

Моделирование течений разреженного газа в микроканалах со сложной неизотермической границей

Научный руководитель – Якунчиков Артём Николаевич

Косьянчук Василий Викторович

Аспирант

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Механико-математический факультет, Кафедра газовой и волновой динамики, Москва,
Россия

E-mail: vasilii_ksnk@mail.ru

Первые исследования течений разреженного газа под действием температурных эффектов относятся к работам Рейнольдса [1] и Максвелла [2]. Они интересовались в основном эффектом течения за счет температурного скольжения (температурной транспирацией), который наблюдается вблизи неравномерно нагретой поверхности, и направлен в сторону увеличения температуры. Данный эффект был позднее использован Кнудсеном для создания его оригинального насоса без подвижных частей [3].

В наше время известен также ряд других температурных эффектов, реализующихся в разреженном газе: термомстрессовая конвекция [4], температурный краевой поток [5], обратная температурная транспирация [6]. Данные эффекты используются в основном для создания различных улучшенных вариаций оригинального насоса Кнудсена [7-10], однако в последние годы появились также теоретические [11-12] и экспериментальные работы [13-14], посвященные использованию температурных эффектов для разделения газовых смесей.

В настоящей работе проведено численное исследование течения разреженного газа и смесей газов в каналах со сложной геометрией, на стенках которых задан градиент температуры. Все расчеты проводились с использованием метода событийного молекулярно-динамического моделирования EDMD [15]. В результате расчетов было обнаружено, что сложная геометрия приводит к изменению соотношения между потоками газа под действием температуры (температурная транспирация), и под действием давления (течение Пуазейля). Было показано, как такое изменение приводит к увеличению коэффициента температурной транспирации (увеличение эффективности прокачки газов), и к увеличению коэффициента разделения смеси (для многокомпонентных газов).

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [16] и вычислительных ресурсов МСЦ РАН. Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 17-71-10227).

Источники и литература

- 1) Maxwell, J. C. On stresses in rarefied gases arising from inequalities of temperature. Phil. Trans. R. Soc. London 170, 231–256 (1879).
- 2) Reynolds, O. On certain dimensional properties of matter in the gaseous state. Part I. Experimental researches on thermal transpiration of gases through porous plates and on the laws of transpiration and impulsion, including an experimental proof that gas is not a continuous plenum. Part II. On an extension of the dynamical theory of gas, which

- includes the stresses, tangential and normal, caused by a varying condition of gas, and affords an explanation of the phenomena of transpiration and impulsion. Phil.Trans. R. Soc. London 170, 727–845 (1879).
- 3) Knudsen, M. Eine revision der gleichgewichtsbedingung der gase. Thermische molekularstromung. Ann. Phys. 336, 205–229 (1909).
 - 4) Sone, Y. & Tanaka, S. Thermal stress slip flow induced in rarefied gas between noncoaxial circular cylinders. Theoretical and Applied Mechanics 1, 405–416 (1980).
 - 5) Sone, Y. & Yoshimoto, M. Demonstration of a rarefied gas flow induced near the edge of a uniformly heated plate. Phys. Fluids (1994-present) 9, 3530–3534 (1997).
 - 6) Mohammadzadeh, A., Rana, A. S. & Struchtrup, H. Thermal stress vs. thermal transpiration: A competition in thermally driven cavity flows. Phys. Fluids (1994-present) 27, 112001 (2015).
 - 7) Aoki K. et al. A diffusion model for rarefied flows in curved channels //Multiscale Modeling & Simulation. – 2008. – T. 6. – №. 4. – C. 1281-1316.
 - 8) Bond D. M., Wheatley V., Goldsworthy M. Numerical investigation into the performance of alternative Knudsen pump designs //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – T. 93. – C. 1038-1058.
 - 9) Gupta N. K., An S., Gianchandani Y. B. A Si-micromachined 48-stage Knudsen pump for on-chip vacuum //Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2012. – T. 22. – №. 10. – C. 105026.
 - 10) Shahabi V. et al. Thermally induced gas flows in ratchet channels with diffuse and specular boundaries //Scientific reports. – 2017. – T. 7. – C. 41412.
 - 11) Sugimoto H., Takata S., Kosuge S. Gas separation effect of the pump driven by the thermal edge flow //Rarefied Gas Dynamics. – 2007. – C. 1158-1163.
 - 12) Nakaye S. et al. Thermally enhanced membrane gas separation //European Journal of Mechanics-B/Fluids. – 2015. – T. 49. – C. 36-49.
 - 13) Sugimoto H. Experiment on the gas separation effect of the pump driven by the thermal edge flow //AIP Conference Proceedings. – AIP, 2008. – T. 1084. – №. 1. – C. 1123-1128.
 - 14) Matsumoto M., Nakaye S., Sugimoto H. Gas separation by the molecular exchange flow through micropores of the membrane //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2016. – T. 1786. – №. 1. – C. 080011.
 - 15) Bannerman M. N., Sargant R., Lue L. DynamO: a free O(N) general event-driven molecular dynamics simulator //J. Comput. Chem. 2011. V. 32. № 15. P. 3329-3338.
 - 16) V. Sadovnichy, A. Tikhonravov, V. Voevodin, V. Opanasenko "Lomonosov": Supercomputing at moscow state university // Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale. Chapman&Hall: Boca Raton, United States. 2013. P. 283–307.