

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

THE ALGORITHM FOR DETERMINING OF THE MAIN PARAMETERS OF THE TURBOMOLECULAR VACUUM PUMP

У.С. Гордеева / tests.ibmes@gmail.com

U.S. Gordeeva

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г.Москва

Разработан алгоритм расчета основных параметров турбомолекулярного вакуумного насоса (ТМН) в молекулярном режиме течения газа. Расчет основан на использовании метода Монте-Карло (методе пробной частицы). Проведено статистическое моделирование процесса переноса молекул газа через межлопаточный канал в молекулярном режиме течения газа. Была проведена верификация полученных данных путем сравнения их с теоретическими данными.

An algorithm for calculating the main parameters of a turbomolecular vacuum pump (TMP) in the free molecular regime has been developed. The calculation is based on Direct Simulation Monte Carlo method (test particle method). Statistical modelling of the transfer of gas molecules through the blade channel in the free molecular regime of gas flow has been carried out. The obtained results were verified by comparing them with theoretical data.

Ключевые слова: турбомолекулярный вакуумный насос, быстрота действия насоса, предельное остаточное давление, вероятность перехода, метод Монте-Карло.

Keywords: turbomolecular vacuum pump, pumping speed, ultimate pressure, transition probability, Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время турбомолекулярные вакуумные насосы (ТМН) нашли широкое применение как в различных областях науки, так и областях промышленного производства. ТМН являются незаменимыми для обеспечения требуемых параметров технологических процессов в областях химической и нефтехимической отраслей, электронной микроскопии, физики тонких пленок и др. [1-3].

В сравнении с высоковакуумными средствами откачки других типов ТМН обладают рядом преимуществ [4,5], среди которых можно выделить:

1. отсутствие загрязнения откачиваемого объема органическими углеводородными соединениями;
2. обеспечение требуемой быстроты действия в широком диапазоне давлений;
3. низкое энергопотребление при эксплуатации в рабочем режиме;
4. незначительно выраженное явление селективности откачки.

Для моделирования процессов, протекающих в проточной части ТМН различными исследователями, применяются различные как аналитические, так и численные методы. Аналитические модели могут применяться для расчета основных параметров ТМН. Эти модели являются вычислительно-эффективными и точными, но недостатком таких моделей является то, что они применяются для расчета основных параметров конкретных насосов, наиболее распространенных топологий [7-9]. В связи с достаточно сложной математической моделью процессов, протекающих в ТМН с комбинированной проточной частью, а также необходимостью учета нарушения молекулярного режима течения газа в проточной части ТМН для расчета основных параметров применяют численные методы,

наиболее распространенным из которых является метод статистического моделирования Монте-Карло[10-12].

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА

Для определения основных параметров насоса при молекулярном режиме течения газа используется метод статического моделирования Монте-Карло. Блок-схема процесса определения основных характеристик насоса приведена на рис. 1.

Определение основных характеристик насоса происходит следующим образом. Сначала создается расчетная сетка, представляющая собой набор связанных ячеек, соответствующих межлопаточным пространствам статорного/роторного колеса/спирального канала молекулярной ступени. После этого в случайно выбранной ячейке генерируется частица, направление движения частицы выбирается случайно, величина скорости частицы разыгрывается согласно распределению Максвелла.

