

УДК 519.711.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ БИНАРНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Семенов Борис Васильевич¹,
semenov062@yandex.ru

Шумкина Мария Валерьевна¹,
mashynya86rus@mail.ru

Лапик Наталья Владиславовна¹,
lnw2@yandex.ru

Попова Надежда Владимировна¹,
kafedra5@yandex.ru

¹ Институт геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70.

Построение математических моделей течений неоднородных (многокомпонентных, многофазных) сред требует создания адекватного описания процессов переноса. При традиционных постановках задач процессов природного и техногенного характера, к которым относятся задачи атмосферных явлений, моделирования технологических установок и биологических систем, возникает необходимость учета многих особенностей, обусловленных присутствием примесной фазы, особенно с достаточно высокой концентрацией примесного компонента. Объем выбросов автотранспортных средств, негативно сказывающихся на состоянии атмосферы, напрямую зависит от качества производимых систем фильтрации и эффективности их работы, что объясняет крайнюю необходимость изучения процессов нейтрализации опасных газовых смесей. Исследование таких систем затрагивает фундаментальные аспекты реологии и описания систем при наличии крупномасштабных (обусловленных наличием несущей среды) межчастичных корреляций.

Актуальность работы обусловлена необходимостью решения одной из глобальных экологических проблем, в частности загрязнения воздуха вредными выбросами автотранспорта. Особое место в решении этой проблемы отводится системам нейтрализации, позволяющим снизить токсичность выхлопных газов автомобиля, и тем самым повысить его экологичность.

Объект исследований – процессы фильтрации бинарной газовой смеси выхлопных газов в бензиновых двигателях внутреннего сгорания в неизоотермических условиях через фильтроэлемент, полученный с использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на основе карбида титана.

Метод исследования: микроскопический (молекулярно-кинетический) подход к реализации математической модели фильтрации двухкомпонентной смеси через пористую матрицу.

Результаты. Предложена математическая модель фильтрации двухкомпонентной газовой смеси в неизоотермических условиях, получена длина фильтроэлемента, газодинамические коэффициенты (коэффициенты Кнудсеновской и взаимной диффузии, вязкость) для численной реализации модели.

Ключевые слова:

Фильтрация бинарной газовой смеси, модель, время протекания химической реакции, концентрация реагирующего вещества, энергия активации, компонент смеси, коэффициент Кнудсеновской диффузии, самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

Введение

Изучение течений неоднородных (многокомпонентных, многофазных) сред связано с решением задач природного и техногенного характера, к которым относятся задачи моделирования технологических установок и биологических систем. Построение моделей таких течений требует создания адекватного описания процессов переноса, технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) для получения пористых проницаемых материалов. При традиционных постановках этих задач возникает необходимость учета многих особенностей, обусловленных присутствием примесной фазы, особенно с достаточно высокой концентрацией примесного компонента. Исследование таких систем затрагивает фундаментальные аспекты реологии и описания систем при

наличии крупномасштабных (обусловленных наличием несущей среды) межчастичных корреляций. Необходимо, чтобы результаты вычислений, согласно математической модели, согласовывались с физическим экспериментом и одновременно математическая модель должна быть достаточно простой для практического использования.

Описание процесса фильтрации бинарной газовой смеси

Существуют различные подходы к математическому описанию процессов фильтрации многокомпонентных газовых смесей, однако большинство всех исследователей рассматривают вопросы разработки математической модели с применением макроскопического подхода, с использованием уравнения Навье–Стокса, уравнения массового и

теплового баланса [1–7]. Для численной реализации такого подхода требуется:

- математическое описание геометрии порового канала;
- дискретизация производных конечными разностями на равномерных декартовых сетках;
- независимость формы записи линейных соотношений, аппроксимирующих краевые условия от вида уравнений для внутренних точек области.

Из выше рассмотренного подхода ясно, что он требует подробного описания геометрии поровых каналов, краевых и граничных условий, что практически невозможно для решения задачи фильтрации отработанных газов через фильтроэлемент со сложной внутренней геометрией [1, 8, 9].

