

Перспективы развития комбинированных турбомолекулярных вакуумных насосов

© К.Е. Демихов, Н.К. Никулин, Е.В. Свичкарь

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Для обеспечения безмасляной откачки вакуумных систем, определяемой многообразием технологических процессов, проводимых в условиях вакуума, в которых играет ведущую роль выбор средств системы откачки, в данной работе проведен анализ основных принципов выбора высоковакуумной системы откачки в зависимости от условий эксплуатации. Приведены основные конструкции современных комбинированных (гибридных) турбомолекулярных вакуумных насосов. В исследуемых комбинированных турбомолекулярных вакуумных насосах в качестве форвакуумных ступеней в основном устанавливаются молекулярные проточные части. Проведен анализ перспектив развития исследуемых насосов. В качестве альтернативы использования молекулярных ступеней рассматриваются проточные части молекулярно-вязкостного вакуумного насоса, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с молекулярными проточными частями.

Проведено исследование течения газа в каналах молекулярной ступени комбинированного турбомолекулярного вакуумного насоса в вязкостном режиме течения с помощью программного комплекса гидрогазодинамики STAR-CCM+. Расчетные данные приведены для всей проточной части молекулярного вакуумного насоса с учетом влияния зазора между статором и ротором насоса.

Ключевые слова: молекулярный вакуумный насос, молекулярно-вязкостный вакуумный насос, вакуум, вязкостный режим течения, течение газа, винтовой канал, геометрические параметры.

Основные параметры сравнения вакуумных насосов. В настоящее время вакуум применяется в большинстве областей промышленности, например, в химической, фармацевтической, пищевой, во многих областях машиностроения и др. Соответственно встает вопрос о компоновке вакуумной системы (ВС) для технологического процесса, чтобы она обеспечивала все требования процесса и при этом имела минимальные энергетические и экономические затраты и, по возможности, была простой в обслуживании. Основная сложность состоит в правильном выборе средств системы откачки.

В качестве основных параметров сравнения вакуумных насосов (ВН) можно выделить:

1) откачные параметры (быстрота действия, предельно остаточное давление, диапазон рабочих давлений) вакуумного насоса;

- 2) селективность откачки;
- 3) необходимость регенерации;
- 4) безмасляность вакуумной системы;
- 5) необходимость форвакуумного или дублирующего оборудования;
- 6) время выхода на рабочий режим;
- 7) энергопотребление;
- 8) технологичность изготовления, сборки;
- 9) стоимость оборудования и его обслуживания.

Важнейшими параметрами ВС, которые приходится определять при практическом использовании вакуумной техники, являются давление и скорость откачки газа из вакуумной камеры, а также предельное остаточное давление насоса. Но ограничиться только этими параметрами невозможно, следует учесть также возможность загрязнения рабочей среды парами углеводородов или другими веществами, энергетические затраты, селективность откачки, необходимость регенерации и предварительной откачки, т. е. наличие форвакуумной системы, и многое другое.

Анализ рынка выявляет основные ВН, которые используются для получения высокого вакуума в откачиваемой системе:

- турбомолекулярные вакуумные насосы (ТМН), в том числе комбинированные турбомолекулярные вакуумные насосы;
- криосорбционные вакуумные насосы;
- электрофизические вакуумные насосы;
- диффузионные вакуумные насосы (ДВН);
- молекулярные вакуумные насосы (МВН);
- молекулярно-вязкостные вакуумные насосы (МВВН).

С помощью практически любого ВН можно обеспечить «безмасляность» системы. Соответственно каждая ВС приобретает свои преимущества и недостатки, а уже из их сопоставления производят компоновку системы.

Во многих ВС для обеспечения чистого вакуума применяют криосорбционные насосы, так как помимо безмасляности, они обладают широким диапазоном рабочих давлений и быстрот действия. Аналогично использование электрофизических ВН, которые схожи по своим показателям с криосорбционными, за исключением меньшей скорости действия. Применение криосорбционных и электрофизических ВН ограничено селективностью откачки различных газов. Плохо сорбируемые газы необходимо удалять с помощью дополнительных ВН. Это усложняет конструкцию и стоимость ВС, а также условия ее эксплуатации.

В ТМН, МВН и МВВН нет селективности откачки по сравнению с другими насосами, но при этом состав газа влияет на откачную ха-

рактическую характеристику насосов. Насосы переносят газ со стороны всасывания на сторону нагнетания, не сорбируя его во внутренней полости. Следовательно, нет необходимости в их регенерации. Криосорбционные, электрофизические ВН удерживают газ внутри себя, чем ограничивают свой ресурс работы. В процессе регенерации в период работы насоса возникает ряд проблем, делающих невозможным использование этих насосов для некоторых технологических процессов. Например, когда происходит пресыщение рабочего элемента газом, обратный поток газа увеличивается.