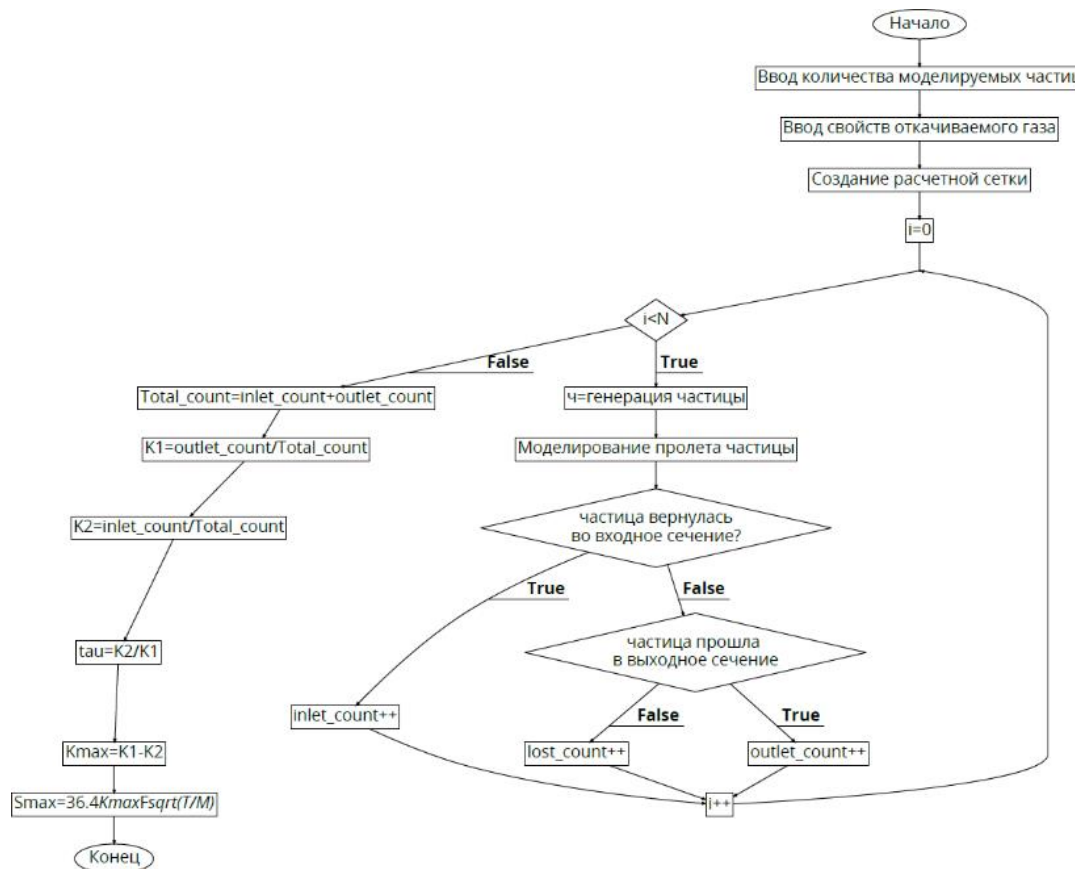


Рис. 1. Блок-схема программы для определения основных параметров насоса при молекулярном режиме течения газа.

Проводится моделирование движения частицы внутри расчетной сетки, в конце моделирования проводится инициализация частицы. Данный процесс повторяется для большого количества частиц, после чего по полученным значениям количества частиц, вернувшихся на входное сечение и прошедшим на выходное сечение $N_{вход}$ и $N_{выход}$, соответственно, определяется быстрота действия насоса S_{max} и степень повышения давления τ_{max} по следующим формулам (1), (2):

$$\tau_{max} = \frac{N_{выход}}{N_{вход}} \quad (1)$$

$$S_{max} = \frac{N_{выход} - N_{вход}}{N_{выход} + N_{вход}} * 36,4 * F * \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2)$$

Где F – площадь входного сечения, м²
 T – температура газа, К;
 M – молекулярная масса газа, кг/моль.

Блок-схема подпрограммы для моделирования движения одной частицы в пределах одной ячейки представлена на рис. 2.

