

К. Е. Демихов, Н. К. Никулин,
Е. В. Свичкаръ

ТЕЧЕНИЕ ГАЗА В СПИРАЛЬНОМ КАНАЛЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

Приведены исследования течения газа в проточной части молекулярного вакуумного насоса (МВН) в вязкостном режиме течения газа. Проведен выбор и обоснование метода расчета МВН.

E-mail: nkn@bmstu.ru, svic@bk.ru

Ключевые слова: молекулярный вакуумный насос, вакуум, вязкостный режим течения, течение газа, спиральный канал, перепад давления, годограф скоростей, геометрические параметры.

В современных турбомолекулярных насосах (ТМН) в качестве форвакуумных ступеней устанавливают молекулярные ступени. При этом возможно достижение форвакуумного давления порядка $1 \cdot 10^3$ Па, а также сохранение безмасляности системы. Однако небольшая быстрота действия и высокая точность изготовления ограничивают возможность использования таких молекулярных вакуумных насосов (МВН) в качестве самостоятельных средств откачки. Результаты анализа теоретических и экспериментальных исследований МВН показали, что одним из основных факторов, ограничивающих повышение их откачных параметров, является перетекание газа через радиальный зазор между ротором и статором (для схемы МВН Геде – отсекателем) насоса. Для уменьшения перетекания газа через зазор проточной части, т. е. для уменьшения обратного потока, зазор между статором и ротором выполняют порядка $1 \cdot 10^{-2}$ мм, а кромку между каналами делают максимально широкой. В качестве форвакуумных ступеней можно использовать молекулярно-вязкостную проточную часть [1–6] с зазором порядка 0,1 мм, обладающую большей быстротой действия по сравнению с молекулярной проточной частью. Особенностью данной проточной части является то, что при определенном соотношении геометрических параметров она может работать в вязкостном, переходном и молекулярном режимах течения газа. При этом возможно получение форвакуумного давления не менее $1 \cdot 10^3$ Па, а в определенных конструкциях даже $1 \cdot 10^5$ Па. Молекулярно-вязкостный вакуумный насос является аналогом молекулярного насоса Хольвека [1–6]. Поэтому для создания и отработки математической модели молекулярно-вязкостной проточной части насоса с помощью программных пакетов гидродинамики необходимо

предварительно получить с требуемой точностью числовые данные для его молекулярной проточной части.

В последние десятилетия для решения сложных трехмерных задач создано большое число математических моделей течения газа при разных режимах, основанных на статистическом моделировании методом Монте-Карло, численном решении модели уравнения Больцмана, а также на основе уравнений Навье – Стокса для вязкого режима в основном с граничными условиями скольжения газа.

В работе [7] проведен анализ МВН, описание рабочих процессов в молекулярной и вязкостной областях объединено в одно уравнение, для обеспечения плавного перехода между этими областями использовано скольжение газа. Рассмотрен эффект кривизны канала и окружная скорость канала, превышающая тепловую скорость молекул газа, однако приведенные уравнения не включают ни один из этих эффектов. По своей сути, определение скоростей молекул газа основано на определении течения Пуазейля. Таким образом, течение газа в канале МВН Геде сводится к рассмотрению ламинарного течения между параллельными поверхностями, но при этом не учитывается влияние боковой поверхности канала на течение газа.

В работе [8] авторы моделируют течение газа в молекулярной степени Геде комбинированного ТМН с помощью уравнений Навье – Стокса в вязкостном и переходном режимах течения, используя в качестве граничного условия скольжение газа вдоль поверхности и температурный скачок. В модели течения газа со скольжением применен только один параметр отладки, а именно коэффициент аккомодации количества движения, хотя при этом отмечается незначительная чувствительность к его изменениям. Сравнение полученных данных показывает хорошую точность расчета степени сжатия (при нулевом потоке газа), даже когда модель используется в диапазоне давлений, для которых гипотеза сплошной среды уже неприемлема. Взаимодействие молекул газа с поверхностью осуществляется в пределах длины свободного пробега, в так называемом слое Кнудсена, причем учитываются скорость скольжения и температурный скачок. Проверка экспериментальных данных, выполненная для двух основных параметров – степени сжатия и силы трения, показывает очень хорошую точность в рассматриваемом диапазоне давлений. Нестабильность течения газа и возможные эффекты турбулентности могут изменить поведение математической модели при высоком давлении, однако эта проблема не рассматривается в данной работе.

