$ and considering that $(\partial\varphi/\partial p)_T = v$. Temperature of gas pore former agent inside the closed spherical pore in equilibrium was found through the temperature of material. The equilibrium conditions of gas pore former agent in the porous material: $T^{(1)} = T^{(2)}$, $p^{(1)} - p^{(2)} = \frac{2\sigma}{r}$, $\varphi^{(1)}(p^{(1)}, T) = \varphi^{(2)}(p^{(2)}, T)$. The gas pore former agent pressure inside the closed spherical pore in equilibrium: $p^{(1)} = p_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$. The temperature of gas pore former agent inside the closed spherical pore in equilibrium: $\Delta T = (1/R \ln|p^{(1)}|) \cdot (2\sigma v^{(1)}/r + p^{(2)}/\rho^{(2)}) - T_0$. All objectives were successfully found.

Keywords: porous materials, structure formation, equilibrium conditions, pressure, temperature, closed spherical pore, gas pore former agent.

Введение

Множество экспериментальных данных свидетельствуют о наличии связи между пористостью материала и его теплофизическими свойствами [1-3]. Влияние пористости на теплопроводность материала

можно рассмотреть на примере следующих экспериментальных данных [2]. Значения коэффициентов теплопроводности железа (58,19Вт/(м·К)) и горной породы (3,26Вт/(м·К)) отличаются почти в 18 раз, но при этом засыпка из шариков железа и шариков горной породы с

одинаковой пористостью 62,5% имеет почти одинаковый коэффициент теплопроводности (0,0403Вт/(м·К) и 0,0402 Вт/(м·К) соответственно).

Сложность явлений структурообразования, а также их понимание, вызывают наибольший интерес, так как путем изучения кинетики фазовых переходов можно создать теоретическую базу для разработки новых высокоинтенсивных технологий в различных областях промышленности, в частности технологию производства мелкопористых теплоизоляционных материалов

Однако пути формирования пористой структуры до сих пор не исследованы, а четкой зависимости между пористостью и физическими свойствами материала не найдено.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

В [4] 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. Так же было показано, что пористые эластомеры обладают большей жесткостью при наличии давления в порах, даже атмосферного, нежели при его отсутствии. 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 [5] 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. Воздействие деформаций на структуру с закрытой пористостью может привести к высокому внутреннему давлению в порах, которое ведет к увеличению поглощения энергии и общей жесткости материала в процессе деформации. Но не было рассмотрено методов достижения тех или иных давлений в порах материала и способа их расчета.

В [6] представлен микромеханический анализ пористого материала с наличием внутреннего давления в порах, на примере полимера ВХ-265. Показано влияние начального давления пор на прогнозируемую растяжимость образца, влияние приложенной нагрузки (с давлением в порах и без него) на прогнозируемый разрыв образца, но не уделено внимания расчету давления в порах.

В [7] показано изменение теплопроводности от температуры для различных диаметров пор, однако температура в порах принята равной температуре окружающей среды. Возможность заполнения

жидкостью, а не газом - не исследовано.

В [8] изучено изменение давления в порах в зависимости от размера пор и силы сжатия, так же рассмотрено изменение давления в порах в зависимости от температуры. Но при этом не указано как именно рассчитать температуру или давление в порах.

В [9] исследовано влияние пористости на теплофизические свойства железорудных материалов с использованием нечетких алгоритмов. В качестве входных лингвистических переменных не были использованы параметры вещества находящегося в порах (температура, давление, плотность и т.д.).

В [10] рассмотрены природа пористости, размеры пор, виды пор и их распределения в солях. Не было рассмотрено давление и температура вещества в тех самых порах.

Цель и задачи исследования

Целью работы является нахождение параметров газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- нахождение условия равновесия газа агента-порообразователя в пористом материале;
- нахождение давления газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия;
- нахождение температуры газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия.

Условия равновесия агента-порообразователя в материале при формировании пористой структуры

В качестве динамической характеристики, определяющей направленность изменений размеров паровой поры примем разность напряжений, вызванных давлением в паровой области и сопротивлением граничной поверхности поры.