Существенной проблемой для ВН является прорыв атмосферы. Комбинированные ТМН и МВВН могут запускаться с атмосферы, т.е. им не страшен прорыв атмосферы и не нужна форвакуумная система. В насосах, где используется форвакуумная система, нужно учесть защитные средства от паров углеводородов, которые могут попасть в систему при пуске и останове либо прорыве атмосферы.

Источником паров углеводородов обычно служат опоры вращения роторов. Ранее в них в основном использовались подшипники качения на жидкой смазке, что требовало дозированной подачи смазки и специальных уплотнений для защиты рабочей среды. Однако такое решение не всегда спасает от диффундирования паров углеводородов через лабиринтное уплотнение при остановленном насосе. В последнее время в механические ВН устанавливают гибридные подшипники качения с керамическими шариками на консистентной смазке. С их помощью уменьшено количество паров углеводородов, увеличен ресурс работы насоса, но при этом существенно увеличена его стоимость. Помимо керамических подшипников, в опорах вращения используют газовые и магнитные подшипники. В них также не выделяются пары углеводородов, и практически не ограничен срок работы насоса. Газовые и магнитные опоры позволят обеспечить требуемую чистоту вакуума, делают насос менее чувствительным к прорыву атмосферы. Некоторые фирмы-производители сочетают в ВН опоры двух типов, например, магнитную опору со стороны всасывания и керамический подшипник на нагнетании (фирма Intech).

ТМН, МВН, МВВН практически не затрачивают энергии на процесс откачки, а вся мощность уходит на привод ВН, в частности на трение в подшипниках. Для защиты электропривода механических ВН от электрических и электромагнитных полей ставят дополнительную систему защиты.

Значительная сложность для обеспечения работы ВН с вращающимся ротором — это высокоточная балансировка, которую не всегда удается провести на рабочих режимах вращения ротора, так как эти насосы относятся к высокочастотным средствам откачки. К тому же у них повышенный уровень шума.

Широкое применение нашли ДВН, так как они отличаются простотой конструкции, хорошим ресурсом работы. С помощью ловушек обеспечивают необходимую чистоту вакуума. Но эти меры приводят и к увеличению стоимости, усложнению эксплуатации, а также к ограничению области их использования. Как показывает опыт работы с ДВН, величина предельного давления зависит от чистоты рабочей жидкости и количества растворенных в ней примесей и газов; также имеет большое значение перегрев масла. Защитные средства от рабочих тел увеличивают стоимость системы и энергетические затраты при эксплуатации.

В ряде технологических процессов одно из основных требований — минимальное время выхода ВС на рабочий режим либо максимальное время работы ВС без останова на ремонтные работы. Эти требования выдерживают механические ВН. При использовании магнитных опор ресурс работы практически не ограничен. Ресурс криосорбционных и электрофизических насосов ограничен регенерацией насосов. Время выхода на режим механических насосов — менее 15 мин. В то же время криосорбционные ВН такой же быстроты действия выходят на режим дольше: насосы фирм SHI Cryogenics, Austin Scientific — не менее 150 мин, ООО НТК «Криогенная техника» — 75 мин. Не меньше времени для выхода на рабочий режим требуется ДВН.

К недостаткам комбинированных ТМН можно отнести сложность конструкции и наличие небольшого зазора в форвакуумной проточной части.

Несомненными же достоинствами комбинированных ВН, перекрывающими вышеуказанные недостатки, являются лучшие откачные характеристики насоса и увеличение диапазона работы благодаря сочетанию проточных частей с различными откачными характеристиками. В последнее время используют комбинированные ТМН с интегрированной молекулярной, вихревой или молекулярно-вязкостной ступенями.

Рассмотренные выше достоинства и недостатки высоковакуумных насосов позволяют утверждать, что с помощью комбинированных ТМН можно добиться требуемой чистоты вакуума в широком диапазоне быстроты действия и давления газа, минимизировать габариты и стоимость установки, ее энергетические затраты.

Комбинированные ТМН. Перспективы развития ТМН можно определить следующими направлениями:

- создание и разработка магнитных опор;
- создание и разработка комбинированного ТМН с нагнетанием газа непосредственно в атмосферу. Для этих целей разрабатываются

комбинации проточных частей, отличающихся по принципу действия:

- ТМН + МВН;
- ТМН + МВН + вихревой ВН;
- ТМН + МВН + МВВН;
- ТМН + МВВН.

На рис. 1 представлены конструкции комбинированных ТМН фирм Varian (рис. 1, а) и Edwards (рис. 1, б) с интегрированной молекулярной ступенью Геде.

