

УДК 622.411.332:533.17

Дреус А.Ю., канд.техн. наук, доцент,
Сясев В.О., канд.техн. наук, доцент
(Державний ВНЗ «ДНУ ім. О.Гончара»),
Дзюба С.В., канд.техн. наук, ст. наук. співр.,
Киричко С.М., канд.техн. наук
(ІГТМ НАН України)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ МЕТАНУ НА РЕЖИМ ТЕЧІЇ ПОВІТРЯНО–МЕТАНОВОЇ СУМІШІ У МІКРОКАНАЛІ

Дреус А.Ю., канд.техн. наук, доцент,
Сясев В.А., канд.техн. наук, доцент
(Государственное ВУЗ «ДНУ им. О.Гончара»)
Дзюба С.В., канд.техн. наук, ст. научн. сотр.
Киричко С.Н., канд.техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА НА РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУШНО-МЕТАНОВОЙ СМЕСИ В МИКРОКАНАЛЕ

Dreus A.Y., Ph.D. (Tech.), Associate Professor,
Syasev V.A., Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(State HEI «Oles Honchar DNU»)
Dziuba S.V., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Kyrychko S.N., Ph.D. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

INVESTIGATION OF METHANE CONCENTRATION IMPACT ON THE REGIME OF THE AIR-METHANE MIXTURE FLOWING IN THE MICROCHANNELS

Анотація. В роботі проведено аналіз підходів до моделювання режимів течії повітряно-метанових сумішей з урахуванням концентрації метану. Запропоновано методику визначення змін режимів течій цієї суміші в мікроканалах та визначені закономірності зміни режимів течії в залежності від перепаду тиску та концентрації метану. В результаті проведених досліджень показано, що збільшення процентного вмісту метану в суміші призводить до збільшення меж в'язкісного та молекулярного режимів течій. Представлено границі переходу від молекулярного до проміжного режиму течії та від проміжного до в'язкісного режиму течії для різних концентрацій метану у суміші. Отримані результати представляють інтерес для розрахунку витоків газу крізь нещільності в трубопроводах, паливних баках, герметичної техніки, а також для прогнозування стану атмосфери у вугільних виробках.

Ключові слова: повітряно-метанова суміш, газові потоки, мікроканал, режими течії, концентрація метану.

Вступ. Дослідження течій газів в мікроканалах представляє інтерес для багатьох технологій.

Огляд різноманітних технічних додатків, в яких такі течії відіграють важливу роль, фізичні основи та підходи до моделювання таких процесів наведено в монографії [1]. Зокрема, необхідність вивчення газових потоків крізь мікроканали виникає при розгляді проблем герметизації паливних баків, систем наддуву, трубопровідного транспорту, апаратів, які довгий час зберігають або працюють в контакті з агресивними середовищами та легкозаймистими речовинами. При довготривалому контакті з агресивними середовищами чи токсичними речовинами можливі витоки через мікронещільності в зварних та роз'ємних з'єднаннях, а також в основному матеріалі при зміні умов експлуатації.

Вивчення течії газів в мікроканалах представляє також інтерес для дослідників процесів фільтрації метану у вугільних пластах. Відомо, що метан у вугільному пласті знаходиться як в адсорбованому стані на поверхні вугільної речовини, так і в вільному газоподібному стані в системі пор та тріщин [2]. Порушення рівноваги пласту, наприклад в результаті буріння свердловин або виїмки вугілля, призводить до масопереносу метану в бік гірничої виробки. Визначення потужності газового потоку важливо, як з точки зору прогнозування вибухонебезпечних ситуацій, так й при розробці новітніх технологій видобутку сланцевого газу.