Уравнение [11] характеризует динамику роста или уменьшения парового пузырька

$$\frac{dw}{d\tau} = -\frac{1,5\rho w^2 + P_c - P_n(T)}{\rho_c R} = -\frac{1,5\rho w^2}{\rho_c R} + \frac{P_n(T) - P_c}{\rho_c R} \quad (1)$$

где w – скорость роста парового пузырька; τ – время роста пузырька; ρ – плотность; P_n – давление внутри паровой полости; P_c – давление в окружающей жидкости; T – температура; R – радиус парового пузырька.

Увеличение, уменьшение или стабилизация размеров пузырька могут быть представлены, соответственно, тремя случаями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho} > 0, \quad \frac{\sqrt{1,5\rho}}{2\sqrt{P_n(T) - P}} \ln \left| \frac{w - \sqrt{\frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho}}}{w + \sqrt{\frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho}}} \right| = -\frac{1,5\rho\tau}{\rho_c R} + C, \\ \frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho} < 0, \quad \sqrt{\frac{1,5\rho}{P_n(T) - P_c}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1,5\rho}{P_n(T) - P_c}} w = -\frac{1,5\rho\tau}{\rho_c R} + C, \\ \frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho} = 0, \quad \frac{1}{w} = -\frac{1,5\rho\tau}{\rho_c R} + C. \end{array} \right. \quad (2)$$

При $P_n(T) - P > 0$ – паровой пузырек увеличивается, $P_n(T) - P < 0$ – уменьшается; в случае $P_n(T) - P = 0$ – его размер стабилизирован. Как видно из уравнений, $P_n(T)$ зависит от величины внешнего теплового потока (температуры). Следовательно, процесс порообразования может быть контролируемым.

Таким образом, скорость изменения размеров парового пузырька может быть определена по уравнениям

$$w(\tau) = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho}} \frac{1 + k(\tau)}{1 - k(\tau)}; \quad \frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho} > 0, \\ \sqrt{\frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho}} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho}} \left(C - \frac{1,5\rho\tau}{\rho_c R} \right); \quad \frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho} < 0, \\ \frac{\rho_c R}{1,5\rho\tau - C\rho_c R}; \quad P_n(T) - P = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

После преобразований с учетом равенства

$$\frac{(w - \alpha)(w_0 + \alpha)}{(w + \alpha)(w_0 - \alpha)} = e^{\frac{1,5\rho\tau}{\rho_c R}}$$

окончательно получим

$$\left\{ \begin{array}{l} w = \frac{\alpha \left[(w_0 - \alpha) e^{\frac{1,5\rho\tau}{\rho_c R}} + w_0 + \alpha \right]}{w_0 + \alpha - (w_0 - \alpha) e^{\frac{1,5\rho\tau}{\rho_c R}}}; \quad \alpha = \sqrt{\frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho}}; \quad \frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho} > 0, \\ w = \frac{\sqrt{\frac{1,5\rho}{P_n(T) - P_c}} w_0 - \operatorname{tg} \sqrt{\frac{1,5\rho}{P_n(T) - P_c}} \frac{1,5\rho\tau}{\rho_c R}}{\sqrt{\frac{1,5\rho}{P_n(T) - P_c}} + \left| \frac{1,5\rho}{P_n(T) - P_c} \right| w_0 \operatorname{tg} \sqrt{\frac{1,5\rho}{P_n(T) - P_c}} \frac{1,5\rho\tau}{\rho_c R}}; \quad \frac{P_n(T) - P_c}{1,5\rho} < 0, \\ w = \frac{w_0 \rho_c R}{1,5\rho w_0 \tau - \rho_c R}; \quad P_n(T) - P_c = 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Когда разность давлений $P_n(T) - P_c$ становится небольшой, скорость граничной поверхности, вычисленная по первому уравнению, приближается к начальному значению, в частном случае – к нулю. Если $w_0 \neq 0$, последнее выражение теряет физический смысл, поскольку для этого случая $w = 0$.