Наибольшее распространение получили комбинированные ТМН с интегрированной молекулярной ступенью Хольвека (рис. 2, а) и Холланда — Мартена (рис. 2, б).

Исследование работы комбинированных ТМН фирмы Varian описаны в [2–6]. В [6] проведено сравнение работы молекулярных ступеней комбинированных ТМН фирмы Varian. В [5, 6] приводятся данные о разработке комбинированных ТМН с интегрированной молекулярной ступенью Зигбана и о высокой эффективности данного конструкционного решения (рис. 3).

Во время проектирования комбинированных ТМН возникает ряд проблем в согласовании работы турбомолекулярной и молекулярной ступеней. При откачке ТМН без молекулярных ступеней рабочей среды через некоторое время в вакуумной камере остается достаточно большое содержание легких газов. Например, процентное содержание водорода порой достигает 90%. Все откачные характеристики ТМН в основном рассчитаны по азоту или другим газам, но не по водороду, в результате чего характеристика насоса значительно ухудшается. Улучшить ее возможно, установив в качестве форвакуумных ступеней молекулярные и молекулярно-вязкостные ступени, что позволяет разгрузить турбомолекулярные ступени насоса, сохраняя в последних колесах молекулярный режим течения газа. Вдобавок происходит увеличение давления нагнетания всего насоса, фактически расширяется рабочий диапазон давлений. В комбинированных ТМН последние ступени работают в вязкостном и переходном режимах течения. В связи с этим возникает ряд технологических и расчетных трудностей при согласовании их работы, быстроты действия разных типов проточных частей. Частично вопросы с обеспечением быстроты действия решены при установке молекулярно-вязкостной проточной части, которая обладает быстротой действия в 2 раза большей, чем молекулярная проточная часть.