Поэтому рассмотрим другой подход – молекулярно-кинетический, описывающий процессы переноса в пористых средах: модель запылённого газа. Он основывается на аддитивности вязкого и диффузионного потоков, используется весь аппарат кинетической теории Чепмена–Энскога [10, 11] для смеси газов, в которой пористая среда рассматривается как один из компонентов смеси. В этом подходе изменение давления можно формально описать через изменение мольной доли «пылевого» компонента.

Стремительное увеличение числа автомобилей на планете оказывает пагубное влияние на состояние окружающей среды и здоровье человека [12]. Вследствие неполного сгорания топлива в атмосферу выбрасываются такие токсичные химические вещества, как угарный газ (CO), оксиды серы (SO₂, SO₃), оксида азота (NO₂), а также твердые частицы золы [1, 13, 14]. Объем автомобильных выбросов, негативно сказывающихся на состоянии атмосферы, напрямую зависит от качества производимых систем фильтрации и эффективности их работы, что объясняет крайнюю необходимость изучения процессов нейтрализации опасных газовых смесей.

Актуальность подобных исследований обусловлена тем, что подобные явления реализуются в широком спектре природных, технических и технологических процессов.

В настоящей работе обсуждается процесс фильтрации бинарной газовой смеси в неизоотермических условиях. Течение смеси проходит через фильтроэлемент, полученный на основе технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, который представляет собой набор извилистых цилиндрических пор малого диаметра в твердом теле [15–17, 14].

В основе исследования лежат положения молекулярно-кинетической теории, главной идеей которой является модель «запыленного» газа. Её суть заключается в замене пористой среды системой «гигантских молекул». Фильтрация газа при этом предстает как простая диффузия газа и «пыли», что позволяет для построения теории воспользоваться готовыми результатами обычной ки-

нетической теории газов. Использование такой модели дает возможность точно описать процессы переноса газа в пористых средах, а также сосредоточить внимание на формулах и результатах вычислений, избегая громоздких доказательств.

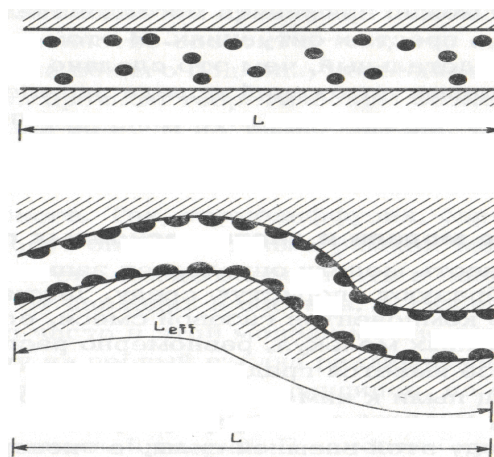


Рис. 1. Схематическое изображение модели запыленного газа

Fig. 1. Schematic representation of dusty gas model

Реализация задачи производится при помощи методов математического моделирования процессов фильтрации согласно следующей последовательности:

- расчет времени протекания химической реакции;
- расчет необходимых коэффициентов для проведения численного эксперимента;
- расчет скорости химической реакции и определение длины поры.

Результаты исследования

1. Расчет времени протекания химической реакции рассмотрим на примере CO+O₂

Для нахождения времени протекания любой химической реакции необходимо решать прямую задачу химической кинетики. Знание кинетического уравнения реакции в дифференциальной форме позволяет определить время достижения некоторой заданной концентрации реагирующего вещества (продукта реакции).

Система кинетических уравнений в дифференциальной форме запишется следующим образом [18]:

$$D(t, C) = \begin{cases} -kC_{CO}C_{O_2}, \\ -\frac{p}{q}kC_{CO}C_{O_2}, \end{cases} \quad (1)$$

где C_{CO} , C_{O_2} – начальные концентрации газов; k – константа скорости реакции; p – порядок химической реакции; q – стехиометрический коэффициент. Температурную зависимость константы скорости довольно точно описывает уравнение Аррениуса:

$$k(T) = Ae^{-\frac{E_A}{RT}}, \quad (2)$$

здесь $R=8,3114$ Дж/(моль·К) – универсальная постоянная газовая; $T=700$ °С (973,1 К) – температура реакции; A – предэкспоненциальный множитель; E_A – энергия активации.