В работе [9] авторы продолжили свои исследования, применив их к молекулярному насосу Хольвека с каналами, уменьшающимися по длине, начиная с всасывания и заканчивая нагнетанием. При разработке математической модели использовались основные допущения и зависимости, приведенные в работе [8]. Так как все каналы на ро-

торе одинаковы, исследован только один из каналов в программе CFD, что позволило уменьшить число ячеек в расчетной сетке и упростить сам расчет. Для учета граничных условий на входе и выходе в соответствии с экспериментом добавлен элемент области всасывания и нагнетания. Однако при таком подходе в решении задачи не учитывается перетекание газа через зазор, хотя учтено влияние изменения зазора на откачную характеристику насоса. Экспериментально определено изменение температуры газа в ступени, которое составляет около 10 % среднего значения абсолютной температуры. Расчет математических моделей также осуществляется в коммерческом пакете гидрогазодинамики CFD FLUENT. В работах [8, 9] подчеркивается возможность использования уравнений Навье – Стокса с граничными условиями скольжения газа для исследуемого МВН, причем данное решение противопоставляется выводам о неприменимости такого подхода к решению задачи в работе [10].

Проблема моделирования разложения сил в МВН Геде описана в работе [11], в которой одномерная модель течения газа [12] использована для вычисления распределения давления вместе с переходной одномерной моделью для касательного напряжения вблизи стенок. Установлено, что необходимо учитывать эффекты перехода касательных напряжений вблизи стенок, чтобы воспроизвести силу трения. Введение эффективной вязкости, снижающейся с увеличением числа Кнудсена, позволило описать поведение силы трения в переходном режиме. Разработанная математическая модель, однако, оказалась неприемлемой для развитого вязкостного режима.

В работе [13] исследовано течение Куэтта в системе статор – ротор насоса для двух ламинарных ($Re < 10^5$) и двух турбулентных ($Re > 10^5$) режимов. Два режима ламинарного течения газа характеризуются сначала объединенным пограничным слоем, в котором преобладают диффузные эффекты ($Re < 10^3$), затем отдельным пограничным слоем, в котором доминируют конвекция и центробежные силы ($5 \cdot 10^3 < Re < 10^5$). Два режима турбулентного течения также характеризуются объединенными и одним отдельным пограничными слоями. Таким образом, в проточной части насоса преобладает ламинарное течение газа.

С помощью кинетического подхода, основанного на решении линейаризованной БГК-модели уравнения Больцмана, исследован МВН Хольвека [10]. В основе подхода лежит квазитрехмерная модель, так как вычислительный процесс состоял из последовательного решения четырех двумерных подзадач (течения Куэтта и Пуазейля, потоки газа – направленный вдоль канала и перетекание газа через зазор), решенных для канала постоянного сечения, с последующим применением закона сохранения массы для получения одномерного уравнения изменения давления по длине канала. Основной поток описан

как суперпозиция этих элементарных решений, при этом не учитываются инерционные эффекты и кривизна каналов. Но проверка результатов не показывает, в какой области применения числа Кнудсена будет работать расчетная модель. Хотя подход к вычислению параметров насоса эффективен в связи с разделением на двумерные и одномерные задачи, он может стать неприменимым или, по крайней мере, менее эффективным в случае молекулярного насоса с каналами переменной высоты. Кроме того, уравнения Навье – Стокса не подходят для моделирования такого насоса, даже если используется условие скольжения на границе [10].

Исследование насоса Хольвека с помощью комплекса CFD было проведено с использованием трехмерной модели Навье – Стокса без скольжения на поверхности [14]. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальным данным в вязкостном режиме, но возникает необходимость использования граничных условий течения газа со скольжением для повышения точности расчетов при числе Кнудсена $Kn > 0,01$.

