3. **Rogers, S.E.** Comparison of implicit schemes for the incompressible Navier–Stokes equations and artificial compressibility [Text]/ S.E. Rogers // AIAA J. – 1995. – Vol.33, № 11. – P. 2066–2072.

4. Restatement of the Spalart–Allmaras eddy–viscosity model in strain–adaptive formulation [Text]/ T. Rung, U. Bunge, M. Schatz, F. Thiele // AIAA J. – 2003. – Vol.4, № 7. – P.1396–1399.

5. **Spalart, P.R.** A one–equation turbulence model for aerodynamic flow [Text]/ P.R. Spalart, S.R. Allmaras // AIAA Paper. – 1992. – № 439. – P. 21.

6. **Whitfield, D.L.** Numerical solution of the two–dimensional time–dependent incompressible Euler equations [Text]/ D.L. Whitfield, L.K. Taylor // Mississippi state university NACA–CR–195775. – 1994. – P. 65.

Надійшла до редколегії 12.04.2016

УДК 532.546:533.15

В.О.Сясев, І.В.Селезньова, О.І.Губін, Н.В.Селезньова

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

ПРОНИКНЕННЯ ГАЗУ КРІЗЬ ПОРИСТИЙ МАТЕРІАЛ ЗА ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

Статтю присвячено дослідженню газопроникності пористих твердих матеріалів. Продемонстровано, що актуальність цього питання обумовлена тим, що багато агрегатів у сучасних умовах функціонують в агресивних середовищах зі значним перепадом тиску, тому необхідно певним чином захистити основний матеріал конструкції. Показано, що для захисту основного матеріалу від дії агресивного середовища його покривають шаром легкого твердого неметалевого матеріалу, який є пористий, при цьому такий захисний шар повинен відповідати визначеним вимогам із газопроникності. Доведено, що експериментальне дослідження газопроникності досить трудомістке і дороге, тому необхідне теоретичне вивчення цього процесу. Розглянуто задачу проникнення газу крізь пористу тверду стінку із заданими фізичними властивостями, який проникає із одного обмеженого об'єму в інший за зміни перепаду тиску. Задачу розв'язано в безрозмірному вигляді із застосуванням методів скінченних різниць і прогонки. Розроблено алгоритм розрахунку задачі і його програмну реалізацію на мові програмування Delphi. Результати розрахунку наведено у вигляді графіків залежності тиску від часу та координати за товщиною пористої стінки, а також графіків залежності витрат газу від часу.

Ключові слова: пористість, проникнення, газопроникність, рівняння напірної фільтрації, пористе середовище.

Статья посвящена исследованию газопроницаемости пористых твердых материалов. Продемонстрировано, что актуальность этого вопроса обусловлена тем, что многие агрегаты в современных условиях функционируют в агрессивных средах с высоким перепадом давления, поэтому необходимо определенным образом защитить основной материал конструкции. Показано, что для защиты основного материала от действия агрессивной среды его покрывают слоем легкого твердого неметаллического материала, представляющего собой пористую среду, и при этом такой защитный слой должен соответствовать определенным требованиям по газопроницаемости. Продемонстрировано, что экспериментальное исследование газопроницаемости достаточно трудозатратное и дорогостоящее, поэтому необходимо теоретическое изучение этого процесса. Рассмотрена задача проникновения газа через пористую твердую стенку с заданными физическими свойствами, который проникает из одной емкости в другую при изменении перепада давления. Задача решена в безразмерном виде с применением методов конечных разностей и прогонки. Разработан алгоритм расчёта задачи и его программная реализация на языке программирования Delphi. Результаты расчета представлены в виде графиков зависимости давления от времени и координаты по толщине пористой стенки, а также графиков зависимости расхода газа от времени.

Ключевые слова: пористость, проникновение, газопроницаемость, уравнение напорной фильтрации, пористая среда.