Уравнение можно записать в виде

$$\frac{dR}{d\tau} = \frac{w_0 \rho_c R}{1,5\rho w_0 \tau - \rho_c R}.$$

Тогда после интегрирования, получим

$$R(\tau) = \frac{R}{1,5} \ln |1,5 w_0 \tau + \rho_c R|. \quad (5)$$

Последнее выражение позволяет определить продолжительность процесса вспучивания до достижения определенных размеров поры. Данная методика позволяет с достаточной точностью оценивать кинетические характеристики термического вспучивания. Для химического порообразования ее следует дополнить энергетической оценкой вероятности такой реакции, которую можно оценить с помощью уравнения для энергии Гиббса.

Энергия Гиббса зародыша поры радиуса r (при термическом или химическом вспучивании)

$$G^{(1)} = \varphi_{\infty}^{(1)} M^{(1)} + \sigma \Omega, \quad (6)$$

где $M^{(1)}$ – масса порообразователя, равная $4\pi r^3/\nu'$; Ω – наружная поверхность порообразователя, равная $4\pi r^2$; $\varphi_{\infty}^{(1)}$ – химический потенциал порообразующего газа (при бесконечно большом объеме данного газа).

Энергия Гиббса системы, состоящей из зародыша поры в материале

$$G = G^{(1)} + G^{(2)},$$

где $G^{(2)}$ – энергия Гиббса материала.

Рассмотрим состояние равновесия этой системы. Если внешнее давление p' , совпадающее с давлением порообразователя, и температура T' , при которых находится система, постоянны, то условие равновесия $dG = 0$ имеет вид

$$dU^{(1)} + dU^{(2)} - T'(dS^{(1)} + dS^{(2)}) + p'(dV^{(1)} + dV^{(2)}) + \varphi_{\infty}^{(1)} dM^{(1)} + \varphi^{(2)} dM^{(2)} = 0$$

Имея в виду, что

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V = T; \quad \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S = -p,$$

причем для газового пузырька согласно формуле Лапласа [8]

$$-p^{(1)} = -\left(-p' - \frac{2\sigma}{r}\right),$$

находим

$$dU^{(1)} + dU^{(2)} = T^{(1)}dS^{(1)} + T^{(2)}dS^{(2)} - \left(p' - \frac{2\sigma}{r}\right)dV^{(1)} - p'dV^{(2)},$$

где p' - внешнее давление (в данном случае давление материала на агент-порообразователь).

Принимая во внимание, что вследствие постоянства общей массы системы

$$dM^{(2)} = -dM^{(1)},$$

из условия равновесия получим

$$\frac{2\sigma}{r}dV^{(1)} + (\varphi_{\infty}^{(1)} - \varphi^{(2)})dM^{(1)} = 0.$$

Для сферического агента-порообразователя

$$dV^{(1)} = 4\pi r^2 dr; \\ dM^{(1)} = \frac{4\pi r^2}{v^{(1)}} dr.$$

Поэтому последнее соотношение может быть переписано в виде

$$\left(\varphi_{\infty}^{(1)} - \varphi^{(2)} + \frac{2\sigma v^{(1)}}{r}\right) dr = 0,$$

или, так как $dr \neq 0$,

$$\varphi^{(2)} - \varphi_{\infty}^{(1)} = \frac{2\sigma v^{(1)}}{r}. \quad (7)$$

Возьмем вместо $\varphi_{\infty}^{(1)}$ и $\varphi^{(2)}$ действительные значения химических потенциалов агента-порообразователя и материала при данной температуре и соответствующих давлениях, равные $\varphi^{(1)}(p^{(1)}, T)$ и $\varphi^{(2)}(p^{(2)}, T)$. По аналогии с пузырьком газа в бесконечном объеме жидкости (разлагая $\varphi^{(1)}(p^{(1)}, T)$ в ряд по степеням $p^{(1)} - p^{(2)}$, а $\varphi^{(2)}(p^{(2)}, T)$ в ряд по степеням $p^{(2)} - p^{(1)}$ [12]) можно получить

$$\varphi^{(1)}(p^{(1)}, T) = \varphi^{(2)}(p^{(2)}, T).$$

Из полученного уравнения следует, что при отличающейся от плоской поверхности раздела химические потенциалы агента-порообразователя и материала, отнесенные к собственному давлению и общей температуре, имеют равное значение. Таким образом, условия равновесия агента-порообразователя