Учитывая необходимые величины [18]: $E_A=200$ Дж/моль, $A=2,5 \cdot 10^{12}$ см³/(моль·с), при $T=1500$ –3000 К, вычислим константу скорости реакции окисления окиси углерода:

$$k(T)=46,0269 \text{ см}^3/(\text{моль} \cdot \text{с}).$$

Важно заметить, что приведенные значения E_A и A используются в расчетах правомерно, не взирая на то, что температура T исследуемой реакции меньше 1500 К. Дело в том, что при использовании карбида титана в фильтроэлементе в качестве катализатора полное окисление СО наблюдается при температуре, приблизительно втрое меньшей необходимой для совершения реакции без использования катализатора [15]. Следовательно, данные характеристики реакции можем использовать в интервале температур 500–1000 К.

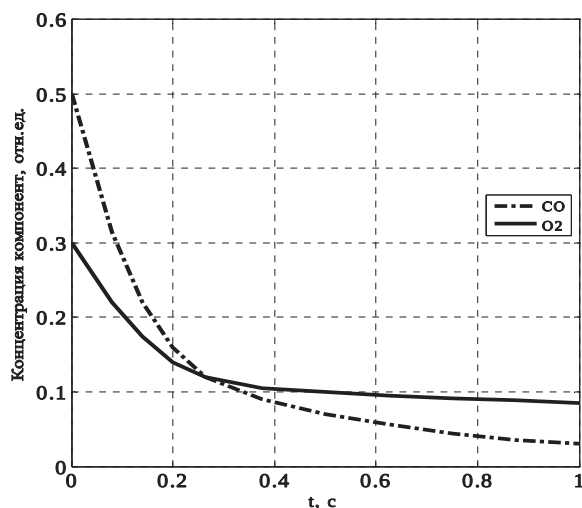


Рис. 2. Изменение концентраций компонент CO и O₂ с течением времени

Fig. 2. Change in concentrations of CO and O₂ components over time

На графике (рис. 2) изображена зависимость концентраций реагентов от времени протекания химической реакции, где f_1 – концентрация окиси углерода, f_2 – концентрация кислорода, t – время протекания реакции. Время окисления окиси углерода кислородом $t=0,265$ с, что подтверждает согласованность полученного результата с результатами проводимых экспериментов [18].

II. Расчет коэффициентов для проведения численного эксперимента

Для нахождения численного решения поставленной задачи необходимо вычислить все неизвестные коэффициенты, фигурирующие в математической модели неизотермического процесса фильтрации бинарных газовых смесей:

тической модели неизотермического процесса фильтрации бинарных газовых смесей:

$$\frac{J_1}{D_{12}} + \frac{J_2}{D_{21}} = - \left[1 + \frac{pB_0}{\eta Dk} \right] \frac{1}{k_B T} \frac{\partial p}{\partial z} - [n_1 \alpha_{1t} + n_2 \alpha_{2t}] \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (3)$$

с граничными условиями:

$$p_0 = p_0^0, \quad p_1 = p_1^0, \quad T_0 = T_0^0, \quad T_1 = T_1^0, \quad (4)$$

где J_1, J_2 – поток компонент; D^{12}, D^{21} – коэффициенты взаимной диффузии; B^0 – параметр вязкого течения; p – давление; η – вязкость смеси;

$$\frac{1}{Dk} \equiv \frac{x_1}{D_{1k}} + \frac{2}{D_{2k}}, \quad x_1 \text{ – мольная первая компонента;}$$

D_{1k}, D_{2k} – коэффициенты кнудсеновской диффузии; k_B – коэффициент Больцмана; n_1, n_2 – концентрации компонент; α_{1t}, α_{2t} – поправочные термодиффузионные коэффициенты. При $J_1=J_2=0$ получаем стационарный перепад давления.

