

УДК 533.599.2

И.В. Секачев^{1,2}, В.А. Мазур¹

¹⁾ Одесская национальная академия пищевых технологий, учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082

²⁾ TRIUMF, Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕЙ В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрена фрактальная модель микротрещин в материале стенок охлаждаемых вакуумных сосудов для экспериментального образца термоядерного реактора. Приведена оценка потери давления при течи жидкости через сеть микроканалов. Физический механизм проникновения потока охлаждающей жидкости через гипотетические щели и трещины, образующие древовидную структуру микроканалов, описывается линейными соотношениями неравновесной термодинамики для заданного перепада давлений на стенках сосуда. На основе методов компьютерной флюидной динамики в рамках однородной модели сплошной среды рассчитан расход жидкости для изотермического потока.

Ключевые слова: Микротрещины – Вакуумные системы – Фрактальные модели – Утечка газов – Древовидные микроканалы

I.V. Sekachev^{1,2}, V.A. Mazur¹

¹⁾ Одеська національна академія харчових технологій, навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В.С. Мартинівського, вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082

²⁾ TRIUMF, Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЙ В ВАКУУМНИХ СИСТЕМАХ

Розглянуто фрактальну модель мікротріщин в матеріалі стінок охолоджуваних вакуумних посудин для експериментального зразку термоядерного реактора. Наведено оцінку втрати тиску при течії рідини через мережу мікроканалів. Фізичний механізм проникнення потоку охолоджуючої рідини через гіпотетичні щілини і тріщини, що утворюють деревоподібну структуру мікроканалів, описується лінійними співвідношеннями термодинаміки для заданого перепаду тисків на стінках посудини. На основі методів комп'ютерної флюїдної динаміки в рамках однорідної моделі суцільного середовища розраховано витрати рідини для ізотермічного потоку.

Ключові слова: Микротріщини – Вакуумні системи – Фрактальні моделі – Витік газів – Деревовидні мікроканали

I.V. Sekachev^{1,2}, V.A. Mazur¹

¹⁾ Odessa National Academy of Food Technologies, Dvoryanskaya str., 1/3, Odessa, 65082

²⁾ TRIUMF, Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics

SIMULATION OF LEAKS IN THE VACUUM SYSTEMS

Fractal model of microfractures in the walls of cooled vacuum vessels for experimental thermonuclear reactor was considered. Pressure losses for fluid flow through microchannel network were estimated. Physical mechanism of cooling fluid penetration via hypothetical slits and cracks generating tree-structured microchannel network is described by the linear non-equilibrium thermodynamic relationships at the given pressure drop on the vessel walls. Computer fluid dynamics approach for homogeneous equilibrium model was applied to calculate the isothermal fluid flow.

Keywords: Microfractures – Vacuum systems – Fractal models – Gas leakage – Tree-structured microchannels

І.ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время 80% потребляемой миром энергии создается за счет сжигания ископаемых природных топлив (нефть, уголь и газ), использование которых несет потенциальную угрозу катастрофических экологических изменений и ведет к неизбежному истощению ресурсов. Наиболее важным направлением в получении энергии, необходимой для успешного развития цивилизации является термоядерный синтез, хотя перспективы его

реализации пока остаются неопределенными. Возможность коммерческого использования термоядерного реактора для решения физических и технологических проблем осуществляется в рамках международного проекта ИТЕР [1]. Реализация данного проекта наряду с ядерно-физическими задачами требует создания сложных вакуумных систем, которые обеспечивают высокие показатели характеристик плазмы. Проектируемая вакуумная система включает камеру Токамака – тороидальной установки для магнитного удержания

плазмы, объемом порядка 1400 м^3 (давление $\sim 10^6 \text{ Па}$); вакуумный криостат для тепловой изоляции сверхпроводящих обмоток магнитов (объем порядка 8500 м^3 , давление $\sim 10^{-4} \text{ Па}$); инжекторы пучков нейтральных частиц (объем порядка 600 м^3 , давление $\sim 10^{-7} \text{ Па}$), а также дополнительные устройства вакуумирования для диагностики и тестирования. Предполагается, что Токамак будет включать 3 взаимосвязанные охлаждающие системы, где в качестве хладоносителей используются вода, жидкий азот и жидкий гелий. Эти системы обеспечат отвод теплоты в результате термоядерной реакции порядка 450 МВт. Из них снижение температуры до 80К и отвод 1300 кВт теплоты обеспечивает контур с азотным уровнем температур. Система охлаждения с жидким гелием понижает температуру до 4.5К и отводит около 75 кВт теплоты.