© Сясев В.О., Селезньова І.В., Губін О.І., Селезньова Н.В., 2016

The article is concerned with investigations of gas permeability of porous solid materials. The urgency of this task stems from the fact that many aggregates in the current conditions are operating with high differential pressure in the aggressive medium, therefore there is a need of protection the main material of the construction. The basic material is covered with a layer of light solid nonmetallic material forming the protective layer, which constitutes the porous medium. This protective layer must conform to the certain requirements of the gas permeability. The experimental study of the gas permeability is quite time–consuming, therefore the theoretical study of this process is be of interest. In this work is considered the task of permeation of gas through the porous solid walls with prescribed physical properties, which penetrate from one receptacle to another while changing of the pressure. This task was achieved in the non–dimensional form using the finite difference method and the elimination method. The algorithm is implemented in programming language Delphi. The results of computation of the task are represented as the pressure–time diagram through the thickness of the porous wall, and also as the dependency graphs of the gas flow from time.

Key words: porosity, permeation, gas permeability, relation of the pressure filtration, porous medium.

Вступ. Пористі матеріали широко застосовують у різних галузях промисловості. Фільтрувальні елементи із пористих матеріалів застосовують для очищення рідин і газів від забруднень в авіаційній, автотракторній, хімічній, нафтовій, харчовій, машинобудівній та інших галузях промисловості.

Багато агрегатів у сучасних умовах функціонують в агресивних середовищах зі значним перепадом тиску, тому проблема захисту основного матеріалу конструкції досить актуальна. З метою захисту від агресивного середовища основний матеріал покривають шаром легкого твердого неметалевого матеріалу, що являє собою пористе середовище. Цей захисний шар повинен відповідати певним вимогам із газопроникності.

Оскільки робочий тиск покриттів сягає значної величини, експериментальне дослідження газопроникності трудомістке і дороге, а в деяких випадках неможливе через неприпустимість багаторазових навантажень конструкції. Тому необхідне теоретичне вивчення газопроникності пористих твердих матеріалів [1].

Фізична постановка задачі. Розглянемо процес проникності газу із обмеженого об'єму V_1 із тиском P_A в обмежений об'єм V_2 із тиском P_0 ($P_A > P_0$) через тверду пористу стінку із заданою пористістю *П*. Необхідно визначити поля тисків за товщиною пористої стінки і витрату газу залежно від часу, якщо до початку подачі газу під тиском P_A по всій стінці був тиск P_0. Загальний вигляд розрахункової моделі наведено нижче (рис.1).

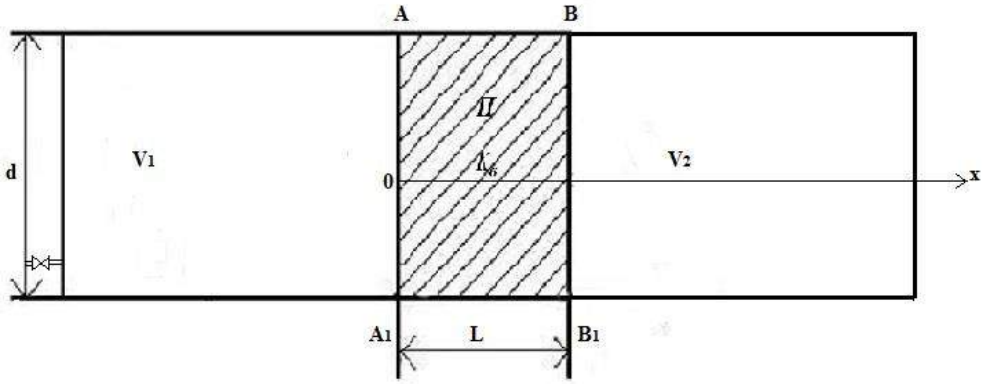

Рис.1. Загальний вигляд розрахункової моделі

Пористе середовище характеризується відповідним коефіцієнтом пористості *П* і газопроникності K_B. У результаті перепаду тиску газ починає проникати через пористе середовище. В обмеженому об'ємі V_1 тиск зменшується, а в обмеженому об'ємі V_2 – збільшується. Таким чином, із часом перепад тиску на межах AA_1 та BB_1 змінюється.

У процесі розв'язання задачі було зроблено такі припущення:

– даний випадок – випадок напірної фільтрації;

– досліджуваний газ – досконалий;

– розглядуваний процес – ізотермічний.

Математична постановка задачі. Для формулювання математичної постановки задачі розглянемо диференціальне рівняння напірної фільтрації, що описує цей процес [3]:

$$\frac{\partial P^2}{\partial \tau} = \frac{KP}{\Pi\eta}\nabla^2 P^2, \tag{1}$$

де *P*– тиск; τ – час; *K* – коефіцієнт питомої газопроникності; *П* – пористість; η – коефіцієнт динамічної в'язкості газу.