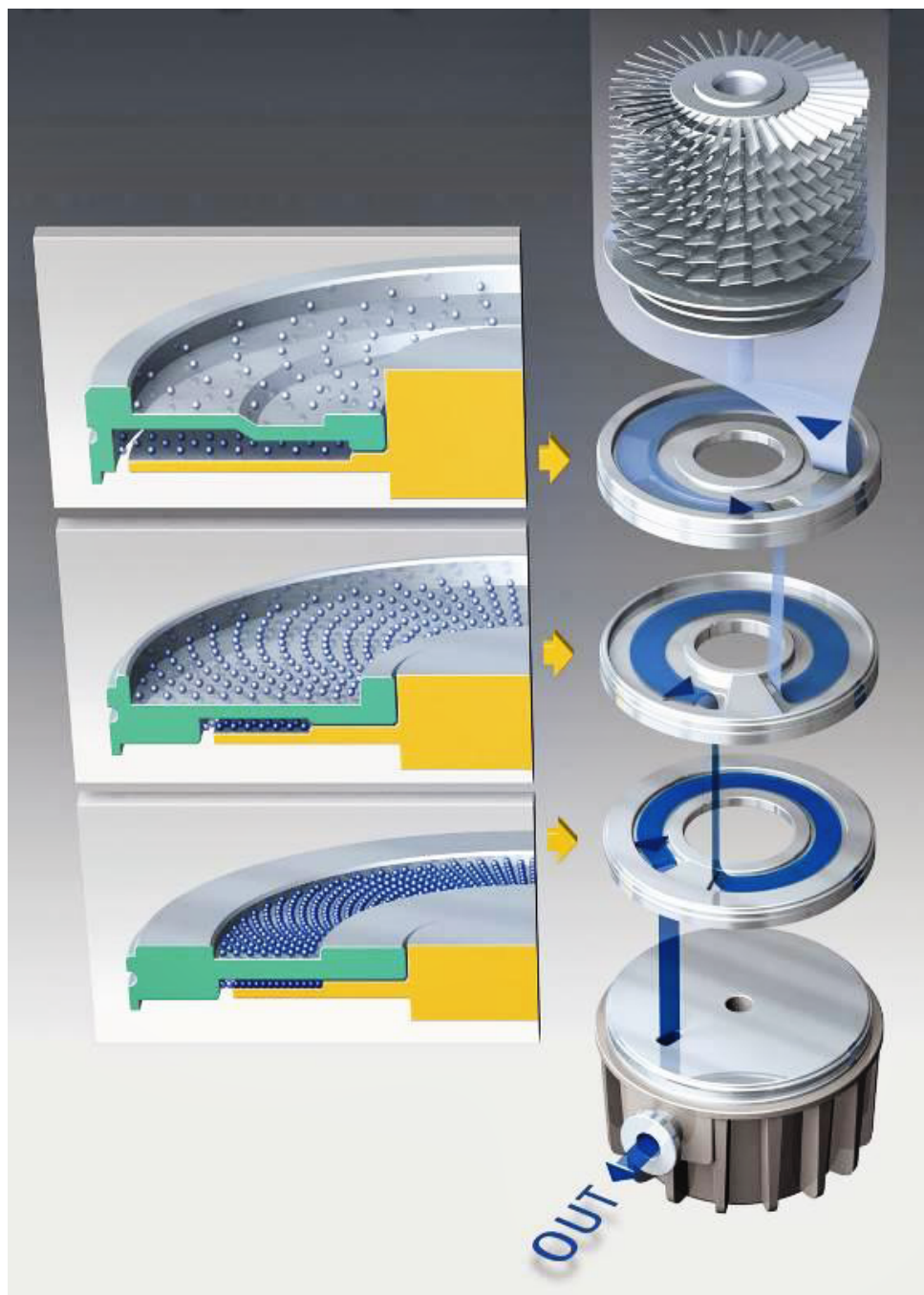


Рис. 1, а. Комбинированные ТМН с молекулярной ступенью Геде: Varian (Macrotorr®);



Рис. 1, б. Комбинированные ТМН с молекулярной ступенью Геде: Edwards

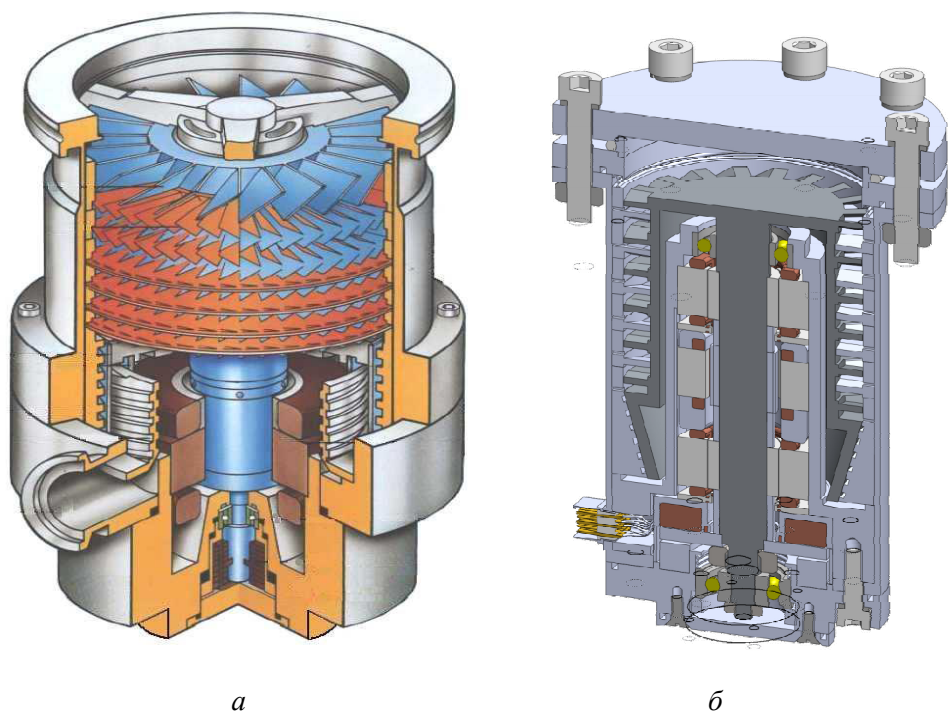
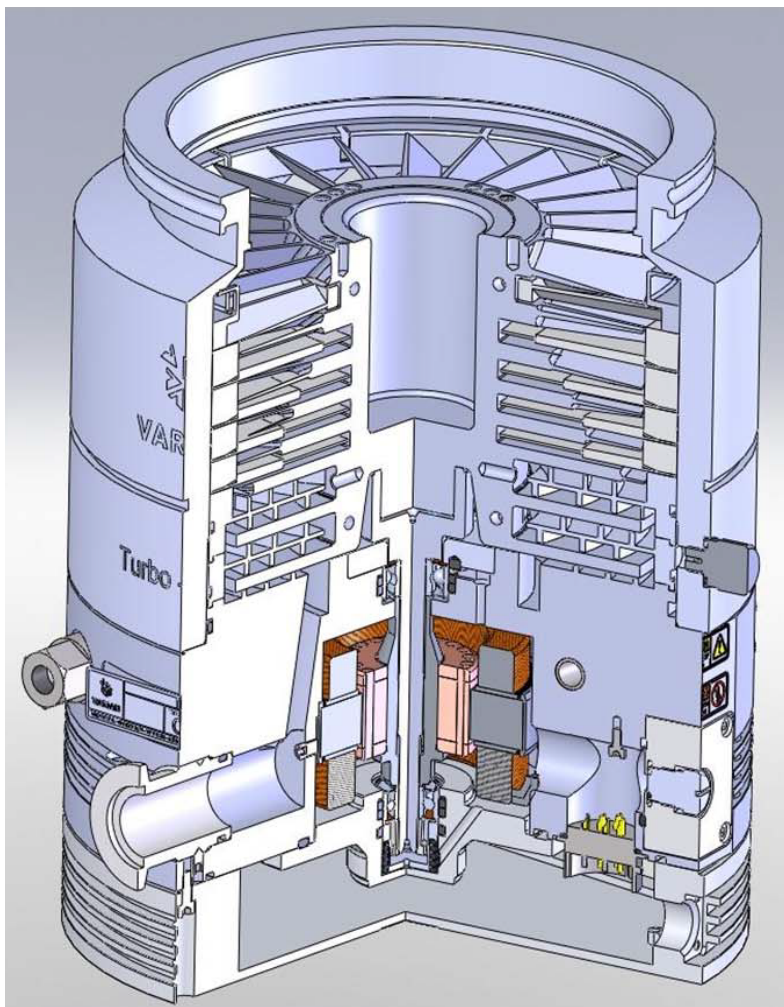
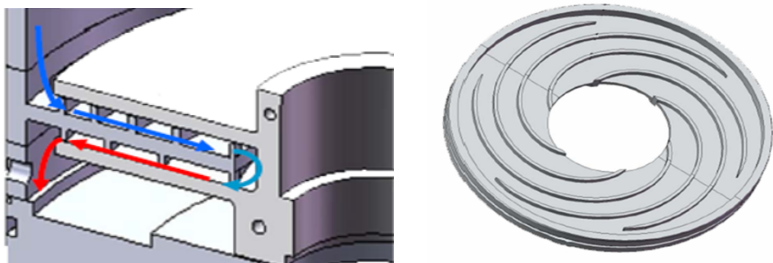


