

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ЧЕРЧИНЬЯНИ-ЛАМПСИС ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОГО НАСОСА

У.С. Гордеева, Ф. Шарипов

АННОТАЦИЯ

В данной работе модель Черчиньяни-Лампис (ЧЛ) использовалась в качестве новых граничных условий при расчете вероятности перехода молекул через одну ступень турбомолекулярного вакуумного насоса (ТВН) методом Монте-Карло. Произведен расчет вероятности перехода молекул через лопаточный канал в прямом и обратном направлениях, результирующей вероятности перехода, степени повышения давления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ, МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО, ДИНАМИКА РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА, МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗА С ПОВЕРХНОСТЬЮ, МОДЕЛЬ МАКСВЕЛЛА, МОДЕЛЬ ЧЕРЧИНЬЯНИ-ЛАМПСИС

APPLICATION OF THE CERCIGNANI-LAMPIS MODEL FOR MATHEMATICAL MODELING OF THE GAS FLOW IN THE MAIN STAGE OF A TURBOMOLECULAR VACUUM PUMP

U.S. Gordeeva, F. Sharipov

ABSTRACT

In this paper, the Cercignani-Lampis (CL) model was used as new boundary conditions for calculating the molecules' transition probability through one stage of the turbomolecular vacuum pump (TMP) by using Direct Simulation Monte Carlo method. The molecules' transition probability through the blade channel in the forward and reverse directions, the resulting transition probability and the compression ratio were calculated.

KEYWORDS

MATHEMATICAL MODELLING, TURBO MOLECULAR VACUUM PUMPS, MONTE-CARLO METHOD, RAREFIED GAS DYNAMICS, GAS-SURFACE INTERACTION MODELS, MAXWELL MODEL, CERCIGNANI-LAMPIS MODEL

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существуют численные и аналитические методы моделирования процесса течения газа в проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса (ТВН). Аналитические модели, разработанные К.Е. Демиховым, Т. Sawada, [1,2], а также численные модели, разработанные Ф.М. Шариповым, Joong-Sik Heo и Young-Kyu Hwang [3,4] позволяют проводить моделирование процесса течения газа в проточной части ТВН, однако в этих математических моделях (ММ) в качестве граничного условия использовалось диффузное взаимодействие газа с поверхностью, при котором различные аспекты

взаимодействия газа с твердой поверхностью учитываются только одним параметром (коэффициентом аккомодации).

В данной работе одной из важнейших составляющих ММ является использование новой модели процесса взаимодействия газа с поверхностью. В большинстве работ используется диффузно-зеркальное отражение. В работе Ф.М. Шарипова [5] исследовано применение ядра рассеяния Черчиньяни–Лампис для расчета течений разреженного газа. Проводилось исследование плоского течения между двумя параллельными пластинами.

Показано, что модель Черчиньяни–Ламписа (ЧЛ) точнее описывает процесс взаимодействия газа с твердой поверхностью. В данной работе модель ЧЛ использовалась в качестве новых граничных условий при расчете вероятности перехода молекул через одну ступень ТВН методом Монте-Карло. Моделирование проводилось в молекулярном режиме. Произведен расчет вероятности перехода молекул через лопаточный канал в прямом K_I и обратном K_{II} направлении, результирующей вероятности перехода K_{max} , степени повышения давления τ_{max} .

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования моделировалась вероятность прямая K_I и обратная K_{II} вероятности прохождения молекул через межлопаточное пространство ТМН.

При моделировании использовались следующие допущения:

- пространственное распределение молекул на стороне высокого вакуума – равномерное;
- высота межлопаточного пространства является бесконечной;
- скорости молекул подчиняются распределению Максвелла;
- взаимодействие молекул газа со стенками ТМН описывается моделью Черчиньяни–Лампис или моделью Максвелла.

Расчётная схема представлена на рисунке 1.

