

МЕХАНИКА МАШИН

УДК 621.521

ПРОВОДИМОСТЬ КАНАЛОВ СУХОГО ВИНТОВОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА
ПРИ МОЛЕКУЛЯРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА© 2022 г. А. А. Ласкин¹, А. А. Райков^{1,*}, А. В. Бурмистров¹, С. И. Саликеев¹¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

*e-mail: alraykov@kstu.ru

Поступила в редакцию 10.04.2022 г.

После доработки 17.05.2022 г.

Принята к публикации 21.06.2022 г.

Рассмотрены существующие в роторном механизме винтового вакуумного насоса направления перетеканий и формы каналов, через которые оно происходит. Приведены формулы расчета для каждого типа каналов. С помощью метода угловых коэффициентов, реализованного в пакете COMSOL Multiphysics, рассчитана проводимость треугольной щели – зазора, через который происходят наибольшие перетекания. Получена зависимость проводимости от шага винтового ротора при различном задании расчетной области. На основе полученных данных рассчитан коэффициент массового расхода, который можно использовать при создании математической модели винтового вакуумного насоса.

Ключевые слова: молекулярный режим, винтовой вакуумный насос, перетекания, проводимость каналов

DOI: 10.31857/S0235711922050091

Развитие вакуумных технологических процессов в области микроэлектроники, медицины, пищевой промышленности требует использования чистых, безмасляных средств откачки. Применяемые для этих целей двухроторные вакуумные насосы, отличаются высокой быстротой действия и низким остаточным давлением (до 550 м³/ч и 0.1 Па у НВД-600 в агрегате с 2НВР-250Д), однако нуждаются в агрегатировании с форвакуумными насосами. Спиральные насосы лишены этого недостатка, но обладают невысокой быстротой действия (до 60 м³/ч и 1 Па у НВСП-60). Одним из перспективных средств создания среднего безмасляного вакуума является винтовой вакуумный насос. Насосы такого типа способны обеспечивать остаточное давление 1 Па, и обладают высочайшей среди бесконтактных насосов быстротой действия (вплоть до 2000 м³/ч у Busch Vacuum COBRA NC2500B). Таким образом, винтовой вакуумный насос сочетает в себе высокую производительность, низкое остаточное давление и способность создавать безмасляный вакуум [1].

Целью настоящей статьи является расчет перетеканий в винтовом вакуумном насосе для дальнейшего использования при математическом моделировании его рабочего процесса.

Обзор методик моделирования рабочих процессов винтовых насосов. Для расчета откачных характеристик насоса и совершенствования его конструкции применяется математическое моделирование. Существует два основных подхода к моделированию рабочих процессов: моделирование при помощи CFD-пакетов [2] и “камерный” метод [3], в котором рассматриваются усредненные параметры газа в рабочем объеме.

Моделирование потоков газа в рабочих объемах при помощи методов вычислительной гидродинамики позволяет с достаточной точностью учитывать особенности течения газа в насосе. В работе [4] приводятся результаты моделирования рабочего процесса винтового насоса с постоянным шагом ротора в пакете Ansys CFX. Сравнение с экспериментальными индикаторными диаграммами показывает хорошую сходимость модели. В работе [5] приводится сравнение экспериментальных данных с различными моделями течения газа (турбулентный, переходный и ламинарный), реализованными в пакете URANS CFD. В работе [6] получена хорошая сходимость экспериментальных величин мощности, подачи и КПД с результатами моделирования рабочего процесса в Ansys Fluent.

Однако все методы вычислительной гидродинамики основаны на гипотезе о сплошности потока. Учитывая, что распределение давлений внутри винтового насоса охватывает диапазон от 1 Па на входе до 10^5 Па на выходе (т.е. коэффициент компрессии $\sim 10^5$, а режимы течения газа в рамках одной задачи – молекулярный, переходный и вязкостный одновременно), расчет насоса CFD моделированием затруднителен.

Моделирование “камерным” методом, основанным на решении системы термодинамических уравнений в дифференциальной форме, в отличие от CFD-моделирования, способно охватить все режимы течения газа от молекулярного до вязкостного.

В работе [7] приводится методика расчета откачных характеристик винтового вакуумного насоса, однако результаты представлены только для вязкостного режима течения газа. В работе [8] приводятся результаты сравнения с экспериментом как CFD-модели, так и камерной модели с учетом потоков обратных перетеканий, однако расчет проводится только для вязкостного режима течения. Камерный метод, реализованный в пакете KaSim, также используется в работе [9], однако в ней также не рассматривается молекулярный режим течения.

Таким образом, на данный момент работы по расчету откачных характеристик винтовых вакуумных насосов во всех трех режимах отсутствуют.