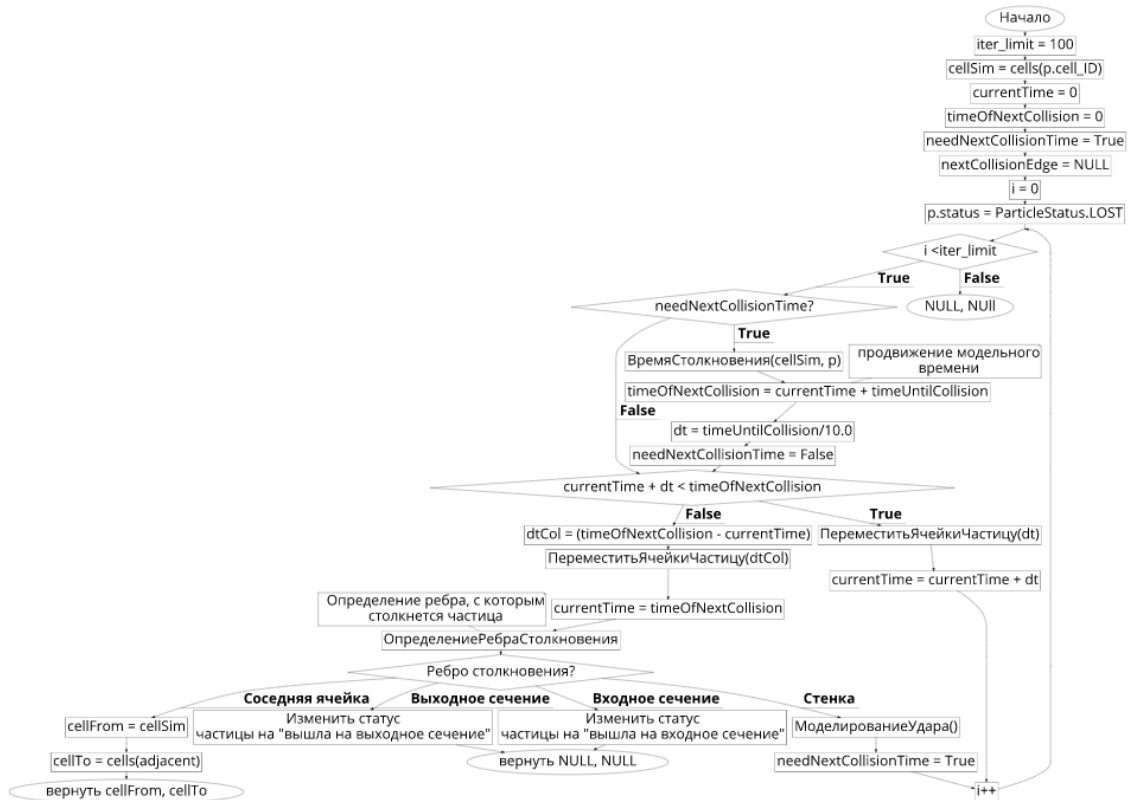


Рис. 2. Блок-схема подпрограммы для моделирования движения одной частицы в пределах одной ячейки.

Проводится моделирование частицы в пределах текущей ячейки. Если по результатам моделирования частица попала на входное сечение или выходное сечение, то частице присваивается соответствующий статус, и моделирование останавливается. Если частица перемещается в другую ячейку, то изменяется текущая ячейка для моделирования, и процесс моделирования в пределах одной ячейки повторяется. Вышеприведенный процесс моделирования повторяется до выполнения одного из критериев останова моделирования:

1. Частица переместилась на входное сечение
2. Частица переместилась на выходное сечение
3. Частица была потеряна - в программе задан предел перемещений из одной ячейки

в другую, задаваемый пользователем. В случае, если предел перемещений превышает, моделирование останавливается.

Блок-схема подпрограммы для моделирования движения одной частицы в расчетной сетке на рис. 3.