в материале при формировании пористой структуры, с учетом поверхностного натяжения, имеют вид

$$\begin{cases} T^{(1)} = T^{(2)} \\ p^{(1)} - p^{(2)} = \frac{2\sigma}{r} \\ \varphi^{(1)}(p^{(1)}, T) = \varphi^{(2)}(p^{(2)}, T) \end{cases}. \quad (8)$$

Давление газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры

Продифференцировав уравнение (1) по давлению p при $T = \text{const}$ и учитывая, что $(\partial\varphi/\partial p)_T = v$, получим

$$\frac{1}{\rho^{(2)}} - v^{(1)} = -\frac{2v^{(1)}\sigma}{r^2} \left(\frac{\partial r}{\partial p}\right)_T + \frac{2\sigma}{r} \left(\frac{\partial v^{(1)}}{\partial p}\right)_T.$$

Так как $\frac{1}{\rho^{(2)}}$ намного меньше $v^{(1)}$, а $v^{(1)}$ при сравнительно малых давлениях газа можно принять равным RT/p то

$$\frac{RT}{p^{(1)}} = \frac{2v^{(1)}\sigma}{r^2} \left(\frac{\partial r}{\partial p}\right)_T - \frac{2\sigma}{r} \left(\frac{\partial v^{(1)}}{\partial p}\right)_T.$$

Проинтегрировав это уравнение по $p \geq 0$ получим

$$\int \frac{RT}{p^{(1)}} dp = \int \frac{2v^{(1)}\sigma}{r^2} \left(\frac{\partial r}{\partial p}\right)_T dp - \int \frac{2\sigma}{r} \left(\frac{\partial v^{(1)}}{\partial p}\right)_T dp. \\ RT \cdot [\ln(p^{(1)}) + c] = -2\sigma \frac{v^{(1)}}{r},$$

где c - константа интегрирования.

$$p^{(1)} = e^{-c} \cdot e^{\frac{2\sigma v^{(1)}}{RT r}}.$$

Константу e^{-c} найдем из условия равновесия, учитывая, что при $r \rightarrow \infty$, $p = p_0$ т.е. давление агента-порообразователя равно давлению газа при тех же физических условиях вне материала

$$p^{(1)} = p_0 \cdot e^{\frac{2\sigma v^{(1)}}{RT r}}. \quad (9)$$

Из данного уравнения следует, что в состоянии равновесия давление газа-порообразователя внутри поры меньше давления данного газа вне материала в $\frac{2\sigma v^{(1)}}{RT r}$ раз.

Данное уравнение можно также записать в виде

$$p^{(1)} = p_0 \cdot e^{\frac{E_a}{RT}}, \quad (10)$$

где $E_a = 2\sigma \frac{v^{(1)}}{r}$ или согласно (1) $E_a = \varphi^{(2)} - \varphi_\infty^{(1)}$ – энергия активации, равная разности химических потенциалов материала и агента-порообразователя.

Из (4) следует, что чем больше разница химических потенциалов систем материал-пора, тем меньше давление будет у газа внутри поры. Так как конвективный перенос тепла в газе прямопропорционально зависит от давления, то данное утверждение можно перефразировать следующим образом: **для достижения минимальной теплопередачи поры необходимо увеличивать разницу химических потенциалов систем материал-пора.**

Температура газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры

Из [11] известно, что температура фазового перехода сферической капли в пар выше, чем температура фазового перехода с поверхности. Это означает, что необходимо перегреть жидкость внутри поры для того что бы она превратилась в пар на температуру [11]

$$\Delta T = \frac{2\sigma v'' T}{Lr}, \quad (11)$$

где v'' – значения объема насыщенного пара, L – теплота испарения,

σ – коэффициент поверхностного натяжения при температуре T_s (т. е. до изменения кривизны поверхности).