Коэффициент кнудсеновской диффузии D_{ik} пропорционален средней скорости молекул $\bar{v}$. Принято выделять эту пропорциональность в явном виде, вводя безразмерный параметр кнудсеновского течения K_0 . Для длинной цилиндрической трубы радиусом r и диффузного закона отражения молекул от ее поверхности $K_0=r/2$ [10, 19, 20].

Коэффициенты взаимной диффузии вычисляются по формуле

$$D_{i,j} = 10^{-16} \left(\frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\mu_j} \right)^{0,5} \frac{T^{1,5}}{P(d_i + d_j)} \quad (\text{м}^2 \cdot \text{Па}) / \text{с}. \quad (5)$$

Формула расчета коэффициента кнудсеновской диффузии:

$$D_{ik} = (4/3) K_0 \bar{v}_i = \frac{2r}{3} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m_i}}, \quad (6)$$

где k_B – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура газа, К; r – радиус поры, m_i – масса молекулы, кг.

Для нахождения коэффициента динамической вязкости η смеси газов может быть использована приближенная формула аддитивности:

$$\frac{\mu_{\text{смеси}}}{\eta_{\text{смеси}}} = \sum_i \frac{y_i \mu_i}{\eta_i}, \quad (7)$$

где y_i – объемная доля i -го компонента; μ_i – молярные массы i -й компоненты смеси; η_i – вязкость i -й компоненты смеси. Тогда для газовой смеси вязкость определяется по формуле

$$\eta_{\text{смеси}} = \frac{\mu_{\text{смеси}}}{\sum_i \frac{y_i \mu_i}{\eta_i}} = \frac{\frac{m_1 \mu_1}{\rho_1} + \frac{m_2 \mu_2}{\rho_2}}{\frac{m_1 \mu_1}{\eta_1 \rho_1} + \frac{m_2 \mu_2}{\eta_2 \rho_2}}. \quad (8)$$

$$\eta_{\text{смеси}} = 8,2909 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

III. Расчет скорости реакции и длины поры

Перепад давления, для пор фильтра из СВС материала, ΔP вычисляется по формуле:

$$\Delta P = \eta \frac{\rho v^2 L}{2D}, \quad (9)$$

где ρ – плотность газовой смеси, кг/м³; v – средняя скорость потока газовой смеси, м/с; η – вязкость смеси, Па·с; L – длина поры, м; D – диаметр поры, м.

Зная все значения, получим выражение для длины поры и вычислим ее рекомендуемое значение при $v=0,2763$ м/с:

$$L = \frac{2D\Delta P}{\eta \left(\frac{\sum_{i=1}^2 m_i}{\sum_{i=1}^2 \frac{m_i}{\mu_i}} \right) P} v^2 \quad (10)$$

$$L = 0,1557 \text{ м.}$$

Необходимо отметить, что на практике истинная длина фильтроэлемента уменьшается по сравнению с длиной поры, т. к. пористое тело рассматривается как набор извилистых каналов в твердом теле.

Для реализации поставленной задачи вычислены все необходимые коэффициенты, фигурирую-

щие в разработанной математической модели неизо термического процесса фильтрации бинарных газовых смесей (3). Дальнейшее исследование предполагает составление уравнения (3) в конечных разностях и его численную реализацию.