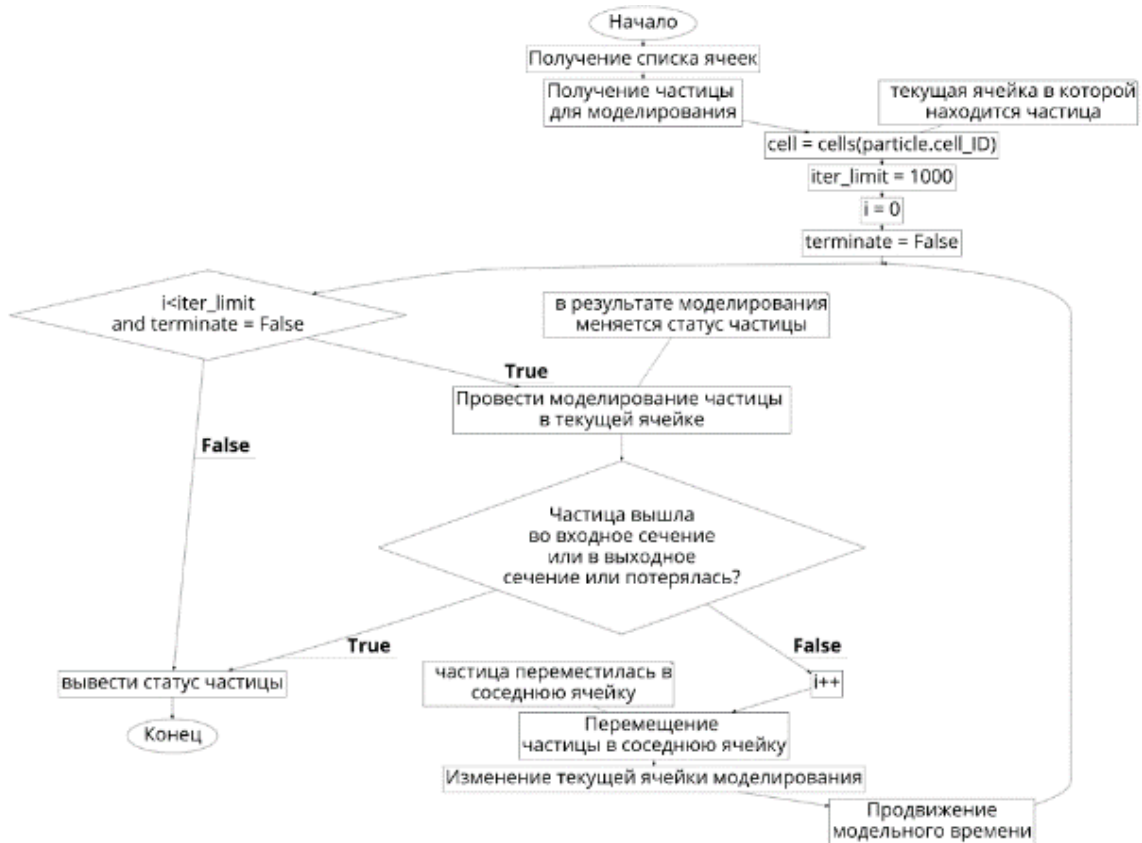


Рис. 3. Блок-схема подпрограммы для моделирования движения одной частицы в расчетной сетке.

На каждой итерации определяется, требуется ли рассчитать время и место следующего достижения частицей границы ячейки с учетом движения ячейки. Если это необходимо, рассчитывается время и место достижения частицей границы ячейки, и рассчитывается временной шаг моделирования в зависимости от времени до следующего достижения частицей границы ячейки.

В случае достижения границ ячейки, временной шаг корректируется по формуле (3):

$$\Delta t = t_{\text{пересеч}} - t_{\text{текущ}} \quad (3)$$

Где $t_{\text{пересеч}}$ – время пересечения частицей границы ячейки, с

$t_{\text{текущ}}$ – текущее время моделирования, с

После этого выполняется перерасчет координаты частицы и ячейки с учетом ее текущей скорости.

В предлагаемой математической модели определенное количество межлопаточных пространств ротора и статора, равномерно распределенных по длине окружности, заменяется одной ячейкой статора и одной ячейкой ротора. Координаты ячеек статора и ротора обновляются на каждом шаге моделирования согласно схеме, приведенной на рис. 4.