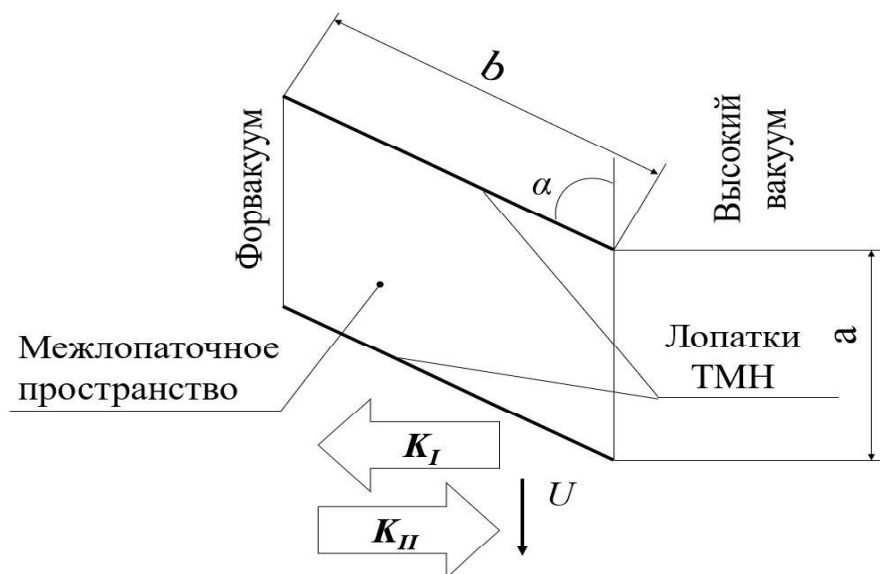


Рис. 1 – Расчетная схема

Скорости молекул после столкновения со стенкой рассчитываются исходя из модели Черчиньяни–Лампис:

$$c_{ct1} = \sqrt{\alpha_t \cdot (2 - \alpha_t)} \cdot c_* \cdot \cos \theta + (1 - \alpha_t) \cdot c'_{t1}$$
$$c_{ct2} = \sqrt{\alpha_t \cdot (2 - \alpha_t)} \cdot c_* \cdot \sin \theta + (1 - \alpha_t) \cdot c'_{t2}$$
$$c_n = \left[\alpha_n \cdot c_*^2 + (1 - \alpha_n) \cdot c_n'^2 + 2 \cdot \sqrt{\alpha_n \cdot (1 - \alpha_n)} \cdot c_* \cdot c'_n \cdot \cos \theta \right]^{\frac{1}{2}}$$

где c'_{t1} , c'_{t2} , c'_n – компоненты скорости молекул до взаимодействия со стенкой; c_{t1} , c_{t2} , c_n – компоненты скорости молекул после взаимодействия со стенкой; α_t , α_n – аккомодации тангенциального импульса и нормальной энергии, соответственно.

При моделировании использовался общепринятый метод пробной частицы, описанный в [7].

Алгоритм метода пробной частицы был реализован на языке Fortran.

Вероятность перехода через межлопаточный канал в прямом направлении рассчитывается по следующей формуле:

$$K_I = \frac{N_I}{N},$$

где N_I – количество частиц, которые перешли со стороны высокого вакуума на сторону форвакуума; N – общее количество частиц при моделировании.

Вероятность перехода через межлопаточный канал в обратном направлении рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{II} = \frac{N_{II}}{N},$$

где N_{II} – количество частиц, которые перешли со стороны форвакуума вакуума на сторону высокого.

Расчеты были проведены для следующих значений коэффициентов аккомодации тангенциального импульса и нормальной энергии, равных 0,9 и 1,0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования сравнивались с результатами, в которых в качестве граничного условия использовалось диффузное взаимодействие газа с поверхностью. Моделирование проводилось для различных сочетаний угла наклона лопатки α , соотношения сторон канала лопатки a/b , а также отношения скорости вращения ротора к наиболее вероятной тепловой скорости молекул c . В результате были выявлены существенные расхождения в вероятностях перехода молекул через межлопаточный канал при соотношении межлопаточного канала менее 1.

ОБСУЖДЕНИЕ

При малом соотношении сторон межлопаточного канала a/b значительно возрастает количество частиц, ударяющихся о стенки межлопаточного канала, скорости которых после столкновения рассчитываются при помощи модели Черчиньяни-Лампис, которая значительно отличается от модели Максвелла (диффузное рассеяние). Следовательно, чем больше относительная длина межлопаточного пространства, тем больше будет разница между результатами моделирования с граничным условием Черчиньяни-Лампис и граничным условием Максвелла. Следует учитывать данное обстоятельство при расчетах и проектировании насосов турбомолекулярных вакуумных насосов. В дальнейших исследованиях

необходимо провести сравнение характеристик турбомолекулярных насосов, полученных с использованием граничных условий Максвелла и Черчиньяни-Лампис в различных режимах течения газа, включая переходный и вязкостный режим.