Типы каналов в роторном механизме. Одним из важнейших этапов создания математической модели является расчет обратных перетеканий через щелевые каналы роторного механизма. Для вязкостного режима течения исследования течения газа в зазорах насосов и компрессоров проводились в работах [3]. В настоящей статье рассматривается проводимость каналов в молекулярном режиме течения.

Перетекания в роторном механизме винтового насоса можно разделить на несколько типов по виду зазоров (рис. 1): 1) радиальный зазор (между расточкой корпуса и выступом ротора); 2) межроторный зазор (между основаниями и выступами роторов); 3) профильный зазор (между профильными частями роторов); 4) треугольная щель (между профильными частями роторов и гребнем корпуса).

Первый тип канала можно рассматривать как плоскую щель с длиной в направлении перетекания, равной половине шага ротора. Второй тип каналов образован цилиндрическими поверхностями. Методики расчета перетеканий через них подробно рассмотрены в работах [10]. Зазор между профильными частями ротора можно рассматривать как канал, образованный цилиндрическими стенками с переменным радиусом кривизны в окрестности зазора. Методика расчета для каналов такого типа приведена в работе [11].

Наибольшую сложность представляет расчет перетеканий через треугольную щель. Она имеет сложную геометрию с изменяющимся направлением потока газа.

Методика расчета. Для нахождения проводимости каналов при молекулярном режиме чаще всего используют метод Монте–Карло (ММК) или метод угловых коэффициентов (МУК). В настоящей статье проводимость треугольной щели рассчитывалась с помощью пакета COMSOL Multiphysics [12], в котором реализованы оба метода. Для данной задачи метод угловых коэффициентов обеспечивает наилучшее соотношение точности и времени расчета.

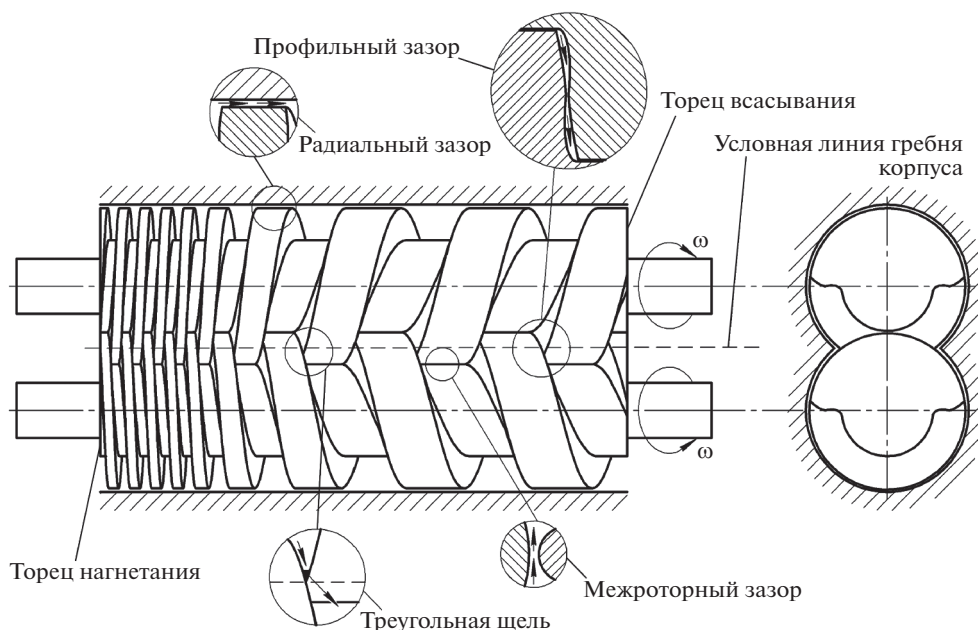


Рис. 1. Схема роторного механизма винтового насоса.

МУК основан на аналогии между течением газа в каналах с диффузным отражением от стенок и лучистого теплообмена в диатермических замкнутых средах [13]. Стенки канала и поверхности входа и выхода разбиваются на элементарные площадки (рис. 2). Для каждой площадки рассчитывается угловой коэффициент, который представляет собой долю потока молекул, исходящего от одной элементарной поверхности и падающего на другую. Итоговая величина коэффициента проводимости определяется интегрированием потоков от всех элементарных площадок относительно входной и выходной поверхности. Наилучшую сходимость эксперимента с расчетом показал метод интегрирования Nemicube с разрешением 1024.

Так как при переходе от рабочей полости к треугольной щели происходит резкое изменение объема было создано две расчетные модели для оценки влияния этого эффекта. Модель на рис. 2а содержит только треугольную щель, на рис. 2б дополнительно на входе и выходе из зазора добавлены участки рабочего объема.