Раннее обнаружение утечек и их локализация являются серьезной проблемой при оценке работы вакуумных систем, стенки которых охлаждаются водой. Поэтому моделирование истечения водяных паров через микротрещины защитных покрытий в вакуум представляет значительный интерес для повышения надежности работы термоядерного реактора.

Цель настоящей статьи – моделирование течений пароводяных потоков в порах защитных покрытий в зависимости от внешних условий (температуры и давления) и геометрических параметров микротрещин.

В работе рассмотрена фрактальная модель микротрещин в материале стенок охлаждаемых вакуумных сосудов и дана оценка потери давления при течении жидкости через сеть микроканалов. Физический механизм проникновения потока охлаждающей жидкости через гипотетические щели и трещины, образующие древовидную структуру микроканалов, описывается линейными соотношениями неравновесной термодинамики для заданного перепада давлений на стенках сосуда. Расход жидкости для изотермического потока определяется на основе методов компьютерной флюидной динамики в рамках однородной модели сплошной среды.

II. МОДЕЛЬ МИКРОТРЕЩИН В СТЕНКЕ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Моделирование утечек газов в вакуум через стенки сосудов обычно проводится для простейших геометрических конфигураций каналов (чаще всего цилиндрических или конических) [2] – [8].

Реальная картина трещин в материале стенок значительно сложнее и представляет собой древовидную структуру, в которой распространяется парогазовый поток. Современные представления о дефектах материалов стенок вакуумных сосудов основаны на фрактальных моделях [9] – [10], [15] (рисунок 1), которые более адекватно отражают механизм утечки газов через стенки сосудов

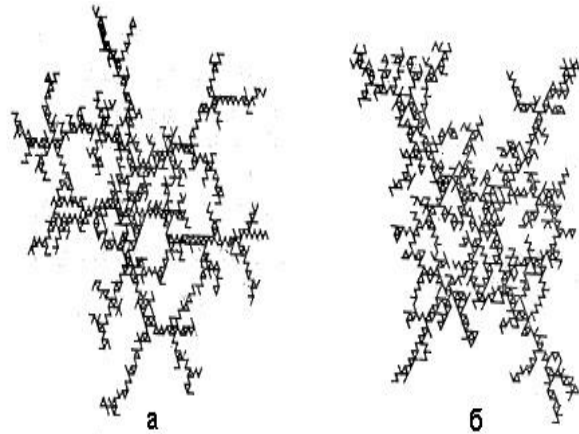


Рисунок 1 – Возможные фрактальные структуры древовидных микроканалов, имитирующие трещины в стенке сосуда а) перколяционная модель б) агрегационная модель [15].

Рассматривая предельный случай, когда сеть трещин охватывает всю поверхность стенки сосуда (т.е., отдельные микроканалы, размерность которых равна единице, полностью покрывают плоскость размерности $\Delta = 2$), можно прийти к выводу, что реальное решение задачи следует искать для случая дробной размерности $1 \leq \Delta \leq 2$. Микротрещины, образующие сеть микроканалов в стенках сосудов, можно моделировать как фрактальную систему, обладающую промежуточной размерностью. В простейшем случае, когда размерность равна единице, утечка газов происходит через один микроканал. Для системы микротрещин максимальное значение утечки достигается, когда сеть микроканалов полностью покрывает поверхность стенки сосуда. В данной работе рассмотрен один из возможных алгоритмов генерации сети микротрещин на основе свойства самоподобия для длин и диаметров микроканалов. Обозначив соотношение между длинами предыдущего и последующего каналов как $\varepsilon = \frac{L_{k+1}}{L_k}$, для произвольного k – уровня из условия самоподобия получим уравнение