Рис. 2. Комбинированные ТМН:

a — с молекулярной ступенью Хольвека; *б* — с конической молекулярной ступенью Холланда—Мартена



a



б в

Рис. 3. Комбинированный ТМН с молекулярной ступенью Зигбана:
a — комбинированный ТМН с молекулярной ступенью Зигбана (TwisTorr® — Varian); *б* — двухступенчатая однопоточная ступень ТМН насоса; *в* — рабочий диск насоса

Результаты анализа теоретических и экспериментальных исследований МВН показали, что одним из основных факторов, ограничивающих повышение откачных параметров насоса, является перетекание через радиальный разор между ротором и статором насоса (для схемы МВН Геде — отсекателем). 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 и делают максимально широкой кромку между каналами.

В качестве форвакуумных ступеней можно использовать молекулярно-вязкостную проточную часть [7–13] (рис. 4), обладающую большей быстротой действия по сравнению с молекулярной проточной частью, а также имеющую зазор порядка 0,1...0,2 мм. Отличительной особенностью данной проточной части является то, что при определенном наборе геометрических параметров она может работать в вязкостном, переходном и молекулярном режимах течения газа. При этом возможно получение форвакуумного давления не менее 10^3 Па, а в определенных конструкциях — даже 10^5 Па.

Одним из основных параметров, определяющих откачную характеристику проточной части, является профиль канала. В качестве профиля выбираются прямоугольный, трапециевидальный, круглый и