Дослідженню процесів течій газів в мікроканалах присвячено достатньо велику кількість як експериментальних, так і теоретичних робіт. Техніка та методики експериментальних досліджень детально представлені в [3]. Огляд математичних моделей для дослідження руху в'язкої рідини в каналах і трубах малих діаметрів наведено в роботі [4]. Слід відзначити, що фізична картина в такого роду процесах є достатньо складною, внаслідок чого теоретичне вивчення в багатьох випадках пов'язане з необхідністю розв'язання достатньо громіздких систем рівнянь [5, 6]. Це вимагає використання чисельних методів та потребує значних обчислювальних ресурсів. Окрім того, такі моделі часто потребують модифікації при вивченні різних режимів течії або різних газів, зокрема при вивченні течій одноатомних та двоатомних газів, та ін.

Аналітичну модель для розрахунку потоку метану крізь систему пор у вугільному пласті запропоновано в роботі [7], яка враховує як дифузію газу в вугільних блоках, так і фільтрацію його крізь систему пор та тріщин. Проте, для інженерного розрахунку течії метану та його сумішей більш зручно використовувати методику, що базується на використанні напівемпіричних формул [8], які враховують основні фізичні чинники, що визначають течію, та дозволяють ефективно проводити перерахунки у разі зміни складу газу.

Метою даної роботи є побудова методики та вивчення впливу процентного вмісту метану на характер течії повітряно-метанової суміші крізь мікроканал правильної геометричної форми.

Викладення основного матеріалу. Експериментально встановлено [9], що на витоки газу крізь мікронещільність впливають як фізичні властивості газів, так і тиск в каналі, тиск у зовнішньому середовищі, фізичні властивості газів, геометрія та розміри мікрокапілярів, а також режими течії газу. Для характери-

стики режиму течії використовується критерій Кнудсена $Kn = \lambda/r$, який є відношенням довжини вільного пробігу молекули газу λ до характерного розміру каналу r . Існує наступна класифікація режимів в залежності від числа Кнудсена:

- при $Kn \leq 0.01$ – в'язкісний режим течії;
- при $0.01 \leq Kn \leq 1$ – проміжний режим;
- при $Kn \geq 1$ – молекулярний режим течії.

Розглянемо коротко кожен з вказаних режимів.

При $Kn \leq 0.01$ маємо в'язкісний режим течії. У цьому випадку характер потоку визначається як взаємодією молекул газу зі стінкою каналу, так і зіткненнями молекул в середині об'єму газу. При нормальних умовах газ можна вважати суцільним середовищем, а його витрати крізь циліндричний мікроканал описуються законом Пуазейля (рис.1).

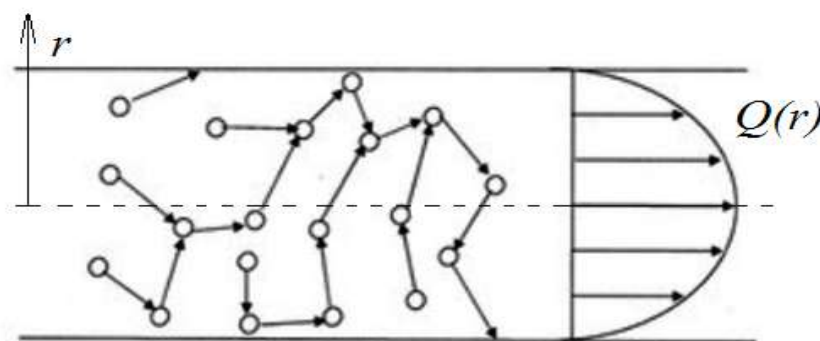


Рисунок 1 - В'язкісний режим течії

Якщо тиск по довжині мікроканалу змінюється від P_1 до P_2 ($P_1 > P_2$), то вираз для об'ємних витрат газу має вигляд

$$Q^v = \frac{\pi r^4}{8\eta l} P_{cp} (P_1 - P_2), \quad (1)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості суміші, l – довжина каналу, r – радіус каналу, $P_{cp} = \frac{1}{2}(P_1 + P_2)$ – середній тиск.

Якщо $Kn \geq 1$, то умова суцільності середовища не виконується, і має місце молекулярний режим течії. В цьому випадку характер течії залежить тільки від взаємодії молекул зі стінками каналу, а профіль швидкості не може бути описаний законом Пуазейля (рис.2).