Як перше наближення можна обрати $P=P_0$. Оскільки розглянутий випадок одновимірний, то в результаті одержимо рівняння напірної фільтрації у вигляді

$$\frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2} = \frac{\Pi\eta}{KP_0}\frac{\partial P^2}{\partial \tau}. \tag{2}$$

Уведемо безрозмірні змінні: $X = \frac{x}{L}$ – безрозмірна координата; $\Theta = \frac{KP_0\tau}{\Pi\eta L^2}$ – безрозмірний час; $\tilde{P} = \frac{P}{P_0}$ – безрозмірний тиск; $\tilde{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}$ – безрозмірна густина; $\tilde{m} = \frac{m}{m_0}$ – безрозмірна маса; P_0, ρ_0, m_0 – початкові значення параметрів ($\tau=0$) в обмеженому об'ємі V_2.

Початкову умову в безрозмірному вигляді запишемо таким чином:

$$\tilde{P}(X,0) = 1. \tag{3}$$

Сформулюємо граничні умови на межі BB_1. Оскільки для досконалого газу $P = \rho RT$, де $\rho = \frac{m}{V}$, то $P(L,\tau) = cm_2$, де $c = \frac{RT}{V_2}$; m_2 – маса газу в обмеженому об'ємі V_2. У момент часу τ вона складається з початкової маси $m_2(0)$ і маси газу, проникаючого в обмежений об'єм V_2 за час τ. Отже, масу газу можна обчислити за формулою

$$m(\tau) = \int_0^\tau \rho S V_x\big|_{x=L} d\tau, \tag{4}$$

де S – площа поперечного перерізу стінки; $\upsilon_x\big|_{x=L}$ – лінійна швидкість газу на межі BB_1, яку можливо розрахувати за формулою Дарсі

$$\upsilon_x = -\frac{K}{\eta}\frac{\partial P}{\partial x}\Big|_{x=L}.$$

Тоді

$$m(\tau) = m_2(0) - S\frac{K}{\eta}\int_0^{\tau}(\rho\frac{\partial P}{\partial x})\Big|_{x=L} d\tau,$$

для тиску

$$P(L,\tau) = c[m_2(0) - S\frac{K}{\eta}\int_0^{\tau}(\rho\frac{\partial P}{\partial x})\Big|_{x=L} d\tau] \quad (5)$$

або

$$P(L,\tau) = P_0 - \frac{ScK}{\eta}\int_0^{\tau}(\rho\frac{\partial P}{\partial x})\Big|_{x=L} d\tau. \quad (6)$$

Перейшовши до безрозмірних величин, остаточно одержимо граничну умову для тиску газу на межі BB_1

$$\tilde{P}(0,\Theta) = \tilde{P}_A + \frac{\Pi SL}{V_1}\int_0^{\Theta}(\tilde{\rho}\frac{\partial\tilde{P}}{\partial X})\Big|_{X=0} d\Theta. \quad (7)$$

Так само одержимо граничну умову на межі AA_1

$$\tilde{P}(1,\Theta) = 1 - \frac{\Pi SL}{V_2}\int_0^{\Theta}(\tilde{\rho}\frac{\partial\tilde{P}}{\partial X})\Big|_{X=1} d\Theta. \quad (8)$$

Оскільки в результаті даного обезрозмірювання маємо, що $\tilde{\rho} = \tilde{m} = \tilde{P}$, то у виразах (7) і (8) замінимо $\tilde{\rho}$ на $\tilde{P}$. У виразі (2) зробимо заміну з урахуванням, що $\tilde{P}^2 = \Phi$. Тоді остаточно матимемо крайову задачу