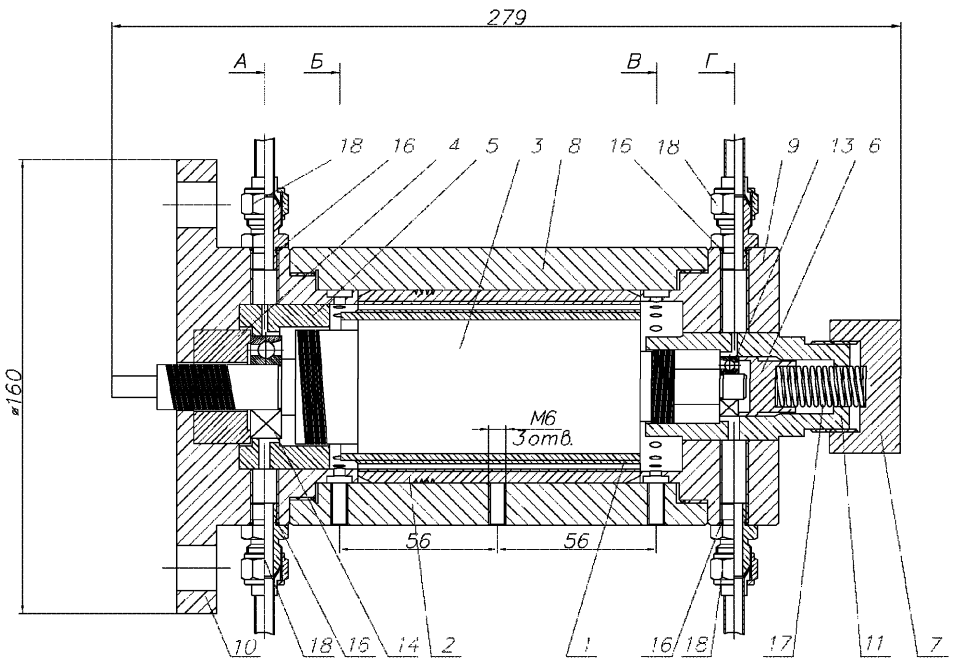


Рис. 4. Конструктивная схема одноступенчатого МВН

треугольный профили. Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, наилучшим образом работают симметричные каналы с одинаковым углом наклона боковой стенки к основанию канала, одинаковой формой каналов в одной проточной части, так как возникает симметричность потока.

Как было ранее отмечено, ТМН, комбинированный с МВВН (рис. 5), позволяет работать без форвакуумного ВН, т.е. производить нагнетание газа непосредственно в атмосферу. Конструкции комбинированных ВН получаются меньших размеров по сравнению с другими ВН, имеющими аналогичные откачные характеристики, и обладает более низким энергопотреблением.

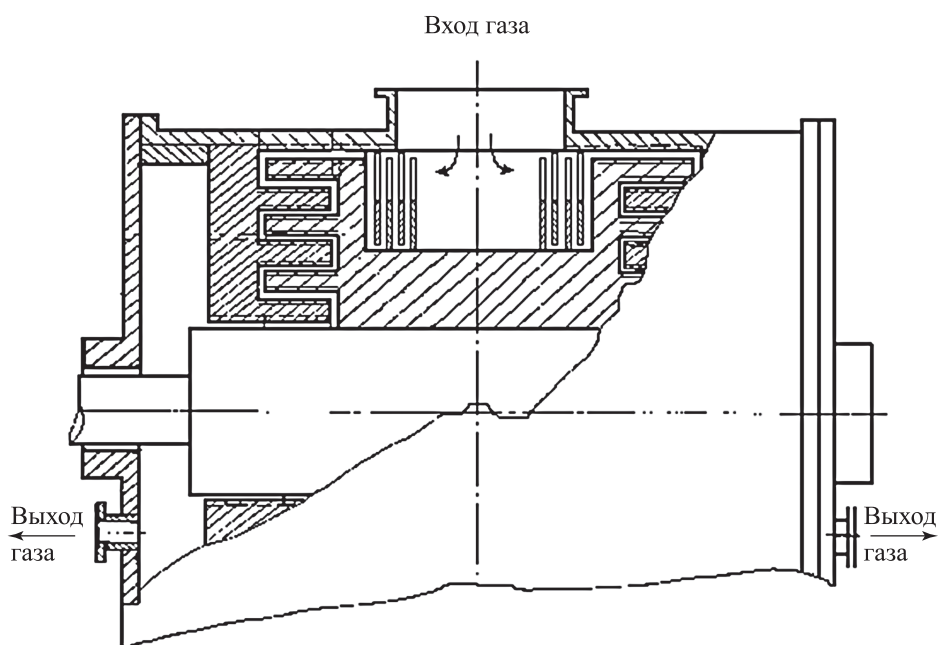


Рис. 5. Комбинированный ТМН с МВВН

Численное исследование рабочих процессов МВН комбинированного ТМН с помощью CFD. Благодаря увеличению вычислительных ресурсов в последние десятилетия для решения геометрически сложных трехмерных задач было сделано немало численных расчетов для разных режимов течения газа. Эти модели основаны на статистическом моделировании методом Монте-Карло, численном решении модели уравнения Больцмана, а также на основе уравнений Навье — Стокса для вязкого режима.

Вспомогательным инструментом для исследования рабочих процессов течения газа в проточной части комбинированного ТМН являются программы гидрогазодинамики. Они имеют практическое преимущество по отношению к другим системам, так как могут моделировать трехмерное течение газа в сложной геометрии ВН. Но в их системе есть значительный недостаток: условия сплошной среды не подходят для условий сильно разреженной среды, в итоге точность полученных теоретических данных плохо согласуется с экспериментальными. Использование таких программ позволяет производителям ВН снизить затраты на изготовление прототипа и проведение реальных экспериментов, заменяя их численным экспериментом.