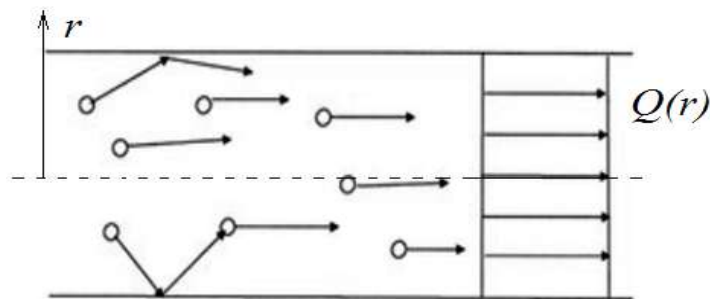


Рисунок 2 - Молекулярний режим течії

В роботі [9] представлено експериментальну формулу для визначення потоку газу при молекулярному режимі течії

$$Q^m = \frac{4}{3} \frac{U_a}{l} (P_1 - P_2) \int_0^H \frac{H}{S^2} dS \quad (2)$$

де H – периметр перерізу каналу, S – площа перерізу каналу, U_a – середньоарифметична швидкість руху молекул. Для прямого циліндричного каналу маємо

$$Q^m = \frac{4}{3} \frac{U_a}{l} (P_1 - P_2) = \frac{2}{3} \pi r^3 \frac{U_a}{l} (P_1 - P_2) \int_0^{\pi r} \frac{2\pi r}{\pi^2 r^4} dx \quad (3)$$

Враховуючи, що $U_a = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$, де R – молярна газова постійна, T – абсолютна температура газу, μ – молярна маса, можемо переписати (3) у вигляді

$$Q^m = \frac{4}{3} \frac{\pi r^3}{l} \sqrt{\frac{2R_0 T}{\pi}} (P_1 - P_2), \quad (4)$$

де $R_0 = \frac{R}{\mu}$ – універсальна газова постійна.

Якщо $0.01 \leq Kn \leq 1$, то має місце проміжний режим течії. Цей режим характеризується зменшенням впливу міжмолекулярної взаємодії та збільшенням ролі зіткнення молекул з стінками каналу. Газ починає ковзати уздовж стінок каналу, й швидкість на стінках каналу не буде дорівнювати нулю (рис.3). Проміжний режим течії газу, в свою чергу, поділяється на режим течії із ковзанням ($0.01 \leq Kn \leq 0.5$) та перехідний режим від режиму із ковзанням до молекулярного ($0.5 \leq Kn \leq 1$).

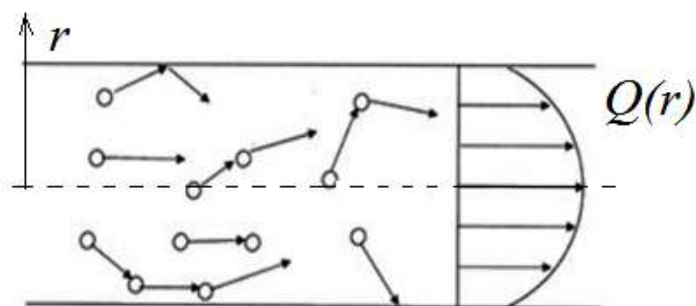


Рисунок 3 - Проміжний режим течії

Формули (1) і (4) дають змогу оцінити потужність витоку газу крізь мікроканал. Але для їх використання необхідно знати режим течії, який залежить як від перепаду тиску, так і від складу газової суміші. Для визначення меж режимів течії і коректних розрахунків витоків за (1) та (4) скористаємось напівемпіричною формулою [9], яка наближено описує потік газу крізь мікроканал для всіх режимів течії

$$Q = \left(\frac{\pi r^4}{8\eta l} P_{cp} + \frac{1 + \frac{2r}{\eta\sqrt{R_0 T}} P_{cp}}{1 + \frac{2.47r}{\eta\sqrt{R_0 T}} P_{cp}} \frac{4r^3}{3l} \sqrt{\frac{2R_0 T}{\pi}} \right) (P_1 - P_2). \quad (5)$$