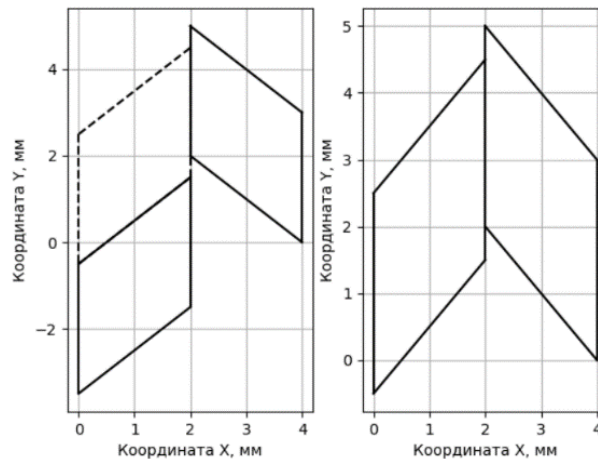


Рис. 4. Схема смены ячейки; слева – текущая ячейка до замены (обозначена пунктирными линиями), справа – после замены.

В случае достижения частицей границы ячейки проводится одно из следующих действий:

1. Граница ячейки – стенка. В этом случае величина скорости частицы разыгрывается по распределению Максвелла, направление движения определяется по вероятностному закону диффузного отражения.
2. Граница ячейки – входное или выходное сечение. В этом случае моделирование останавливается, и частице присваивается соответствующий статус.
3. Граница ячейки – граница соседней расчетной ячейки. В этом случае производится перемещение частицы в соседнюю ячейку.

Процесс моделирования повторяется до выхода частицы на входное/выходное сечение/превышения предела итераций.

Таким образом разработанный метод расчета позволяет провести моделирование перемещения частицы в проточной части ТМН. Описать процессы, происходящие при столкновении частицы со стенками и переносе частицы с одной ячейки на другую.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате применения разработанного метода расчета основных параметров ТМН были рассчитаны максимальное отношение давлений и K_{max} результирующая вероятность перехода молекул газа через межлопаточные каналы, имеющие различные геометрические параметры α и a/b при разных отношениях $c_1 = u/v_n$ скорости движения канала к наиболее вероятному значению тепловой скорости v_n , в предположении диффузного отражения молекул от поверхности лопаток или стенок.

Результаты расчета представлены на рис. 5 и 6.