Примеры описания рабочих процессов в комбинированных вакуумных насосах можно найти в работах [3–13], где исследуются математические модели МВН в областях вязкостного и переходного режимов течения газа с помощью комплексов гидрогазодинамики, основанных на уравнениях Навье—Стокса. Полученные данные точны с точки зрения отношения давления газа, и можно считать, что модель Навье — Стокса применима к условиям молекулярного потока.

В [12, 13] для проведения расчетного исследования проточной части МВН применен пакет гидрогазодинамики Star-CCM+, где в качестве расчетной области используется только объем, занятый газом. В целях уменьшения числа ячеек не учитываются области всасывания и нагнетания насоса. При построении расчетной сетки необходимо значительно увеличивать ее плотность (измельчать сетку) на входе, выходе из проточной части и в области зазора, так как грубая сетка в этой зоне не позволяет получать достоверные данные.

Для численного моделирования основной области течения газа использовалась неструктурированная многогранная сетка. Для численного моделирования пограничного слоя в вязкостном режиме течения используется структурированная призматическая расчетная сетка в несколько слоев вблизи твердых стенок. В переходном режиме течения пограничный слой не учитывается в связи с тем, что он соизмерим со средней длиной свободного пробега, которая в данных условиях значительно меньше размеров канала. В этом случае учет пограничного слоя может привести к неоправданному увеличению количества ячеек расчетной сетки и увеличению времени расчетов.

У проточной части должны быть следующие параметры: 7 каналов высотой 1 мм и шириной 7 мм, кромка — 6 мм, зазор — 0,05 мм, длина проточной части — 20 мм; расчетная сетка должна иметь не менее $2 \cdot 10^6$ ячеек (рис. 6).

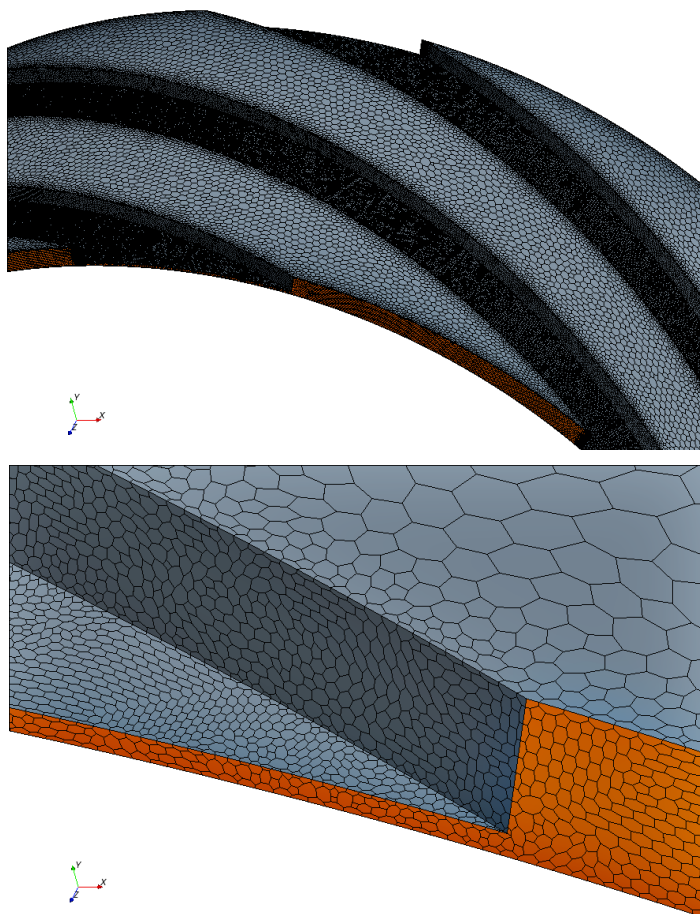


Рис. 6. Расчетная сетка МВН

При создании расчетной модели используются следующие допущения:

- ламинарное течение газа;
- температура газа считается постоянной, так как она увеличивается в процессе перехода молекул газа со стороны всасывания на сторону нагнетания из-за наличия газового трения о поверхность канала, а также за счет перехода части кинетической энергии газа в тепло в статоре. В дальнейшем возможно выявить влияние температуры газа на откачную характеристику насоса по экспериментальным данным;
- не учитывается влияние входа и выхода канала на течение газа в нем. Но в дальнейшем этот факт необходимо рассмотреть, так как он окажет отрицательное влияние на откачную характеристику насоса.
- газ идеальный;
- стационарная постановка задачи.