Формула (5) относится к паровому пузырьку, находящемуся в равновесии с окружающей средой. Она может быть применена для определения степени перегрева жидкости, не содержащей растворенных в ней газов и кипящей в условиях постоянного давления на жидкость.

Выведем температуру газа-порообразователя находящегося в равновесии через температуру материала. Продифференцировав уравнение равенства потенциалов (8) по T и учитывая, что $(\partial\varphi/\partial p)_T = v$, $(\partial\varphi/\partial T)_P = -s$ получим

$$\left(\frac{\partial\varphi^{(1)}}{\partial p}\right)_T \frac{dp}{dT} + \left(\frac{\partial\varphi^{(1)}}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{\partial\varphi^{(2)}}{\partial p}\right)_T \frac{dp}{dT} + \left(\frac{\partial\varphi^{(2)}}{\partial T}\right)_P,$$

$$\frac{dp}{dT} = \frac{s^{(2)} - s^{(1)}}{v^{(2)} - v^{(1)}}.$$

Или

$$dT = \frac{1}{s^{(2)} - s^{(1)}} \left(\frac{1}{\rho^{(2)}} \cdot dp^{(2)} - v^{(1)} \cdot dp^{(1)} \right).$$

Учитывая, что плотность материала практически не зависит от давления при небольших давлениях газа $v = RT/p$, получим

$$T = \frac{1}{s^{(2)} - s^{(1)}} \left(\frac{p^{(2)}}{\rho^{(2)}} - RT \ln \left| p^{(1)} \right| \right) + const. \quad (12)$$

Продифференцировав уравнение (1) по температуре T при $P = const$ и учитывая, что $(\partial\varphi/\partial T)_P = -s$, получим

$$s^{(1)} - s^{(2)} = -\frac{2\sigma v^{(1)}}{r^2} \left(\frac{\partial r}{\partial T} \right)_P + \frac{2\sigma}{r} \left(\frac{\partial v^{(1)}}{\partial T} \right)_P.$$

Учитывая, что радиус зародыша порообразователя и его объем в условиях равновесия не зависит от температуры и при постоянном давлении можно принять

$$s^{(2)} - s^{(1)} = -\frac{2\sigma v^{(1)}}{rT}.$$

отсюда

$$s^{(2)} - s^{(1)} = -\frac{2\sigma v^{(1)}}{rT}.$$

Подставив данное уравнение в (12) получим

$$\frac{2\sigma v^{(1)}}{r} = RT \ln \left| p^{(1)} \right| - \frac{p^{(2)}}{\rho^{(2)}},$$

$$T = \frac{1}{R \ln \left| p^{(1)} \right|} \cdot \left(\frac{2\sigma v^{(1)}}{r} + \frac{p^{(2)}}{\rho^{(2)}} \right).$$

Подставив краевые условия (при $r \rightarrow \infty$) найдем температуру перегрева газа агента порообразователя внутри поры

$$\Delta T = \frac{1}{R \ln \left| p^{(1)} \right|} \cdot \left(\frac{2\sigma v^{(1)}}{r} + \frac{p^{(2)}}{\rho^{(2)}} \right) - T_0, \quad (13)$$

где T_0 - температура газа-порообразователя при тех же физических условиях вне поры.

Выводы

Найдены условия равновесия газа агента-порообразователя в пористом материале (уравнение 4).

Найдено давление газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия (уравнение 10). Чем больше разница химических потенциалов систем материал-пора, тем меньше давление будет у газа внутри поры. Так как конвективный перенос тепла в газе прямопропорционально зависит от давления, то данное утверждение можно перефразировать следующим образом: для достижения минимальной теплопередачи поры необходимо увеличивать разницу химических потенциалов систем материал-пора.

Найдена температура перегрева газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия (уравнение 13).