Исследовано использование МВН последовательно с диффузионным насосом [15–17]. В работе [15] проведен сравнительный анализ результатов исследований МВН, рассмотрены перспективы их применения в вакуумных установках, в частности для откачки масс-спектрографов. Для оценки достоверности полученных расчетных данных проведены экспериментальные исследования на опытной установке, включающей в себя модель цилиндрического МВН с одним постоянным по высоте каналом. В работе [15] рассмотрен анализ МВН, приведенный в работе [7], и сделан вывод, что полученные результаты действительны только для скоростей ротора, намного меньших тепловых скоростей газа, кроме того, отмечено пренебрежение кривизной канала. В расчетах [7] было такое же ограничение числа Кнудсена, т. е. диаметр откачивающей части должен быть небольшим и по сравнению с приведенным в работах [15–17], и по сравнению с расстоянием, в котором происходит значительное изменение плотности газа. Достаточно трудно оценить перетекание и откачку газа между каналами.

Была также сделана попытка проанализировать МВН, пренебрегая этими параметрами [15]. Авторы рассматривали ситуацию, когда скорость ротора больше молекулярной скорости, и учитывали кривизну канала, пренебрегая перетеканием газа и откачкой газа из зазора. Установлено также, что внутренние газовыделения существенно влияют на отношение давлений в канале. Для исключения влияния внутренних газовыделений эксперименты по определению быстроты откачки проводились при сравнительно высоких давлениях газа [15].

Попытка создания обобщенного метода расчета откачных параметров МВН, предпринятая в работе [18], не привела к желаемому

результату, так как сложность предложенной математической модели делает ее практически неприемлемой для анализа влияния различных факторов на характеристику МВН и определения геометрических размеров его проточной части.

В работе [19] проанализирована та же проблема, что и в работе [7], при этом использован закон Кнудсена для распространения газов в молекулярной области. Хотя полученные результаты аналогичны результатам работы [7], методы ошибочны: предполагалось, что перетекание газа через зазоры имеет форму обратной диффузии.

В работе [20] описан МВН, в котором отсутствует ограничение по давлению, – проблема, характерная для многих конструкций молекулярных насосов. Это ограничение по давлению определяется давлением паров углеводородов любой смазки, которая может использоваться в опоре ротора. Конструкция насоса позволяет обезгазить ротор и корпус насоса между запусками. Для этого ротор установлен на магнитном подвесе и таким образом устранены подшипник и его смазка. Для обезгаживания рабочей области на корпусе насоса предусмотрен ТЭН.

Выявлено различие давлений в вязкостном и свободномолекулярном режимах, которое распространилось на уравнение Геде, используемое для спиральных однозаходных каналов в свободномолекулярном режиме течения и для многозаходных спиральных каналов в вязкостном и в молекулярном режимах [21].

В работе [22] численно исследовано перемещение молекул газа и поток со скольжением в спиральных каналах по методу Монте-Карло. Для проверки теоретических данных автор разработал экспериментальную установку. На полученные экспериментальные данные ссылается ряд авторов, сопоставляя с ними свои теоретические исследования.

В работах [23, 24] для изучения влияния кривизны каналов была разработана трехмерная модель вращающегося спирального канала и проведено решение уравнения Навье – Стокса ламинарного течения с учетом граничных условий скольжения для скоростей первого порядка.

В работе [25] представлены теоретические и экспериментальные исследования разреженных газов в каналах МВН. Рассматриваются два вычислительных метода: последовательное решение уравнений Навье – Стокса с учетом скольжения газа и частичный стохастический подход через использование прямого метода моделирования Монте-Карло. Режим течения газа изменяется от молекулярного до потока со скольжением. Трехмерная модель для метода Монте-Карло применяется с целью изучения влияния сил Кориолиса и центробежных сил на процесс сжатия. Авторы смогли уйти от постановки граничных условий второго порядка для скольжения газа в уравнениях

Навье – Стокса. Ключевым моментом является получение числовых результатов для квазитрехмерной и трехмерной моделей, которые сравниваются с ранее известными значениями и экспериментальными данными [22]. Авторы численно решили систему уравнений Навье – Стокса, однако полученное решение в работе не приведено, есть ссылка на работу [26]. Погрешность вычислений методом Монте-Карло линейно пропорциональна плотности газа и размеру ячеек расчетной сетки, которая должна быть соизмерима с длиной свободного пробега. В диапазоне значений числа Кнудсена $0,01 \leq Kn \leq 1$, несмотря на то что метод Монте-Карло дает более точные результаты по сравнению с уравнениями Навье – Стокса, для расчета потребуются большие расчетные усилия с уменьшением числа Кнудсена.