Визначимо межі режимів течії для випадку потоку крізь мікроканал повітряно-метанової суміші та вплив різної концентрації метану на межі режимів. Приймемо наступні вихідні дані: температура газу постійна $T = 298$ К, радіус каналу $4 \cdot 10^{-7}$ м, довжина каналу $5 \cdot 10^{-7}$ м, $\eta_{\text{CH}_4} = 1168 \cdot 10^{-8}$ Па·с, $\eta_{\text{пов}} = 1840 \cdot 10^{-8}$ Па·с, $\mu_{\text{CH}_4} = 16.04$ кг/кМоль, $\mu_{\text{пов}} = 28.98$ кг/кМоль, при зміні перепаду тиску від $2 \cdot 10^4$ Па до $8 \cdot 10^6$ Па, процентний вміст метану в повітряно-метановій суміші задаємо: 100 %; 90 %; 70 %; 50 %.

Динамічна в'язкість суміші визначається виразом

$$\eta_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_i \frac{r_i}{\eta_i}}$$

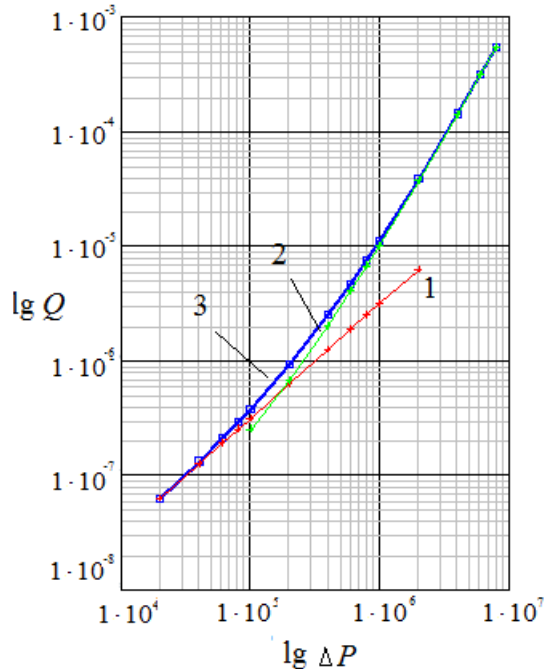
де η_i – динамічна в'язкість компонентів, r_i – об'ємний вміст компонента в суміші.

Молярна маса газової суміші визначається за формулою

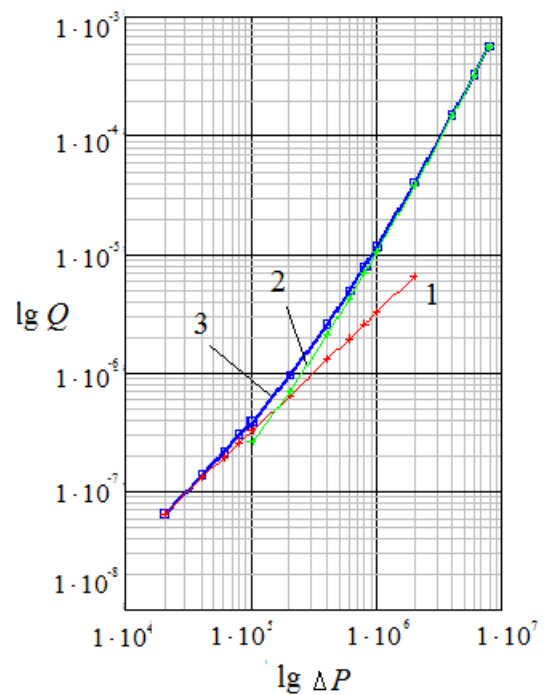
$$\mu_{\text{см}} = \sum_i r_i \cdot \mu_i$$

де μ_i – молярна маса відповідної компоненти.