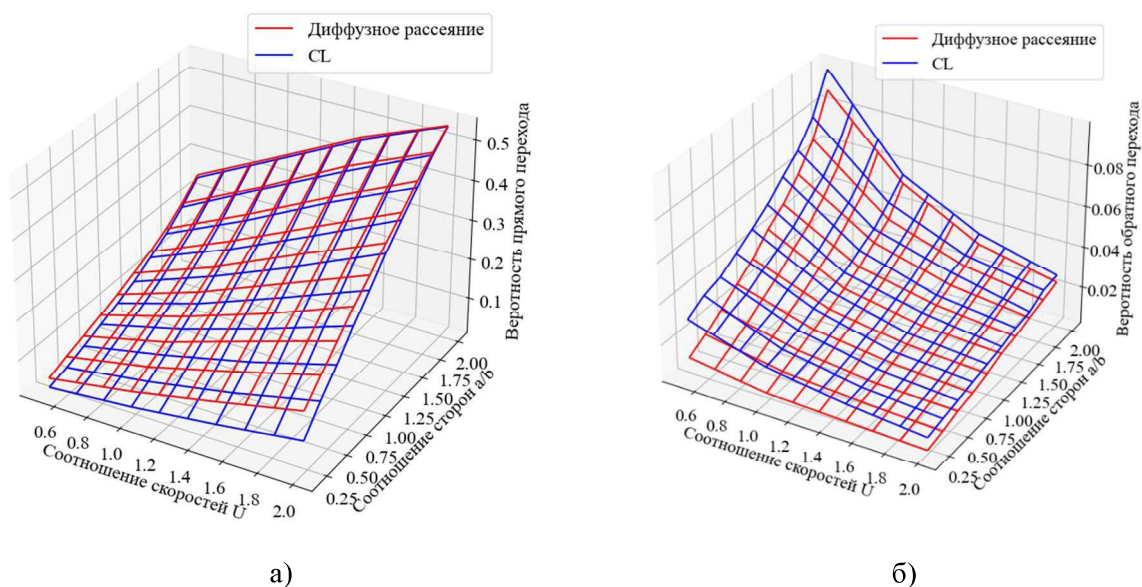


Рис. 1. Вероятность перехода молекул через межлопаточный канал в прямом (а) и обратном (б) направлениях

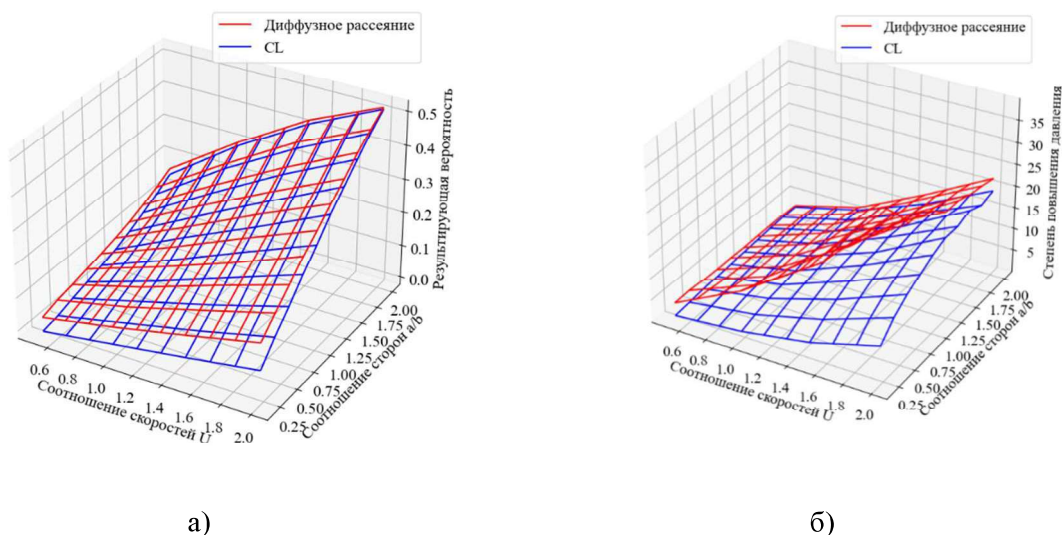


Рис. 2. Результирующая вероятность перехода молекул через межлопаточный канал (а) и степень повышения давления (б)

ВЫВОДЫ

Таким образом, использование модели Черчиньяни-Ламписа для моделирования течения газа в проточной части ТВН в молекулярном режиме позволяет повысить точность математического моделирования, что сокращает цикл разработки новых образцов ТМН для полупроводниковой промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology, second edition. Ed. By R. Doering and Y. Nishi. // CRC press, 2008, 1722 pages.
2. Демихов К.Е., Рыжов И.И., <https://doi.org/10.1007/BF01152913>.
3. Tadashi Sawada, <https://doi.org/10.1299/jsme1958.16.993>.
4. Sharipov F., [doi:10.1017/S0022112004000710](https://doi.org/10.1017/S0022112004000710)
5. Joong-Sik Heo, Young-Kyu Hwang, [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(99\)00181-5](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(99)00181-5).
6. Felix Sharipov, [https://doi.org/10.1016/S0997-7546\(01\)01160-8](https://doi.org/10.1016/S0997-7546(01)01160-8)
7. Bird G. A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows //Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. – 1994

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ульяна Гордеева – аспирантка кафедры вакуумной и компрессорной техники, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 105005, Россия, tests.ibmes@gmail.com

Felix Sharipov – Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19044, 81531-990 Curitiba, Brazil