Интерес представляют исследования насоса Хольвека, приведенные в работе [27]. Винтовые каналы выполнены в корпусе насоса в направлении от периферии к центру. К сожалению, это означает, что большая часть рабочей поверхности неподвижна, тогда скорость дрейфа молекул меньше половины окружной скорости ротора. Искривлением канала в расчетах пренебрегли, и откачка газа происходит через короткий прямой канал. Чистый поток газа, проходящий со стороны всасывания на сторону нагнетания, состоит из трех отдельных потоков: потока газа в каналах, вызванного движущейся поверхностью ротора; обратного диффузионного потока газа вдоль канала вследствие градиента давления; перетекания газа между каналами через зазор между ротором и статором. Авторы рассматривают параметры, влияющие на характеристику насоса: скорость, с которой газ может войти в каналы насоса; отклонение молекулярных скоростей от распределения Максвелла; кривизну канала. Однако анализ данной работы показывает, что в ней не учтены перечисленные параметры и, следовательно, результаты расчетов следует применять с некоторыми поправками. Вследствие высокой скорости вращения ротора появляется радиальный градиент давления (радиальный относительно оси вращения ротора), созданный центробежной силой в винтовом канале, который не описан математически. Все расчеты приведены для каналов разных профилей и во всех режимах течения газа.

В работе [28] рассмотрена трехмерная модель течения газа в спиральных каналах. Для исследования течения газа в большем числе режимов течения проведен полный трехмерный анализ отношения давления к массовому расходу с учетом силы Кориолиса и центробежных сил. При давлении 1 Па и менее поток смоделирован методом Монте-Карло. В следующих работах автора течение газа в каналах моделировалось трехмерной моделью [22] в условиях сплошной среды с помощью уравнений Навье – Стокса, причем влияние зазора между ротором и статором не учитывалось, в то время как при уве-

личении скорости вращения ротора возрастает влияние зазора и температуры газа.

Проведены исследования по созданию математических моделей процессов в каналах МВН для определенных режимов течения, в которых не ставится задача объединения этих моделей в единый метод, что невозможно из-за нестыкуемости результатов расчетов [29].

В работе [26] анализируется механизм сжатия с помощью уравнения Навье – Стокса с учетом граничных условий скольжения. Однако предыдущие исследования автора были ограничены до квазитрехмерной модели течения Куэтта, т. е. модели трехмерного вращающегося спирального канала, который рассматривался как прямоугольная щель, ограниченная плоскостью, прямолинейно движущейся вдоль щели.

Из анализа результатов исследований зарубежных ученых следует вывод, что аналогичная картина с созданием расчетной модели канала характерна и для МВН: простые, удобные для расчетов методы не отвечают современным требованиям по точности и универсальности их применения, в то время как модели, в достаточно полной степени описывающие процессы в каналах насоса, не являются экономичными и требуют значительных затрат машинного времени ЭВМ, а часто и наличия натурального образца МВН или проведения предварительных экспериментальных исследований.

Обобщая результаты исследований процессов в рабочих каналах МВН, выполненных за рубежом, можно отметить, что в абсолютном большинстве они основаны на достаточно точных математических моделях, требующих существенных затрат машинного времени и неприемлемых из-за этого для решения практических задач проектирования.

Канал МВН в вязкостном режиме течения газа может быть рассчитан с использованием программного комплекса STAR-CCM+, предназначенного для решения задач механики сплошных сред. При построении сеточной модели необходимо значительно измельчать сетку на входе и выходе из проточной части и в области зазора, так как грубая сетка в этой зоне не позволяет получать достоверные данные. Например, для проточной части с параметрами: семь каналов высотой 1 мм и шириной 7 мм, кромка 6 мм, зазор 0,05 мм, длина проточной части 20 мм, сетка должна содержать не менее $2 \cdot 10^6$ ячеек.