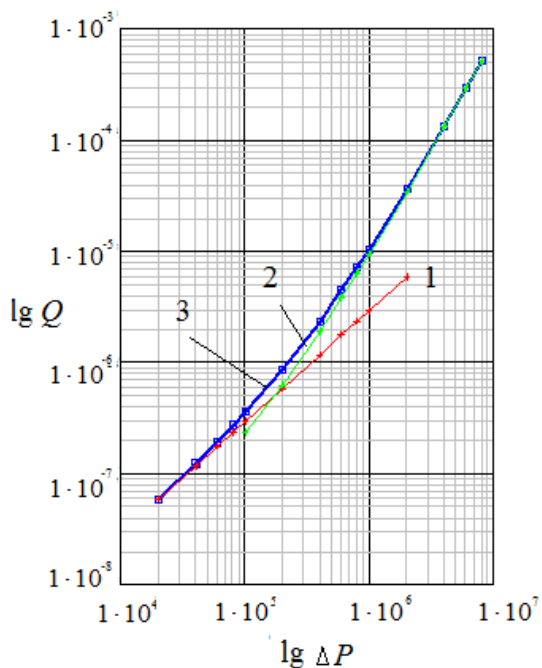
На рис.4 представлені в логарифмічному масштабі залежності потужності потоку суміші від перепаду тиску співвідношеннями (1), (4) та (5), для різних концентрацій метану. Точки відхилення прямих, що будуються на основі виразів (1) і (4) від кривої, побудованої за виразом (5), визначають межі відповідних режимів.



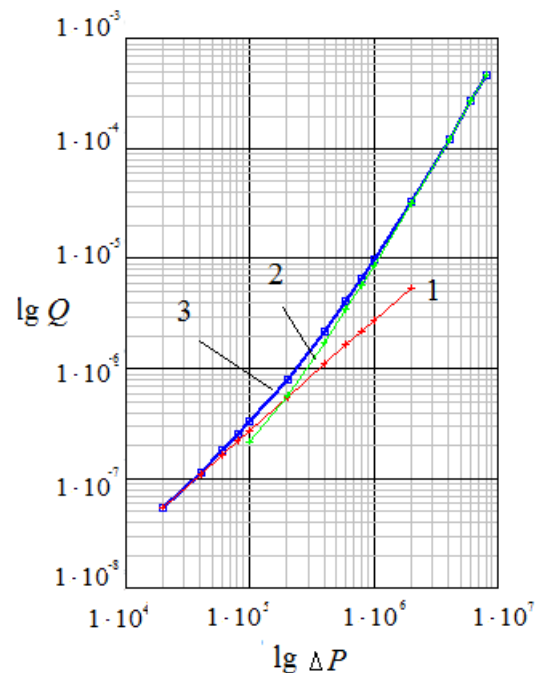
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 - Залежності потужності потоку газу Q від перепаду тиску ΔP для різних концентрацій метану: а) 100 % ; б) 90 %; в) 70 %; г) 50 %

Границі переходу від молекулярного до проміжного режиму течії та від проміжного до вязкісного режиму течії за даними розрахунків представлено у табл.1.

Таблиця 1 - Границі змін режимів течії для різних концентрацій метану

Концентрація метану в суміші, %	Границя переходу молекулярного режиму, $\cdot 10^{-7}$ Вт	Границя переходу в'язкісного режиму, $\cdot 10^{-5}$ Вт
100	1,77	2,63
90	1,71	2,52
70	1,58	2,33
50	1,47	2,15

Отримані результати свідчать, що із збільшенням процентного вмісту метану границі переходу від молекулярного режиму течії до проміжного режиму зміщуються в бік збільшення величини потоку, границя переходу від проміжного режиму до в'язкісного також зміщується в бік збільшення потоку. Але ці зміни границь відбуваються в межах одного порядку: для молекулярного режиму – 10^{-7} Вт, для в'язкісного режиму – 10^{-5} Вт. При перерахунку витоків повітряно-метанових сумішей крізь мікронешільність на інші перепади тиску можна не враховувати вплив процентного вмісту метану на зміну границь течії, та проводити розрахунок як для 70 % вмісту метану.

Висновки.