$$L_k = L_0 \varepsilon^k \quad (1)$$

Для древовидных каналов определение фрактальной размерности [10] $N = \gamma^{-D}$ позволяет связать отношение длин каналов данного и последующего уровней ветвления γ :

$$\varepsilon = N^{-\frac{1}{D}}, \quad (2)$$

где N - число ветвей, на которое раздваивается простой канал (рисунок 2).

Еще одной геометрической характеристикой сети служит отношение гидравлических диаметров – β , с помощью которой можно связать ее фрактальную размерность с уравнением самоподобия для диаметров каналов – Δ :

$$d_k = d_0 \beta^k . \quad (3)$$

Уравнения (1) и (3) генерируют древовидную структуру микроканалов системы различных дефектов в стенках вакуумных сосудов. Управление фрактальной размерностью или, соответственно, варьирование длинами и диаметрами каналов, позволяет имитировать различные степени проницаемости материалов стенок вакуумных систем и оценить величину возможных утечек газов.

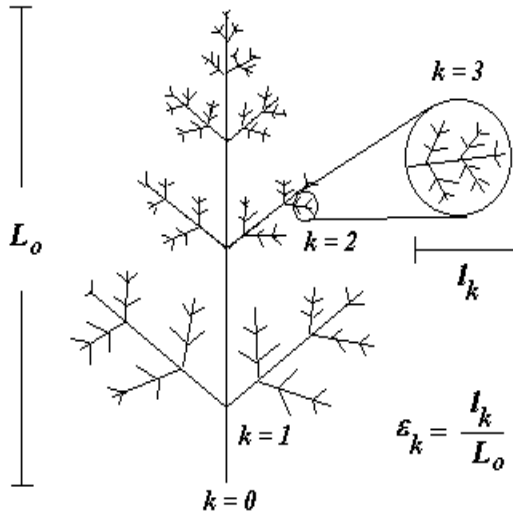


Рисунок 2 – Бифуркация микроканала

Потери давления в сети микротрещин, если пренебречь нелинейными эффектами разветвления, для ламинарного течения ньютоновской жидкости записываются в виде:

$$\Delta p = 2 \sum_{k=0}^m \frac{A}{d_k^2} L_k w_k \quad (4)$$

где A – постоянная, зависящая от конфигурации канала, w_k – скорость течения жидкости в канале для k – го уровня ветвления. Из закона сохранения массы $w_k d_k^2 N^k = w_0 d_0^2$ легко получить аналог уравнения самоподобия для скорости

$$w_k = w_0 \left(\frac{d_0}{d_k} \right)^2 N^{-k} . \quad (5)$$

Суммарная площадь сети микроканалов цилиндрической формы вычисляется по формуле:

$$F = 2 \sum_{k=0}^m F_k = 2 \sum_{k=0}^m \pi d_k L_k N^k . \quad (6)$$

Таким образом, окончательное выражение для определения потери давления в древовидной сети микроканалов записывается в виде:

$$\Delta p = 2 \sum_{k=0}^m \frac{A}{d_k^4} L_k d_0^2 N^{-k} w_0 , \quad (7)$$

где легко устанавливается связь с расходом протекающего газа $G = \frac{\pi d_0^2}{4} w_0$. Калибровочная посто-

янная A в уравнении (7) подбирается по имеющимся экспериментальным данным. Длина микроканала варьировалась в интервале от 0.03 до 0.01 м, диаметр для определенности выбирали равным 7 микронам. Давление на входе в микроканалы полагали равным 0.5 МПа, на выходе – 0.1 МПа. Температуру задавали равной 420К. Для упрощения вычислений вязкость воды и водяного пара считали постоянными: $1.85 \cdot 10^{-4}$ Па.с и $1.4 \cdot 10^{-5}$ Па.с, соответственно.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ФЛЮИДОВ В СЕТИ МИКРОТРЕЩИН

В основу расчетов протекания жидкости через микротрещины положены следующие допущения:

- газовая и жидкая фазы находятся в механическом и тепловом равновесии, т.е. их давления и температуры одинаковы;
- отсутствует четкая граница раздела между фазами;
- процессы мгновенного вскипания демпфируются за счет выбора очень малого времени релаксации $\sim 10^{-8}$ с.