При построении физической модели используются следующие допущения:

течение газа ламинарное;

температура газа считается постоянной, хотя она возрастает в процессе перехода молекул газа со стороны всасывания на сторону нагнетания из-за наличия трения газа о поверхность канала, а также за счет перехода части кинетической энергии газа в теплоту в статоре. В дальнейшем возможно выявить влияние температуры газа на откачную характеристику насоса по экспериментальным данным;

влияние входа канала на течение газа в нем не учитывается, но в дальнейшем это явление необходимо рассмотреть, так как оно отрицательно влияет на откачную характеристику насоса.

Отношение давлений в проточной части определяется при безрасходном режиме течения, при котором отношение давлений максимальное.

На рис. 1–4 представлено распределение параметров течения газа в канале молекулярного насоса в зависимости от разных скоростей и вращения ротора.

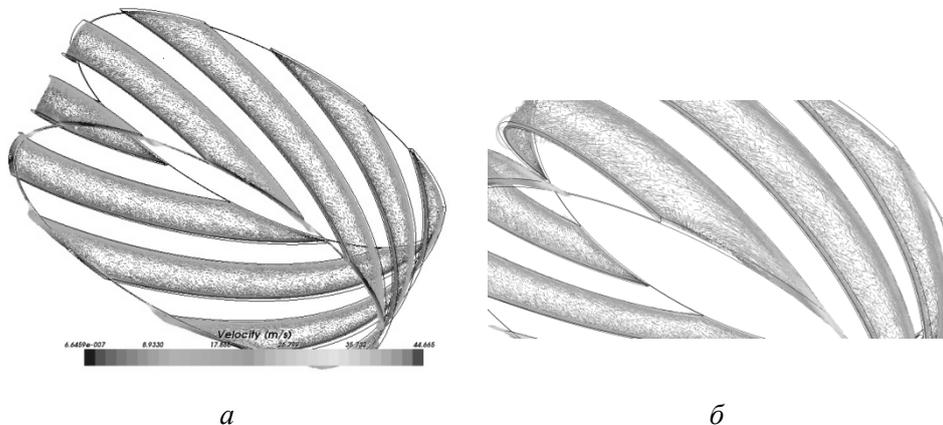


Рис. 1. Годограф скоростей газа в канале при разных скоростях вращения ротора:

$a - \omega = 15\,000$ об/мин; $b - \omega = 30\,000$ об/мин

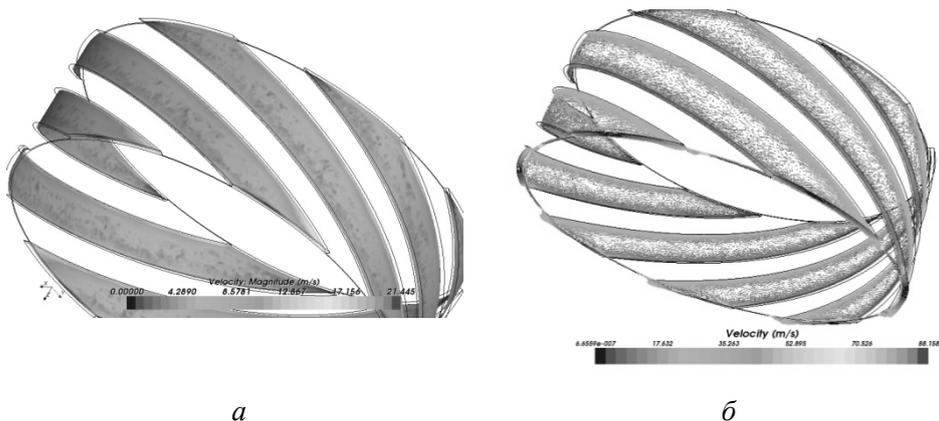


Рис. 2. Скорость газа в канале (абсолютная величина) при разных скоростях вращения ротора:

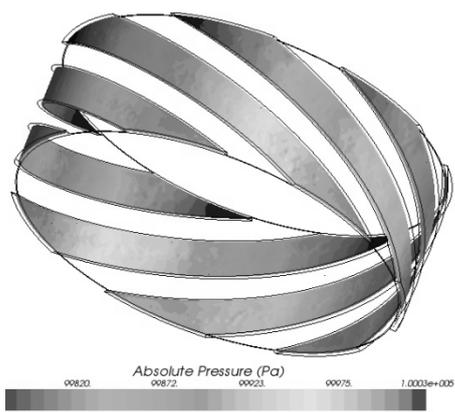
$a - \omega = 15\,000$ об/мин; $b - \omega = 30\,000$ об/мин

Распределение параметров потока газа показано в сечении, проходящем через середину канала и через середину зазора по их высотам. Качественный характер течения позволяет уточнить граничные

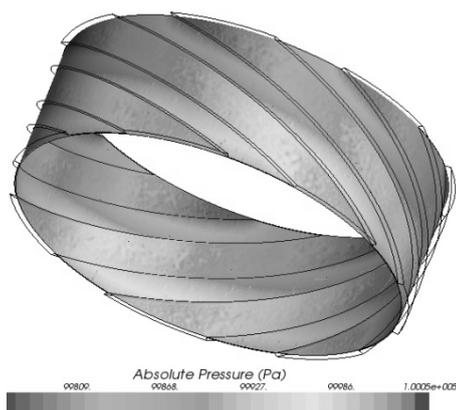
условия и влияние отдельных геометрических и скоростных параметров проточной части насоса на его откачную характеристику.



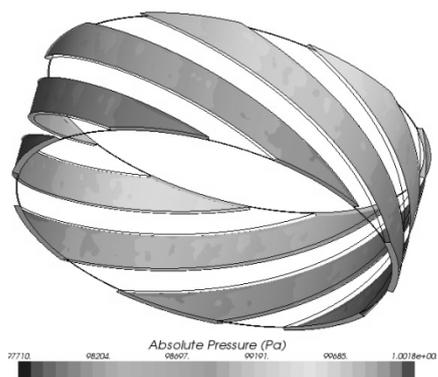
Рис. 3. Скорость газа в зазоре (абсолютная величина) при скорости вращения ротора $\omega = 15\,000$ об/мин



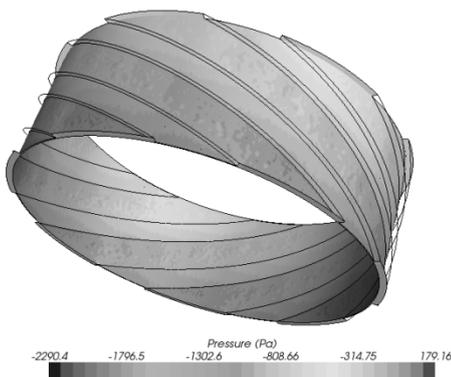
a



б



в



г

Рис. 4. Давление газа в канале (*a*, *в*) и в зазоре (*б*, *г*) при разных скоростях вращения ротора:

a, *б* – $\omega = 15\,000$ об/мин; *в*, *г* – $\omega = 30\,000$ об/мин

1. Никулин Н. К., Свичкаръ Е. В. Модель молекулярно-вязкостного вакуумного насоса в условиях низкого вакуума // Конверсия в машиностроении. – 2007. – № 4; 5 – С. 85–88.
2. Никулин Н. К., Свичкаръ Е. В. Расчет откачной характеристики МВВН в вязкостном режиме течения // Сб. тр. I Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты». Москва, 2008.
3. Демихов К. Е., Никулин Н. К., Свичкаръ Е. В. Модель ламинарного течения газа в тонких каналах с подвижной стенкой // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2009. – № 4.
4. Демихов К. Е., Никулин Н. К., Свичкаръ Е. В. Расчет параметров течения газа в тонких каналах с подвижной стенкой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 4. – 10 с.
5. Демихов К. Е., Никулин Н. К., Свичкаръ Е. В. Теоретические характеристики МВВН при течении газа со скольжением // Сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 332 с.
6. Демихов К. Е., Никулин Н. К., Свичкаръ Е. В. Математическая модель молекулярно-вязкостного вакуумного насоса при течении со скольжением // Материалы VI Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» / под ред. д-ра техн. наук, проф. С.Б. Нестерова. – М.: НОБЕЛЛА, 2011.
7. Gaede W. Die Molekularluftpumpe // Annalen der Physik. – 1913. – В. 41. – S. 337–380.
8. Giors S., Subba F., Zanino R. Navier–Stokes modeling of a Gaede pump stage in the viscous and transitional flow regimes using slip-flow boundary conditions // J.Vac. Sci. Technol. A. – Vol. 23. – No. 2. – Mar/Apr. – 2005. – P. 336–346.
9. Giors S., Colombo E., Inzoli F., Subba F., Zanino R. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes // J.Vac. Sci. Technol. A. – Vol. 24. – No. 4. – Jul/Aug. – 2006. – P. 1584–1591.
10. Sharipov F., Fahrenbach P., Zipp A. // J. Vac. Sci. Technol. A 23. 1331. – 2005.
11. Cerruti R., Spagnol M., Helmer J. C. Power dissipation turbomolecular pumps at high pressure // J. Vac. Sci. Technol. A 17 (5). – 3096 p. – 1999.
12. Helmer J. C., Levi G. // J. Vac. Sci. Technol. A 13. – 2592 p. – 1995.
13. Daily J. W., Nece R. E. // J. Basic Eng. 82. – 217 p. – 1960.
14. Boulon O., Mathes R. Flow modelling of a Holweck pump stage in the viscous regime // Vacuum 60. 73. – 2001.
15. Mongodin G., Prevot F. Etude experimentale une pompe moleculaire rotative // Le Vide. – 1956. – Vol. 61. – P. 3–13.
16. Mercier C., Benoist P. Report CEA 560, Nuclear Studies Center, Saclay, France (1956).
17. Mercier C, Benoist P. // J. Phys. Radium Suppl. – 1956. – Vol. 17. – No. 11. – P. 182A.
18. Gajejski P., Hecsynski R. Teoria mechanizmu pompy molekularnej // IPPT PAN Warszawa, 1971. – 38 s.
19. Jacobs R. B. // J. Appl. Phys. 22. 217. – 1951.
20. Beams J. W. // Science –130. 1406. –1959.

21. Panos C.N., Antoniou A.G., Valamontes S.E. The helicoid multi-groove vacuum pump in both viscous and molecular states // *Vacuum*. – 1994. – Vol. 45. – No. 8. – P. 841–847.
22. Nanbu K., Kubota H., Igarashi S., Urano C., Enosawa H. Performance of spiral grooves on a rotor of turbomolecular pump // *Trans. JSME*. – 1991. – Vol. 57; No. 533. – P. 79–86, 172–177.
23. Niu Y. Y. Navier–Stokes analysis of gaseous slip flow in long grooves // *Numerical Heat Transfer. Part A*. – 1999. – Vol. 36. – No. 1. – P. 75–93.
24. Cheng H. P., Jou R. Y., Chen F. Z., Chang Y. W., Iwane M., Hanaka T. Three-dimensional flow analysis of spiral-grooved turbo booster pump in slip and continuum flow // *Vac. Sci. Technol. A*. – 2000. – Vol. 18. – No. 2. – P. 543–551.
25. Hwang Y.-K., Heo J.-S. Molecular transition and slip flows in rotating helical channels of drag pump // *AIP Conf. Proc.* – 2001. 585. 893.
26. Sawada T. Rarefied Gas flow in a rectangular groove facing a moving wall // *Sci. Papers of PCR*. – 1976. – Vol. 70., – No. 4.
27. Sickafus E. N., Nelson R. B., Lowry R. A. The Howleck type molecular pump. *Conites. Redus // C.R. Acad. Sci.* – 1923. – 177–43.
28. Saburo Igarashi. 3D Flow Simulation of a Spiral-Grooved Turbo-Molecular Pump. American Institute of Physics, 2001.
29. Sawada T. Vacuum sealing with a spiral grooved gas dynamic seal // *Bull. of the ISME*. – 1979. – 169. – P. 974–981.

Статья поступила в редакцию 14.09.2012