В роботі запропоновано методику визначення змін режимів течій повітряно-метанової суміші в мікроканалах та досліджено закономірності зміни режимів течії в залежності від перепаду тиску та концентрації метану у суміші. В результаті проведених досліджень показано, що збільшення процентного вмісту метану в суміші призводить до змін меж в'язкісного та молекулярного режимів течій. Отримані дані можуть бути використані для визначення потужностей газових потоків. Для оціночних розрахунків потоків повітряно-метанової суміші крізь мікроканали можна використовувати дані, що відповідають 70 % вмісту метану.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kirby, B. J. Micro-and nanoscale fluid mechanics: transport in microfluidic devices / B.J. Kirby. – Cambridge University Press, 2010. – 513 p.
2. Alexeev, A. D. Phase states of methane in fossil coals / A.D. Alexeev, T.A. Vasilenko, E.V. Ulyanova // Solid State Communication. – 2004. –Vol. 130, N 10. – P. 669 – 673.
3. Методы подготовки испытаний изделий на герметичность в условиях серийного производства / Н.М. Беляев, Ю.Г. Артеменко, В.А. Щукин, В.В. Ефремов. - М.: ЦНИИ информации, 1981. – 304 с.
4. Шарипов, Ф.М. Движение разреженных газов в каналах и микроканалах / Ф.М. Шарипов, В.Д. Селезнев. - Екатеринбург: УрО РАН. – 2008. – 230 с.
5. Kostromin, I.A. Numerical study of the Couette flow of a diatomic rarefied gas / I.A. Kostromin, V.A. Rykov // Comput. Math. and Math. Phys., 2013.- 53: 1684. doi:10.1134/S0965542513110067.
6. Иванов, И. Э. Применение системы уравнений R13 для моделирования течений в микроканалах / И.Э. Иванов, И.А. Крюков, М.Ю. Тимохин //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2013. – Т. 15. – №. 1.

7. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта / А.Д. Алексеев, Т.В. Василенко, К.В. Гуменник [и др.]// Журнал технической физики, 2007. - Том 77, вып. 4. – С. 65-74.

8. Сясев, В.А. Истечение гелия через микроканалы произвольной формы / В.А. Сясев // Численно-аналитическое исследование процессов теплообмена – Д.: Изд-во. ДГУ, 1990. – 110-113.

9. Сясев, В.А. Экспериментальное определение режимов переноса газа через микроканал / В.А. Сясев // Прикладные вопросы теплообмена – Д.: Изд-во. ДГУ, 1977.- С.93-96.

REFERENCES

1. Kirby, B. J. (2010), “Micro-and nanoscale fluid mechanics: transport in microfluidic devices”, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

2. Alexeev, A.D., Vasilenko, T.A. and Ulyanova, E.V. (2004), “Phase states of methane in fossil coals” *Solid State Communication*. vol. 130, no. 10, p. 669 – 673.

3. Belyayev, N.M., Artemenko, Yu.H., Shchukyn, V.A. and Efremov, V.V. (1981), *Metody podgotovky ispytaniy izdelyi na germetichnost v usloviyakh seriyogo proizvodstva* [Methods for preparing leakproofness tests in a batch production], Tsentralnyi nauchno-issledovatel'skiy institut informatsii, Moscow, USSR.

4. Sharyov, F. M. and Seleznev, V. D. (2008), *Dvizhenie razrezhennykh gazov v kanalakh i mikrokanalakh* [Movement of rarefied gases in channels and microchannels], Uralskoe otделение RAS, Ekaterinburg, Russia.

5. Kostromin, I.A. and Rykov, V.A. (2013), “Numerical study of the Couette flow of a diatomic rarefied gas”, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, no.53, p. 1684, doi:10.1134/S0965542513110067.

6. Ivanov, I.E., Kryukov, S.A. and Timokhin, M.Yu. (2013), “Application of the system of equations R13 for simulation of flows in microchannels”, *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike*, vol. 15, no. 1.

7. Alekseev, A.D., Vasilenko, T.V., Humennyk, K.V., Kaluhina, N.A. and Feldman, E.P. (2007), “Diffusion-filtration model of methane output from a coal seam”, *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, vol. 77, no. 4, pp. 65-74.