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial X^2} = \frac{\partial\Phi}{\partial\Theta}, \quad (9)$$

$$\Phi(0,\Theta) = (\tilde{P}_A + \frac{\Pi SL}{V_1}\int_0^{\Theta}(\tilde{P}\frac{\partial\tilde{P}}{\partial X})\Big|_{X=0} d\Theta)^2; \quad (10)$$

$$\Phi(1,\Theta) = (1 - \frac{\Pi SL}{V_2}\int_0^{\Theta}(\tilde{P}\frac{\partial\tilde{P}}{\partial X})\Big|_{X=1} d\Theta)^2. \quad (11)$$

$$\Phi(X,0) = 1. \quad (12)$$

Визначивши поле тиску за товщиною пористої стінки і градієнт тиску на межі BB_1, обчислимо витрату газу за час $\Delta\tau$ за формулою

$$\tilde{G} = \frac{\Pi SL}{V_2}\left(\tilde{P}\frac{\partial\tilde{P}}{\partial X}\right)\Bigg|_{X=1}. \quad (13)$$

Задачу розв’язано в безрозмірному вигляді за допомогою методів скінченних різниць і прогонки [2]. Цей алгоритм реалізовано на мові програмування Delphi.

Розрахунок виконано за таких початкових даних:

$$K = 10^{-16}\,м^2;\ \ T = 298K;\ \ \eta = 18{,}8\cdot 10^{-6}\ \frac{Н}{м^2}c;\ P_0 = 20\cdot 10^5\,Па;\ \ P_A = 1\cdot 10^5\,Па;$$

$$\Pi = 0{,}03;\ \ V_1 = V_2 = V = 0{,}00314м^3;\ \ d = 0{,}1\,м;\ \ L = 0{,}04\,м.$$

Результати роботи та їх аналіз. Результати роботи наведено у вигляді графіків залежності тиску від часу за товщиною пористої стінки, а також графіків залежності витрат газу від часу для безрозмірного комплексу $C = \frac{\Pi SL}{V}$, який характеризує пористе середовище за таких значень: $C = 1 \cdot 10^{-3}$, $C = 3 \cdot 10^{-3}$, $C = 6 \cdot 10^{-3}$ (рис. 2–5).

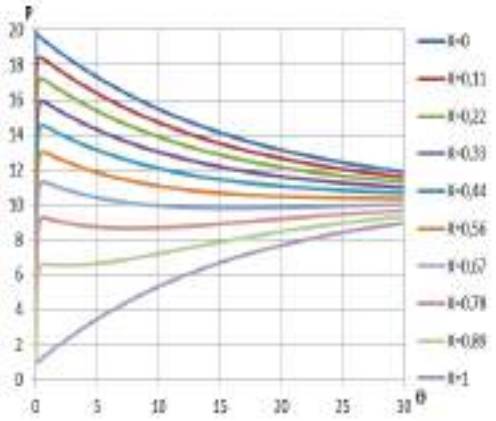

Рис.2. Залежність тиску від часу за відповідних координат X (C=3·10⁻³)

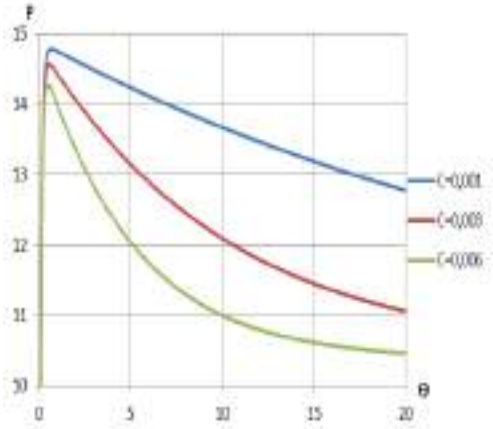

Рис.3. Залежність тиску від часу за відповідних значень C (X=0,44)

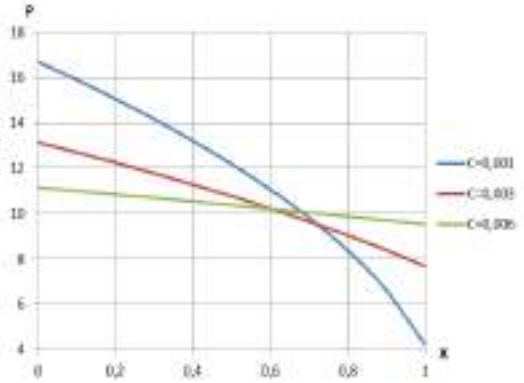

Рис.4. Залежність тиску від координати за відповідних значень C (Θ=20)