Моделирование течения флюидов в микротрещинах проводили на основе уравнений сохранения массы, импульса и энергии, соответственно:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial x_j} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial (\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_j H)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_{eff} \left(\frac{\partial H}{\partial x_j} \right) \right] + S\{H\}, \quad (9)$$

В перечисленных уравнениях используется правило суммирования индексов Эйнштейна ($i, j = 1, 2, 3$). Эффективная вязкость и эффективный коэффициент диффузии определяются следующими соотношениями:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t; \quad \Gamma_{eff} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t}, \quad (10)$$

в которых приняты следующие обозначения: μ – динамическая вязкость, μ_t – коэффициент турбулентной вязкости, H – энтальпия, U – скорость, ρ – плотность, Pr, Pr_t – числа Прандтля.

Для двухфазного потока используется однородная равновесная модель, в которой предполагается выполнение термодинамических условий равновесия для скоростей, давлений и температур сосуществующих фаз [11].

Для смеси идеальных газов, в которой присутствует жидкая фаза (в данном случае, вода) уравнение состояния имеет вид:

$$p = \frac{T \sum_i^{i \neq h2o1} R_i \rho_i}{\theta} = \frac{\rho T \sum_i^{i \neq h2o1} R_i X_i}{\theta} . \quad (11)$$

Объемная фракция газовой смеси вычисляется через отношение плотностей смеси и жидкой фазы

$$\theta = 1 - \theta_l = 1 - \frac{\rho_{h2ol}}{\rho_{h2ol}^{thermo}} \quad (12)$$

Для обеспечения термодинамической согласованности расчетов все термодинамические функции воды и водяного пара рассчитывали на основе уравнения Вагнера – Пруса [12].

Модели термодинамических свойств включены в программу COMSOL [13]. Исходные данные для материалов были взяты по данным работы [14]. Для нержавеющей стали основные свойства представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства нержавеющей стали

Плотность	7804 кг/м ³
Теплоемкость (Cp)	506 Дж/кг К
Теплопроводность	15.4 Вт/м К

На рисунке 3 в качестве иллюстрации показана двумерная область вычислений на фрактальной решетке для адиабатических условий.

Дискретизация области вычислений, которая включает нерегулярную структуру микротрещин и материала стенок вакуумных сосудов проводится на конечном элементе с разбиением 5×5 узлов для выбранной модели генерации фрактала. Общая область вычислений содержит 204×204 узлов.

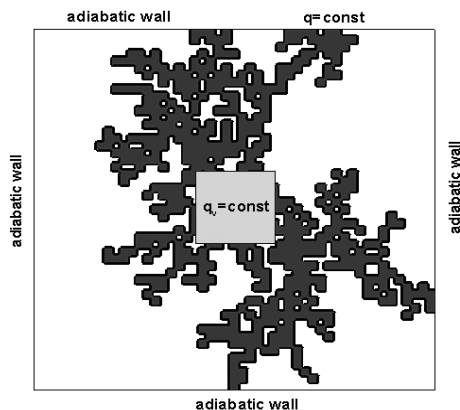


Рисунок 3 – Граничные условия для области вычислений для сети микротрещин, сформированной в процессе агрегации кластера

На рисунке 4 показан процесс достижения стационарного состояния.

Наличие фрактальной структуры «обгоняет» начало процесса испарения по сравнению с одиночным микроканалом и тем самым способствует увеличению утечек газа в вакуум. Начало процесса испарения происходит, когда давление становится равным давлению насыщения (в нашем случае, это наблюдается на расстоянии около 2 мм от входа). В этой точке происходит

резкий скачок скорости от 0.03 мс⁻¹ до 15 мс⁻¹, которая на выходе достигает значения до 60 мс⁻¹.