Список литературы

1. **Чейлытко, А. О.** Исследование формирования пор во вспучиваемом материале / **А. О. Чейлытко** // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – Т. 5, № 4 (13). – С. 38 - 40. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/tarp/article/view/18251/16063>
2. **Чудновский, А. Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов / **А. Ф. Чудновский**. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы. – 1962. – 456 с.
3. **Чейлытко, А. А.** Особенности влияния пористости на теплопроводность глиноземистых материалов / **А. А. Чейлытко, Т.К. Середняк** // Днепропетровск. – 2015. – 76 с. ISBN 978-617-7257-62-1
4. **Lopez-Pamies, O.** Effects of internal pore pressure on closed-cell elastomeric foams / **O. Lopez-Pamies, P. Ponte Castaneda, M. I. Idiart**, *International Journal of Solids and Structures*, 2012. – Available at: http://www.researchgate.net/publication/256733990_Effects_of_internal_pore_pressure_on_closed-cell_elastomeric_foams
5. **Vesenjak, M., Öchsner, A., Ren, Z.** Influence of pore gas in closed-cell cellular structures under dynamic loading / **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>
6. **Aboudi, J.** Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach / **J. Aboudi, S. M. Arnold, B. A. Bednarczyk** // *Elsevier*. – 2013. – 973 p.
7. **Raed, K.** Gas atmosphere and pore size distribution effects on the effective thermal conductivity of nano-scaled insulations / **K. Raed, G. Barth, R. Wulf, U. Gross** // German. – Freiberg. – 2005. – Available at: <http://tu-freiberg.de/fakult4/iwtt/td/publikationen-ma/>
8. **Mosher, K.** The impact of pore size on methane and CO₂ adsorption in carbon / **K. Mosher** // *Stanford university* – 2011. – Available at: https://pangea.stanford.edu/ERE/research/wyccs/files/Mosher_thesis.pdf
9. **Новикова, Е. Ю.** Исследование влияния пористости на теплофизические свойства железорудных материалов с использованием нечетких алгоритмов / **Е. Ю. Новикова**

// *Наукові праці: науково-методичний журнал*. – 2009. – Т. 117, № 104. – С. 130-134.

10. **Nimmo, J. R.** Porosity and Pore Size Distribution / **J. R. Nimmo** // *Encyclopedia of Soils in the Environment*: London. – Elsevier. – 2004. – P. 295-303.
11. **Кошляк, А. В.** Равновесные состояния в динамике формирования пористой структуры / **А. В. Кошляк** // *Системные технологии*. – 2008. – №5(58). – С. 36 - 40
12. **Вукалович, М. П.** Термодинамика [Текст] / **М. П. Вукалович, И. И. Новиков** // М.: "Машиностроение". – 1972. – 672 с.

Bibliography (transliterated)

1. **Cheylyitko, A. O.** Issledovanie formirovaniya por vo vspuchivayuschemsya material. *Tehnologicheskij audit i rezervyi proizvodstva*, 2013, 4(13), 38 - 40. – [Web]: <http://journals.urau.ua/tarp/article/view/18251/16063>
2. **Chudnovskiy, A. F.** Teplofizicheskie karakteristiki dispersnykh materialov. Moskov: Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literaturyi, 1962, 456 p.
3. **Cheylyitko, A. A., Serednyak, T. K.** Osobennosti vliyaniya poristosti na teploprovodnost glinozemistykh materialov. Dnepropetrovsk: 2015, 76 p. ISBN 978-617-7257-62-1
4. **Lopez-Pamies, O., Ponte Castaneda, P., Idiart, M. I.** Effects of internal pore pressure on closed-cell elastomeric foams. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, [Web] http://www.researchgate.net/publication/256733990_Effects_of_internal_pore_pressure_on_closed-cell_elastomeric_foams
5. **Vesenjak, M., Öchsner, A., Ren, Z.** Influence of pore gas in closed-cell cellular structures under dynamic loading / German LS-DYNA Forum, Bamberg, 2005. [Web] <https://www.dynamore.de/de/download/papers/forum04/new-methods/influence-of-pore-gas-in-closed-cell-cellular>
6. **Aboudi, J., Arnold, S. M., Bednarczyk, B. A.** Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach, Elsevier, 2013, 973.
7. **Raed, K., Barth, G., Wulf, R., Gross, U.** Gas atmosphere and pore size distribution effects on the effective thermal conductivity of nano-scaled insulations, German, Freiberg, 2005. [Web]: <http://tu-freiberg.de/fakult4/iwtt/td/publikationen-ma/>
8. **Mosher, K.** The impact of pore size on methane and CO₂ adsorption in carbon. *Stanford university*, 2011. [Web] https://pangea.stanford.edu/ERE/research/wyccs/files/Mosher_thesis.pdf
9. **Novikova, E. Yu.** Issledovanie vliyaniya poristosti na teplofizicheskie svoystva zhelezorudnykh materialov s ispolzovaniem nechetkikh algoritmov. *Naukovi pratsi: naukovo-metodichnyi zhurnal*, 2009, 117 (104), 130 - 134.
10. **Nimmo, J. R.** Porosity and Pore Size Distribution. *Encyclopedia of Soils in the Environment*: London, Elsevier, 2004, 295 - 303.
11. **Koshlak, A. V.** Ravnovesnyie sostoyaniya v dinamike formirovaniya poristoy strukturyi. *Sistemnyie tehnologii*, 2008, 5(58), 36 - 40
12. **Vukalovich, M. P., Novikov, I. I.** Termodinamika, Moskov: "Mashinostroenie", 1972, 672 p.