Расчет был проведен для различных конфигураций щелей при изменении шага ротора от 23.5 до 140 мм.

На рис. 3 показано вероятностное распределение столкновения молекул со стенками, видно, что резкий переход происходит практически у входа в канал.

Результаты расчета. На рис. 4 показана зависимость проводимости треугольной щели для разных расчетных моделей 1, 2. Обе модели показывают практически линейную зависимость проводимости от шага ротора. При этом учет входного и выходного участков снижает проводимость на величину от 6.8 до 22%. В дальнейшем будем проводить сравнение с моделью 2.

Несмотря на хорошую точность использование МУК требует перестроения сеточной модели для каждого угла поворота винтовых роторов и при изменении их профи-

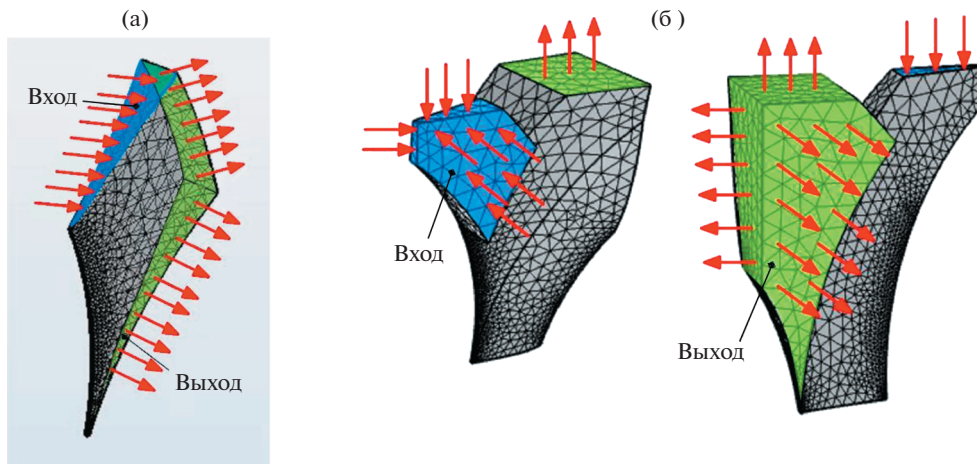


Рис. 2. Расчетные области с построенной сеткой: (а) – отдельная треугольная щель; (б) – зазор с частью рабочего объема.

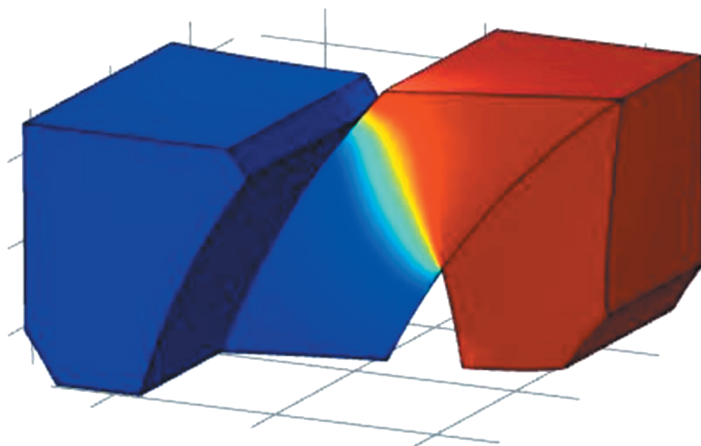


Рис. 3. Вероятность столкновения молекул со стенками.

ля. Поэтому необходим более оперативный и универсальный метод расчета. В таком качестве при молекулярном режиме были рассмотрены следующие выражения:

– расчет по формуле для диафрагмы [14] с эквивалентной площадью сечения

$$U_{\text{Д}} = \frac{c}{4} F_{\text{Д}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{Д}}$ – площадь входного сечения; c – средняя тепловая скорость молекул газа;

– расчет по формуле для эквивалентной плоской щели [8] с размерами, соответствующими среднеинтегральным размерам (дающим ту же площадь сечения) треугольной щели

$$U_{\text{П}} = \frac{c}{4} F_{\text{Д}} \frac{l}{\delta} \ln \left(\frac{\delta}{l} \right), \quad (2)$$