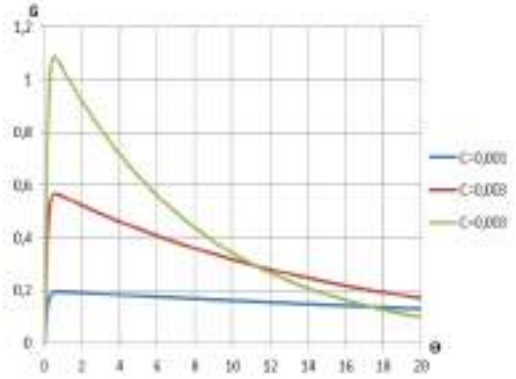

Рис.5. Залежність витрати від часу за відповідних значень C

Як бачимо, чим менший критерій *C*, тим більше змінюється тиск за координатою із часом (рис. 4). Оскільки перепад тиску на стінці зменшується, то й витрата газу із часом зменшуватиметься. Отже, чим менше значення безрозмірного критерію *C*, тим менша витрата із часом (рис.5). Максимальні витрати газу виявлено на проміжку часу 0< Θ <6.

Висновки. Із визначеним полем тиску можна розраховувати міцнісні характеристики пористих матеріалів, застосовних для захисту основних елементів конструкції [4]. Результати, що стосуються витрат газу крізь пористу тверду стінку, дозволяють рекомендувати той або інший матеріал для застосування його як фільтра.

Бібліографічні посилання

1. **Белов, С.В.** Пористые металлы в машиностроении [Текст] / С.В. Белов. – М.:Машиностроение, 1981. – 247 с.

2. **Калиткин, Н.Н.** Численные методы [Текст]/ Н.Н.Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

3. **Лыков, А.В.** Явления переноса в капиллярно-пористых телах [Текст] / А.В.Лыков. – М.: Стройиздат, 1954. – 298 с.

4. **Сясев, В.А.** Проникновения газа через пористую стенку в зависимости от физических свойств газа [Текст] / В.А. Сясев, И.В. Селезнёва // Зб. тез V Міжнарод.наук. конф. Приклад. пробл. аерогідромеханіки та тепломасопереносу.– Д., 2014. –С. 128 – 130.

Надійшла до редколегії 12.06.2016

УДК 622.457:519.6

Н. Н. Беляев[1], Т. И. Русакова[2]

[1]Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

[2]Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИДНЕПРОВСКОЙ ТЭС

Разработаны методика и программное обеспечение для проведения численного расчета при исследовании уровня загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния теплоэлектростанции, в результате деятельности которой в атмосферу поступают газоообразные загрязняющие вещества. Показано, что методика исследования уровня загрязнения атмосферного воздуха при функционировании ТЭС основана на математической модели для расчета концентрации загрязнителя (диоксида азота), которая учитывает процессы химической трансформации диоксида азота в атмосфере. Продемонстрировано, что численная методика базируется на совместном решении уравнений конвективно-диффузионного переноса примеси для каждого загрязнителя, который непосредственно выбрасывается предприятием и образуется дополнительно за счет химических реакций в атмосфере. Методика реализована с применением неявных разностных схем. На основе разработанной математической модели создано программное обеспечение, позволяющее проводить ряд численных экспериментов по исследованию уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами теплоэлектростанции. В результате выполненных расчетов были выделены зоны загрязнения Приднепровской ТЭС атмосферного воздуха диоксидом азота. Определены районы, которые наиболее подвержены загрязнению с учетом влияния метеорологических условий. Доказано, что созданное программное обеспечение необходимо для получения количественных результатов по оценке уровня концентрации загрязнителей в атмосфере с целью экологически безопасного функционирования крупных промышленных объектов, которые оказывают техногенное влияние на окружающую среду.

Ключевые слова: теплоэлектростанция, интенсивность выброса загрязнителя, концентрация загрязняющего вещества, химическая трансформация, уравнение переноса примеси, численная модель.

Розроблено методику та програмне забезпечення для проведення числового розрахунку під час дослідження рівня забруднення атмосферного повітря в зоні впливу теплоелектростанції, у результаті діяльності якої в атмосферу потрапляють газоподібні забруднюючі речовини. Показано, що методика дослідження рівня забруднення атмосферного повітря під час

© Беляев Н. Н., Русакова Т. И., 2016