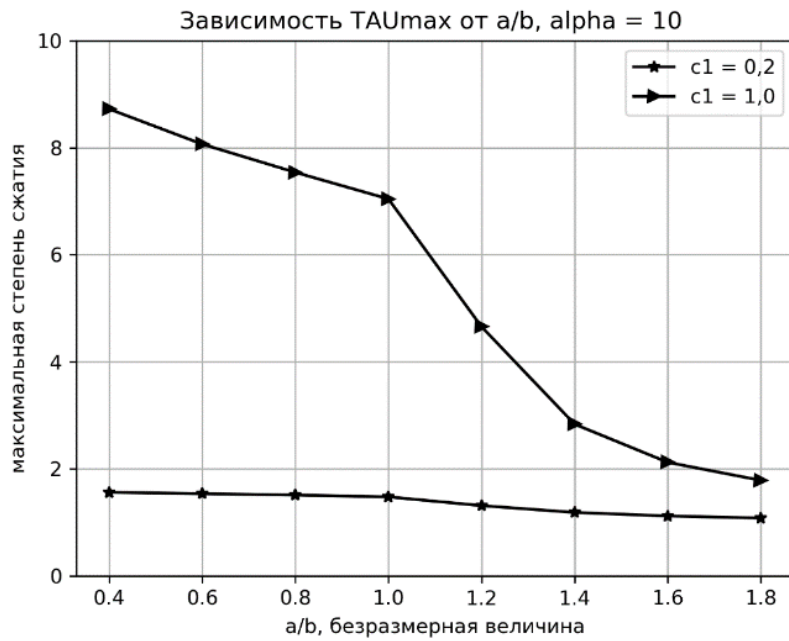


Рис. 5. Значения максимального отношения давлений, τ_{max}

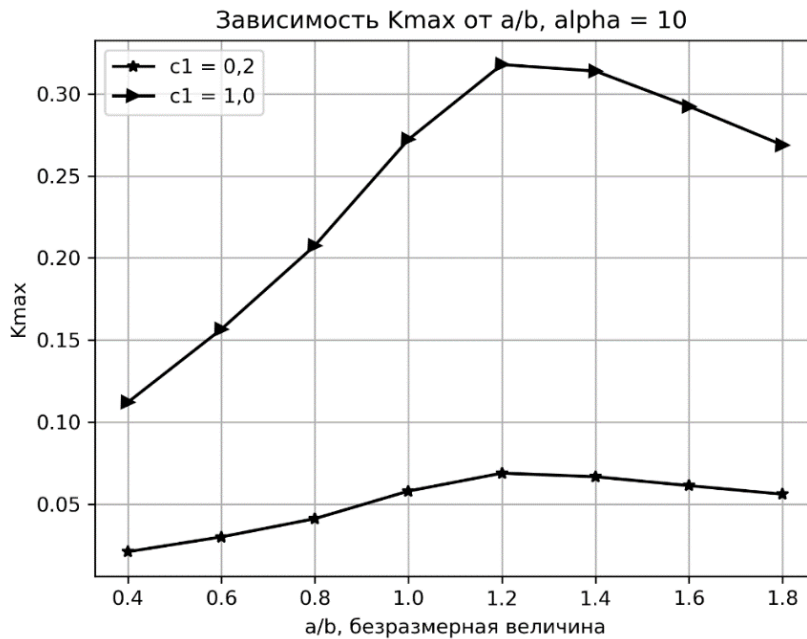


Рис. 6. Значения вероятностей перехода через межлопаточный канал, K_{max}

ОБСУЖДЕНИЕ

Для верификации результатов, полученных при помощи разработанного метода расчета, было проведено сравнение рассчитанных данных с теоретическими данными [7]. Результаты представлены на рис. 7.

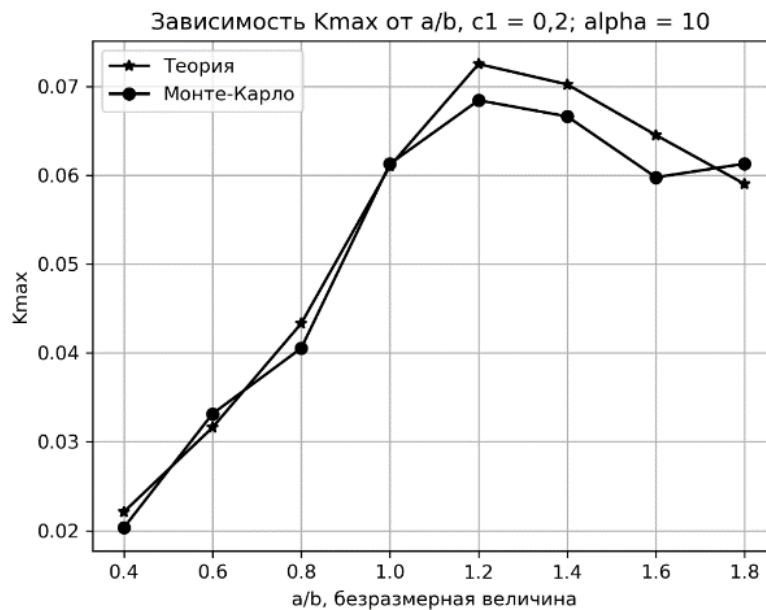


Рис. 7. Сравнение расчетных данных с теоретическими данными.

ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм расчета параметров ТМН с комбинированной проточной частью с учетом разработанной математической модели.

Проведено статическое моделирование процесса переноса молекул газа через межлопаточный канал в молекулярном режиме течения газа.

Разработанный алгоритм будет применен при разработке метода расчета основных параметров ТМН, работающего при нарушении молекулярного режима течения газа в проточной части.