Выводы

1. Данный подход позволяет оценить время химических реакций окисления окиси углерода и азота и других компонент, входящих в состав газовой смеси. На основе анализа численного эксперимента могут быть получены геометрические размеры фильтроэлементов (длина и диаметр пор) и рассмотрена возможность решения обратной задачи процесса фильтрации многокомпонентных газовых смесей.
2. На основе математических моделей, предложенных в [10, 21], адаптирована математическая модель (подобраны поправочные термодиффузионные коэффициенты при изотермическом переносе через капилляр одного моля газа) фильтрации двухкомпонентной газовой смеси в неизо термических условиях.
3. Дальнейшее исследование предполагает составление разностной схемы для проведения численного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евстигнеев В.В. Математическая модель фильтрования цилиндрической поверхности СВС-фильтра // Ползуновский вестник. – 2004. – № 4. – С. 205–210.
2. Nishanth Dongari, Amit Agrawal. Modeling of Navier–Stokes equations for high Knudsen number gas flows // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – V. 55. – Iss. 15–16. – P. 4352–4358.
3. Pratibha Pandey, Chauhan R.S. Membranes for gas separation // Progress in Polymer Science. – 2001. – V. 26. – № 6. – P. 853–893.
4. Mathematical modeling of a novel tubular micro-solid oxide fuel cell and experimental validation / Saeid Amiri, R.E. Hayes, K. Nandakumar, Partha Sarkar // Chemical Engineering Science. – 2010. – V. 65. – № 22. – P. 6001–6013.
5. Peng Dai, Dennis Jh.S., Scott S.A. Using an experimentally-determined model of the evolution of pore structure for the gasification of chars by CO₂ // Fuel. – 2016. – V. 171. – P. 29–43.
6. Понамарёв А.И., Зарипова К.Р. Численное моделирование неизо термической нестационарной фильтрации для различных постановок задач // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 3. – С. 228–262.
7. Глазов С.В. Фильтрационное горение углеродсодержащих систем в противотоке: дис. ... д-ра. физ.-мат. наук. – Черноголовка, 2012. – 424 с.
8. Афанасьев А.А. Термогидродинамика бинарной смеси в пористой среде // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (5). – С. 1978–1980.
9. Лаевский Ю.М., Якушева Л.В. Численное моделирование фильтрационного горения газа на основе двухуравневых полунейных разностных схем // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12. – № 2. – С. 90–103.
10. Мейсон Э., Малинаускас А. Перенос в пористых средах: модель запыленного газа / пер. с англ. В.И. Ролдугина; под ред. С.П. Баканова. М.: Мир, 1986. – 200 с.
11. Suresh K. Bhatia, Nicholson D. Some pitfalls in the use of the Knudsen equation in modeling diffusion in nanoporous materials // Chemical Engineering Science. – 2011. – V. 66. – Iss. 3. – P. 284–293.
12. Вольнов А.С., Третьяк Л.Н. О системном подходе к оценке влияния автотранспортных средств в процессе эксплуатации на экологию городов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – № 1. – С. 161.
13. Новоселов А.Л., Павлов С.Н., Жуйкова А.А. Эффективность применения пористых проницаемых СВС-каталитических блоков в нейтрализаторах // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей. – Барнаул, 2006. – С. 47–56.
14. Григорян Э.А., Мержанов А.Г. Катализаторы XXI века // НАУКА – ПРОИЗВОДСТВУ. – 1998. – № 3 (5). – С. 30–41.
15. Мержанов А.Г. Концепция развития СВС как область научно-технического прогресса. – Черноголовка: Изд-во «Территория», 2003. – 368 с.
16. Computational solutions for non-isothermal, nonlinear magnetoconvection in porous media with hall/ionslip currents and ohmic dissipation / O. Anwar Bég, S. Abdul Gaffar, V. Ramachandra Prasad, M.J. Uddin // Engineering Science and Technology. – 2016. – V. 19. – № 1. – P. 377–394.
17. Использование СВС-технологии для получения пористых проницаемых блоков каталитических нейтрализаторов / Д.С. Печенникова, А.А. Жуйкова, А.А. Новоселов, А.В. Унгефук // Ползуновский альманах. – 2011. – № 2. – С. 136–138.
18. Горшков В.И., Кузнецов И.А. Основы физической химии. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 408 с.
19. Justifying the significance of Knudsen diffusion in solid oxide fuel cells / Fei Yang, Jianmin Gu, Luhan Ye, Zuoxiang Zhang, Gaofeng Rao, Yachun Liang, Kechun Wen, Jiyun Zhao, Jh.B. Goudenough, Weidong He // Energy. – 2016. – V. 95. – P. 242–246.
20. Evans K.W. The simulations of tubular solid oxide fuel cells (SOFCs) // Chemical Engineering Journal. – 2011. – Iss. 168. – P. 1301–1310.
21. Семенов Б.В. Математическое моделирование процессов течения двухкомпонентной смеси через пористую структуру // Вестник кибернетики. – 2012. – № 11. – С. 98–102.