8. Syasev, V.A. (1990), “The expiration of helium through microchannels of arbitrary shape”, *Chylenno-analiticheskoe issledovanie protsessov teplomassobmena*, Izdatelstvo DSU, p. 110-113.

9. Syasev, V.A. (1977), “Experimental determination of the modes of gas transfer through a microchannel”, *Prikladnye voprosy teplotobmena*, Izdatelstvo DSU, 1977, pp. 93-96.

Про авторів

Дреус Андрій Юльович, кандидат технічних наук, доцент кафедри аерогідромеханіки і енергомасопереносу, Державний вищий навчальний заклад «Дніпровський національний університет ім. О. Гончара» МОН України (ДВУЗ «ДНУ ім. О. Гончара» МОН України), Дніпро, Україна, dreus.andrii@gmail.com.

Сясев Валерій Опанасович, кандидат технічних наук, доцент кафедри аерогідромеханіки і енергомасопереносу, Державний вищий навчальний заклад «Дніпровський національний університет ім. О. Гончара» МОН України (ДВУЗ «ДНУ ім. О. Гончара» МОН України), Дніпро, Україна, dreus.andrii@gmail.com

Дзюба Сергій Володимирович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу геодинамічних систем і вібраційних технологій Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, igtmanu@ukr.net

Киричко Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник відділу геодинамічних систем і вібраційних технологій Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, igtmanu@ukr.net

About the authors

Dreus Andrii Yulievich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), associate professor of Fluid Mechanics and Energy and Mass transfer Department, Oles Honchar Dnipro National University (SHEI «Oles Honchar DNU»), Dnipro, Ukraine, dreus.andrii@gmail.com.

Syasev Valerii Opanasovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), associate professor of Fluid

Mechanics and Energy and Mass transfer Department, Oles Honchar Dnipro National University (SHEI «Oles Honchar DNU»), Dnipro, Ukraine, dreus.andrii@gmail.com.

Dziuba Sergii Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Geodynamic System and Vibration Technologies, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, sergejdzuba@gmail.com.

Kyrychko Sergii Nikolaievich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Junior Researcher in Department of Geodynamic System and Vibration Technologies, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, igtm-nanu@yandex.ua.

Аннотация. В работе проведен анализ подходов к моделированию режимов течения воздушно-метановых смесей с учетом концентрации метана. Предложена методика определения изменений режимов течения смеси в микроканалах, и определены закономерности изменения режимов течения в зависимости от перепада давления и концентрации метана. В результате проведенных исследований показано, что увеличение процентного содержания метана в смеси приводит к увеличению пределов вязкостного и молекулярного режимов течения.

Представлены границы перехода от молекулярного до промежуточного режима течения и от промежуточного к вязкостному режиму течения для различных концентраций метана в смеси. Полученные результаты представляют интерес для расчета утечек газа через неплотности в трубопроводах, топливных баках, герметичной техники, а также для прогнозирования состояния атмосферы в угольных выработках.

Ключевые слова: воздушно-метановая смесь, газовые потоки, микроканал, режимы течения, концентрация метана.

Annotation. In this work, approaches to modeling regimes of air-methane mixtures flowing with taking into consideration methane concentration are analyzed. Method for determining changes of regimes of mixture flowing in the microchannels is proposed, and regularities of flow regime changes depending on pressure drop and methane concentration are established. As a result of the researches, it is shown that increase of methane percentage in the mixture leads to increase of limits of viscosity and molecular flow regimes.

Boundaries of transition from molecular flow regime to the intermediate one and from intermediate flow regime to the viscous one at different methane concentrations in the mixture are presented. The obtained results are useful for calculating gas escaping through the leaks in the pipelines, fuel tanks and hermetically sealed equipment, as well as for predicting atmosphere state in coal-mine tunnels.

Keywords: air-methane mixture, gas flows, microchannel, flow regimes, concentrations of methane.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2017

Рекомендовано до публікації д-ром технічних наук Софійським К.К.