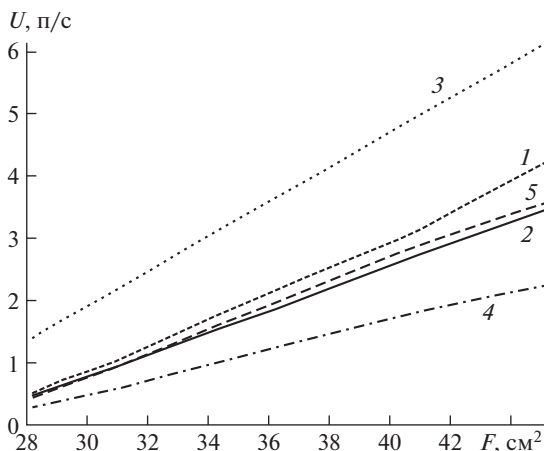


Рис. 4. Зависимость проводимости треугольной щели от площади при различных методиках расчета: 1 – МУК (отдельная треугольная щель); 2 – МУК (зазор с частью рабочего объема); 3 – проводимость эквивалентной диафрагмы; 4 – проводимость эквивалентной плоской щели; 5 – проводимость плоской щели с поправочным коэффициентом.

где l – длина канала в направлении перетекания, δ – меньший размер входного сечения;

– расчет по формуле для эквивалентной плоской щели с поправочным коэффициентом K

$$U_{\Pi} = K \frac{c}{4} F_{\text{д}} \frac{l}{\delta} \ln \left(\frac{\delta}{l} \right). \quad (3)$$

Наилучшую сходимость показал расчет по формуле для плоской щели с поправочным коэффициентом 1.6. Максимальное отклонение от результатов расчета МУК не превышает 6.6%.

Выводы. Проведенные расчеты показали перспективность использования пакета COMSOL Multiphysics для расчетов течения газа в каналах сложной геометрии при молекулярном режиме течения. Предложенное выражение для расчета проводимости треугольных щелей можно использовать при создании математических моделей винтовых насосов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаблания М.Х., Саксаганский Г.Л., Бурмистров А.В. Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч. 2. Вакуумные насосы: Учеб. пособие. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 300 с.
2. Kovacevic A., Rane S., Stosic N. Modelling of twin-screw machines by use of CFD // Positive Displacement Machines. 2019. P. 423.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816998-8.00015-7>
3. Ohbayashi T., Sawada T., Hamaguchi M., Miyamura H. Study on the performance prediction of screw vacuum pump // Applied Surface Science. 2001. V. 169. P. 768.
[https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(00\)00788-1](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(00)00788-1)

4. *Ma K., Guo B., Zhou Z., Wang B.* CFD Simulation and Experimental studying of a Dry Screw Vacuum Pump // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2021. V. 1180 (1). 012043.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1180/1/012043>
5. *Zhang W., Jiang Q., Bois G., Li H., Liu X., Yuan S., Heng Y.* Experimental and Numerical Analysis on Flow Characteristics in a Double Helix Screw Pump // Energies. 2019. V. 12 (18). P. 3420.
<https://doi.org/10.3390/en12183420>
6. *Tang Q., Zhang Y.* Screw optimization for performance enhancement of a twin-screw pump. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E // J. of Process Mechanical Engineering. 2014. V. 228. № 1. P. 73.
<https://doi.org/10.1177/0954408913478602>
7. *Антономова И.В., Крупенченков Г., Руднева Е., Иншакова А.* Метод построения откачной характеристики винтового вакуумного насоса // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 50–2. С. 5.
<https://doi.org/10.18411/lj-05-2019-25>
8. *Li Z., Yongju Z., Ziyun C.* Effects of stable clearances on backflow in the variable-pitch screw vacuum pump // Mechanics and Industry. 2021. V. 22. P. 14.
<https://doi.org/10.1051/meca/2021046>
9. *Huck C., Bruemmer A., Nadler K.* Influence of the geometric parameters on the performance of screw vacuum blowers // VDMA Int. Rotating Equipment Conferenc. 2012. P. 10.
10. *Salikeev S., Burmistrov A., Bronshtein M., Fomina M.* Conductance of slot channels formed by cylindrical walls in molecular gas flow regime // Vakuum in Forschung und Praxis. 2013. T. 4. № 25. С. 34.
11. *Salikeev S., Burmistrov A., Bronshtein M., Fomina M.* Non-contact vacuum pumps. A general-purpose method for conductance calculation of profile slot channels // Vakuum in Forschung und Praxis. 2014. V. 26. Iss. 1. P. 40.
12. COMSOL Multiphysics. License file for Kazan National Research Technology University c/n 9601045.
13. *Нестеров С.Б., Васильев Ю.К., Андросов А.В.* Методы расчета вакуумных систем. М.: Издательство МЭИ, 2004. 220 с.
14. *Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., Никулин Н.К. и др.* Вакуумная техника: Справочник / Под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с., ил.