ЛИТЕРАТУРА

1. U S Gordeeva et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 781 012010
2. U. S. Gordeeva, K. E. Demikhov, and A. A. Ochkov. "Specifics of the application of mechanical vacuum pumps in vacuum distillation units used in chemical and oil and gas industries." AIP Conference Proceedings. Vol. 2141. No. 1. AIP Publishing LLC, 2019.
3. Вакуумная техника. Справочник К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др. // М.: Машиностроение. 2009. 590 с.
4. N. Sengil Performance increase in turbomolecular pumps with curved type blades //Vacuum. 2012. Vol. 86. №. 11. 1764-1769 pp.
5. T. N. Schneider et al. Empirical and numerical calculations in two dimensions for predicting the performance of a single stage turbomolecular pump //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 1998. Vol. 16. №. 1. 175-180 pp.
6. E.V. Svichkar, N.K. Nikulin, K.E. Demikhov, Calculation method of pumping characteristics of high-vacuum system with turbomolecular vacuum pump, AIP Conference Proceedings 2007, edited by M. D. Furnish et al. (American Institute of Physics, Melville, NY, 2002), 030032 (2018).
7. E.V. Svichkar, N.K. Nikulin, V.S. Klyucharov, K.E. Demikhov Molecular-viscous vacuum pump (MVVP), AIP Conference Proceedings 1876, edited by M. D. Furnish et al. (American Institute of Physics, Melville, NY, 2002), 020058 (2017).
8. U. S. Gordeeva, K. E. Demikhov, and A. A. Ochkov. "Development of calculation method of main parameters of vacuum liquid transportation system." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 387. 2018.

9. G. Scherer-Abreu, R.A. Abreu Numerical modelling of the molecular and transitional flow regimes in vacuum components //Vacuum. 1995. Vol. 46. №. 8-10. 863-866 pp.

10. S. Giors et al. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. I. Vacuum performance //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2006. Vol. 24. №. 4. 1584-1591 pp.

11. V. I. Tokmantsev, V. D. Seleznev The direct jumping of molecules through the compression of gas centrifuge //Vacuum. 2014. Vol. 109. 349-353 pp.

12. R. Versluis et al. Numerical investigation of turbomolecular pumps using the direct simulation Monte Carlo method with moving surfaces //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2009. Vol. 27. №. 3. 543-547 pp.

ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПРОГРЕВАЕМЫХ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

THE EVOLUTION OF IDEAS FOR IMPROVING HEATED ULTRA-HIGH VACUUM SWITCHING DEVICES

А.Е.Вязовецкова, В.В.Вязовецков / aev241@yandex.ru, vyazovetskov@rambler.ru

A.E.Vyazovetskova, V.V.Vyazovetskov

ФГБУ "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва

Анализируются известные предложения по повышению качества сверхвысоковакуумных коммутационных разъёмных устройств. Основной тенденцией развития сверхвысоковакуумных разъёмных соединений принята концепция повышения вакуумной плотности узлов герметизации в процессе многократного термоциклирования. Обсуждаются модельные представления контактных взаимодействий в процессах герметизации и термоциклирования разъёмного соединения. Указываются конструктивные особенности выполнения рекомендуемых коммутационных устройств.

The well-known proposals for improving the quality of ultra-high vacuum switching disconnectable devices are analyzed. The main trend in the progress of ultra-high-vacuum detachable joints is the accepted concept of increasing the vacuum density of sealing units in the process of multiple thermal cycling. Model representations of contact interactions in the processes of sealing and thermal cycling of a detachable joint are discussed. The design features of the recommended switching devices are indicated.

Ключевые слова: *разъёмные соединения, сверхвысокий вакуум, контактные взаимодействия, герметизация, термоциклирование.*

Ключевые слова: Key words: *joints, ultra-high vacuum, contact interactions, sealing, multiple thermal cycling.*

Успешная эксплуатация вакуумных систем всегда определяется возможностью обеспечения герметичности коммутационных устройств (фланцевых соединений и клапанов). Наличие течи в сверхвысоковакуумной системе приводит к сорбции атмосферных газов на внутри камерных поверхностях с малой зависимостью от расположения и параметров средств откачки. Влияние сорбированного газа обязательно