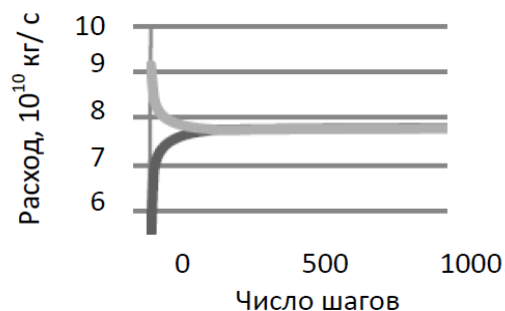


Рисунок 4 – Установление стационарного состояния при утечке газов через микротрещины в стенках вакуумных сосудов из нержавеющей стали. Более светлая линия показывает расход газа на входе.

Увеличение фрактальной размерности сети микроканалов приводит к увеличению расхода двухфазных сред в древовидных структурах по сравнению с параллельными микроканалами, что способствует возрастанию утечек газов в вакуум. Это явление наблюдается и в нанопорах [16].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках гомогенной равновесной модели разработан метод учета фрактальной структуры различного рода неоднородностей в стенках материалов вакуумных сосудов. По сравнению с традиционными способами предсказания утечек газов через стенки сосудов, в которых рассматриваются простейшие конфигурации микроканалов, использование фрактальной картины позволяет сделать вывод о заниженном прогнозе утечек газов в стандартных моделях.

Оценка расхода газов через систему микроканалов, имитирующих реальную картину микротрещин в материалах стенок вакуумных сосудов, может быть использована для уточнения требований к разрабатываемым датчикам обнаружения утечек.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/ITER>
2. Liu, B., Shi, C., Gu, F., and Bhandari, S., Leak Rate Evaluation for Through-Wall Cracks, Transactions SMiRT 16, Washington DC, 2001.
3. Sharipov F., 'Non-isothermal gas flow through rectangular microchannel', J. Micromech. Microeng. 9 (1999), pp. 394-401.
4. Pantazis, S. Varoutis, S. Hauer, V. Day C., Valougeorgis D. Gas-surface scattering effect on vacuum gas flows through rectangular channels. Vacuum, 85 (12, SI) 2011, pp. 1161–1164.