Поступила 09.03.2016 г.

Информация об авторах

Семенов Б.В., кандидат технических наук, доцент кафедры кибернетических систем Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

Шумкина М.В., магистрант кафедры кибернетических систем Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

Лапик Н.В., старший преподаватель кафедры кибернетических систем Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

Попова Н.В., старший преподаватель кафедры кибернетических систем Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

UDK 519.711.2

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF NON-ISOTHERMAL FILTRATION FLOWS OF BINARY GAS MIXTURE

Boris V. Semenov¹,
semenov062@yandex.ru

Mariya V. Shumkina¹,
mashnya86rus@mail.ru

Natalya V. Lapik¹,
lnw2@yandex.ru

Nadezhda V. Popova¹,
kafedra5@yandex.ru

¹ Industrial University of Tyumen,
70, Melnikaite street, Tyumen, 625038, Russia.

Construction of mathematical models of flows of heterogeneous (multicomponent, multiphase) media requires an adequate description of transport processes. In traditional formulations of problems of natural and technogenic character processes, including the problems of atmospheric phenomena, modeling of process plants and biological systems, there is a need to take into account different features caused by the presence of impurity phase, especially with a sufficiently high concentration of impurity component. The volume of emissions from vehicles, affecting the state of the atmosphere, depends on the quality of the manufactured filtration systems and the effectiveness of their work, which explains the extreme necessity of studying neutralization of dangerous gas mixtures. The study of such systems affects the fundamental aspects of rheology and description of systems in the presence of large-scale (caused by the presence of the carrier medium) interparticle correlations.

The relevance of the work is caused by the need to solve one of the global environmental problems, in particular pollution of air by harmful emissions of vehicles. A special place in solving this problem goes to neutralization systems which allow reducing toxicity of vehicle exhaust gases, and thereby increasing its sustainability.

The object of study is the filtration of a binary gas mixture of exhaust gases in gasoline internal combustion engines in non-isothermal conditions through the filter element produced using self-propagating high-temperature synthesis on the basis of titanium carbide.

Research method: the microscopic (molecular-kinetic) approach to implementation of mathematical model of filtration of a two-component mixture through a porous matrix.

Results. The authors have proposed the mathematical model of filtration of a two-component gas mixture in non-isothermal conditions and obtained the length of the filter element, the gas-dynamic factors (Knudsen coefficients and mutual diffusion, viscosity) for model numerical implementation.

Key words:

Filtration of binary gas mixture, model, flow time of a chemical reaction, reactant concentration, activation energy, mixture component, Knudsen diffusion factor, self-propagating high-temperature synthesis.

REFERENCES

1. Evstigneev V.V. Mathematical model of filtration of SVS-filter cylindrical surface. *Polzunovsky vestnik*, 2004, no. 4, pp. 205–210. In Rus.
2. Nishanth Dongari, Amit Agrawal. Modeling of Navier–Stokes equations for high Knudsen number gas flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, no. 15–16, pp. 4352–4358.
3. Pratibha Pandey, Chauhan R.S. Membranes for gas separation. *Progress in Polymer Science*, 2001, vol. 26, no. 6, pp. 853–893.
4. Saeid Amiri, Hayes R.E., Nandakumar K., Partha Sarkar. Mathematical modeling of a novel tubular micro-solid oxide fuel cell and experimental validation. *Chemical Engineering Science*, 2010, vol. 65, no. 22, pp. 6001–6013.
5. Peng Dai, Dennis Jh.S., Scott S.A. Using an experimentally-determined model of the evolution of pore structure for the gasification of chars by CO₂. *Fuel*, 2016, vol. 171, pp. 29–43.
6. Ponamarjov A.I., Zaripova K.R. Numerical simulation of nonstationary non-isothermal filtration for a variety of productions tasks. *Neftegazovoe delo*, 2013, no. 3, pp. 228–262.
7. Glazov S.V. *Filtratsionnoe gorenie uglerodsoderzhashchikh sistem v protivotoke*. Dis. Kand. nauk [Filtration combustion of carbon-containing systems in counter-current. Cand. Diss.]. Chernogolovka, 2012. 424 p.
8. Afanasyev A.A. Thermohydrodynamic of binary mixture in a porous medium. *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*, 2011, no. 4 (5), pp. 1978–1980. In Rus.
9. Laevsky Yu.M., Yakusheva L.V. Numerical simulation of filtration gas combustion on the basis of two-level semi-implicit difference schemes. *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2007, vol. 12, no. 2, pp. 90–103. In Rus.
10. Meison E.H., Malinauskas A. *Perenos v poristyykh sredakh: model zaplyennogo gaza* [Transfer in porous media: the dusty gas model]. Translated from English by V.I. Roldugin. Ed. by S.P. Bakanov. Moscow, Mir Publ., 1986. 200 p.
11. Suresh K. Bhatia, Nicholson D. Some pitfalls in the use of the Knudsen equation in modeling diffusion in nanoporous materials. *Chemical Engineering Science*, 2011, vol. 66, no. 3, pp. 284–293.
12. Volnov A.S., Tretyak L.N. O sistemnom podkhode k otsenke vliyaniya avtotransportnykh sredstv v protsesse ekspluatatsii na ekologiyu gorodov [A systematic approach to assessing the impact of