Сведения об авторах (About authors)

Павленко Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, декан факультета «Нефти и газа и природопользования», г. Полтава, Украина.

Pavlenko Anatoliy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of Faculty of oil, gas and natural resources, Poltava national technical Yuri Kondrtyuk university, Poltava, Ukraine.

Кошлак Анна Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, доцент кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция и теплоэнергетика», г. Полтава, Украина.

Koshlak Anna – Candidate of Technical Sciences, Docent, Department of the heat and gas supply, ventilation and heat power engineering, Poltava national technical Yuri Kondrtyuk university, Poltava, Ukraine.

Чейлытко Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент, Запорожская государственная инженерная академия, доцент кафедры «Теплоэнергетика», г. Запорожье, Украина; e-mail: cheylitko@uandex.ua.

Cheylitko Andrey – Candidate of Technical Sciences, Docent, Department of the heat and power engineering, Zaporozhye state engineering academy, Zaporozhye, Ukraine.

Носов Максим Андреевич – магистрант, Запорожская государственная инженерная академия, магистрант кафедры «Теплоэнергетика», г. Запорожье, Украина.

Nosov Maxim – master student, Department of the heat and power engineering, Zaporozhye state engineering academy, Zaporozhye, Ukraine.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Павленко А. М. Параметры газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия / **А. М. Павленко, А. В. Кошлак, А. А. Чейлытко, М. А. Носов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2015. – № 62 (1171). – С. 28 - 34. – ISSN 2079-5459.

Please cite this article as:

Pavlenko, A., Koshlak, A., Cheylitko, A., Nosov, M. Parameters of the gas pore former agent inside the closed spherical pore at equilibrium. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2015, **62** (1171), P. 28 – 34, ISSN 2079-5459.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Павленко А. М. Параметри газу агента-пороутворювача всередині замкнутої сферичної пори у стані рівноваги / **А. М. Павленко, А. В. Кошлак, А. О. Чейлытко, М. А. Носов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 62 (1174). – С. 28 - 34. – ISSN 2079-5459.

АНОТАЦІЯ Існує ряд невивчених питань, які гальмують розвиток пористих матеріалів. Складність явищ структуроутворення, а також їх розуміння, викликають найбільший інтерес, так як шляхом вивчення кінетики фазових переходів можна створити теоретичну базу для розробки нових високоінтенсивних технологій у різних галузях промисловості, зокрема технологію виробництва дрібнопористих теплоізоляційних матеріалів. У даній роботі знайдені: умови рівноваги газу агента-пороутворювача в пористому матеріалі; тиск газу агента-пороутворювача всередині замкнутої сферичної пори в стані рівноваги; температура газу агента-пороутворювача всередині замкнутої сферичної пори в стані рівноваги.

Ключові слова: пористість, структуроутворення, рівновага, агент-пороутворювач, тиск, сферична пора, температура.

Поступила (received) 08.12.2015