5. **S. Varoutis, V. Hauer, C. Day, S. Pantazis, D. Valougeorgis** Experimental and numerical investigation in flow configurations related to the vacuum systems of fusion reactors. Volume 85, Issues 10–12, December 2010, Pages 1798–1802. Proceedings of the Ninth International Symposium on Fusion Nuclear Technology.
6. **Sharipov F.** Numerical simulation of rarefied gas flow through a thin orifice. *J Fluid Mech* 2004; 518: pp. 35-60.
7. **Varoutis S, Valougeorgis D, Sazhin O, Sharipov F.** Rarefied gas flow through short tubes into vacuum. *J Vac Sci Technol A* 2008; 26(2): pp. 228-238.
8. **Sharipov F, Kozak D.** Rarefied gas flow through a thin slit into vacuum simulated by the Monte Carlo method over the whole range of the Knudsen number. *J Vac Sci Technol A* 2009; 27(3): pp. 479-484.
9. **Cherepanov, G., Balankin, A., Ivanova V.** Fractal Fracture Mechanics--a Review. *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 51, No. 6, pp. 997-1033, 1995
10. **Erdem, S., Blankson M.** Fractal-fracture analysis and characterization of impact-fractured surfaces in different types of concrete using digital image analysis and 3D nanomap laser profilometry. *Construction and Building Materials*. Volume 40, March 2013, pp. 70-76
11. **Travis J. R, Spore J. W. Royl P., Lam K. L., Wilson T. L., Müller C. Necker G. A. Nichols B. D., Redlinger R.,** (GASFLOW: A Three-Dimensional Finite-Volume Fluid-Dynamics Code for calculating the Transport, Mixing and Combustion of Flammable Gases and Aerosols in Geometrically Complex Domains, Volume 1, Theory and Computational Model.
12. **Wagner, W. and Pruss, A.,** 2002, The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 31, pp. 387-535.
13. **COMSOL:** <http://www.comsol.com>.
14. ITER Documentation Series,. Blanket, Shield Design and Material Data, Base No 29, IAEA, Vienna 1991.
15. **B.B. Mandelbrot,** *The Fractal Geometry of Nature*// Freeman, New York, 1982.
16. **A. E. Velasco, S. G. Friedman, M. Pevarnik, Z. S. Siwy, and P. Taborek.** Pressure-driven flow through a single nanopore *Physical Review E* 86, 025302(R), 2012.
4. **Pantazis, S. Varoutis, S. Hauer, V. Day C., Valougeorgis D.** Gas-surface scattering effect on vacuum gas flows through rectangular channels. *Vacuum*, 85 (12, SI) 2011, pp. 1161–1164.
5. **S. Varoutis, V. Hauer, C. Day, S. Pantazis, D. Valougeorgis** Experimental and numerical investigation in flow configurations related to the vacuum systems of fusion reactors. Volume 85, Issues 10–12, December 2010, Pages 1798–1802. Proceedings of the Ninth International Symposium on Fusion Nuclear Technology.
6. **Sharipov F.** Numerical simulation of rarefied gas flow through a thin orifice. *J Fluid Mech* 2004; 518: pp. 35-60.
7. **Varoutis S, Valougeorgis D, Sazhin O, Sharipov F.** Rarefied gas flow through short tubes into vacuum. *J Vac Sci Technol A* 2008; 26(2): pp. 228-238.
8. **Sharipov F, Kozak D.** Rarefied gas flow through a thin slit into vacuum simulated by the Monte Carlo method over the whole range of the Knudsen number. *J Vac Sci Technol A* 2009; 27(3): pp. 479-484.
9. **Cherepanov, G., Balankin, A., Ivanova V.** Fractal Fracture Mechanics--a Review. *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 51, No. 6, pp. 997-1033, 1995
10. **Erdem, S., Blankson M.** Fractal-fracture analysis and characterization of impact-fractured surfaces in different types of concrete using digital image analysis and 3D nanomap laser profilometry. *Construction and Building Materials*. Volume 40, March 2013, pp. 70-76
11. **Travis J. R, Spore J. W. Royl P., Lam K. L., Wilson T. L., Müller C. Necker G. A. Nichols B. D., Redlinger R.,** (GASFLOW: A Three-Dimensional Finite-Volume Fluid-Dynamics Code for calculating the Transport, Mixing and Combustion of Flammable Gases and Aerosols in Geometrically Complex Domains, Volume 1, Theory and Computational Model.
12. **Wagner, W. and Pruss, A.,** 2002, The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 31, pp. 387-535.
13. **COMSOL:** <http://www.comsol.com>.
14. ITER Documentation Series,. Blanket, Shield Design and Material Data, Base No 29, IAEA, Vienna 1991.
15. **B.B. Mandelbrot,** *The Fractal Geometry of Nature*// Freeman, New York, 1982.
16. **A. E. Velasco, S. G. Friedman, M. Pevarnik, Z. S. Siwy, and P. Taborek.** Pressure-driven flow through a single nanopore *Physical Review E* 86, 025302(R), 2012.

REFERENCES

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/ITER>
2. **Liu, B., Shi, C., Gu, F., and Bhandari, S.,** Leak Rate Evaluation for Through-Wall Cracks, *Transactions SMiRT* 16, Washington DC, 2001.
3. **Sharipov F.,** 'Non-isothermal gas flow through rectangular microchannel', *J. Micromech. Microeng.* 9 (1999), pp. 394-401.

Получена в редакції 14.08.2013, прийнята к печати 04.09.2013