- motor vehicles in operation on ecology of cities]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 1, pp. 161.
13. Novoselov A.L., Pavlov S.N., Zhuykova A.A. Effektivnost primeneniya poristyykh pronitsaemykh SVS-kataliticheskikh blokov v neytralizatorakh [Efficiency of application of porous permeable SVS-blocks in catalytic converters]. *Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti avtotraktornoy tekhniki. Sbornik statey* [Increase of ecological safety of automotive engineering]. Barnaul, 2006. pp. 47–56.
 14. Grigoryan E.A., Merzhanov A.G. Katalizatory XXI veka [The catalysts of the XXI century]. *NAUKA – PROIZVODSTVO*, 1998, no. 3 (5), pp. 30–41.
 15. Merzhanov A.G. *Kontseptsiya razvitiya SVS kak oblast nauchno-tekhnicheskogo progressa* [The concept of development of SHS as a field of scientific and technical progress]. Chernogolovka, Terrioriya Publ., 2003. 368 p.
 16. O. Anwar Bég, S. Abdul Gaffar, V. Ramachandra Prasad, Uddin M.J. Computational solutions for non-isothermal, nonlinear magneto-convection in porous media with hall/ion slip currents and ohmic dissipation. *Engineering Science and Technology*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 377–394.
 17. Pechennikova D.S., Zhuykova A.A., Novoselov A.A., Ungefuk A.V. Use of SHS technology for producing porous permeable blocks of catalytic converters. *Polzunovsky almanah*, 2011, no. 2, pp. 136–138. In Rus.
 18. Gorshkov V.I., Kuznetsov I.A. *Osnovy fizicheskoy khimii* [Fundamentals of physical chemistry]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znany Publ., 2011. 408 p.
 19. Fei Yang, Jianmin Gu, Luhan Ye, Zuoxiang Zhang, Gaofeng Rao, Yachun Liang, Kechun Wen, Jiyun Zhao, Jh.B. Goodenough, Weidong He. Justifying the significance of Knudsen diffusion in solid oxide fuel cells. *Energy*, 2016, vol. 95, pp. 242–246.
 20. Evans K.W. The simulations of tubular solid oxide fuel cells (SOFCs). *Chemical Engineering Journal*, 2011, no. 168, pp. 1301–1310.
 21. Semenov B.V. Mathematical modeling of liquid mixture flow through a porous structure. *Vestnik kibernetiki*, 2012, no. 11, pp. 98–102. In Rus.

Received: 9 March 2016.

Information about the authors

Boris V. Semenov, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

Mariya V. Shumkina, graduate student, Industrial University of Tyumen.

Natalya V. Lapik, senior lector, Industrial University of Tyumen.

Nadezhda V. Popova, senior lector, Industrial University of Tyumen.