Наилучшим способом для определения отношения давления по проточной части служит безрасходный режим течения, когда в про-

точной части можно получить максимальное отношение давления (рис. 7).

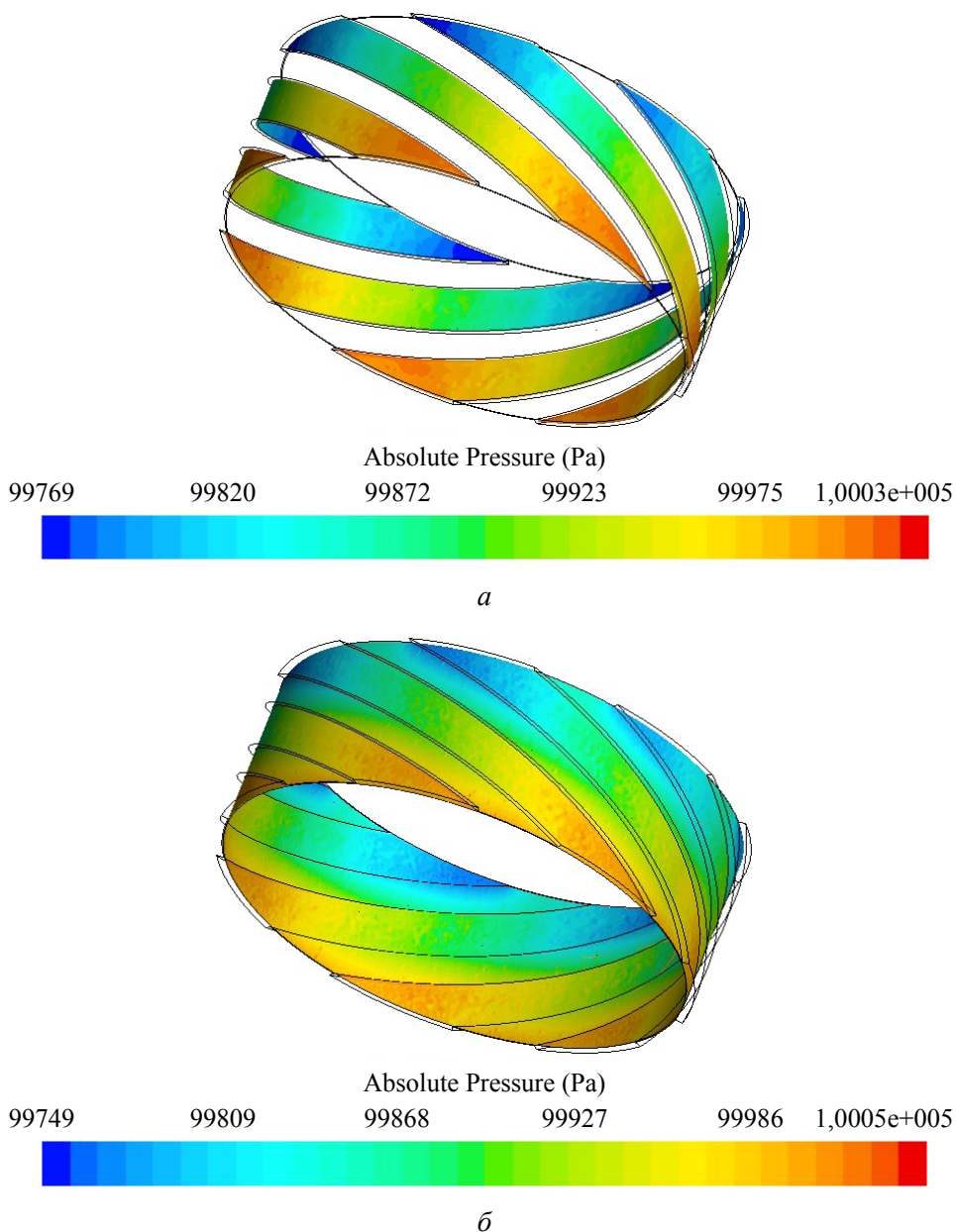


Рис. 7. Давление газа в канале (а) и зазоре (б) для скорости вращения ротора $\omega = 15\,000$ об/мин

Качественный характер течения позволяет уточнить граничные условия и влияние отдельных геометрических и скоростных параметров проточной части насоса на его откачную характеристику и, соответственно, повысить точность расчета.

Работа выполнена в рамках гранта НШ-6131.2012.8 и по государственному заданию высшим учебным заведениям на 2013 и на плановый период 2015 и 2015 гг. в части проведения научно-исследовательских работ и отчетах о научной деятельности за 2012 г. (№ 7.803.2011).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Вакуумная техника: справочник*. Москва, Машиностроение, 2009.
- [2] Каталог фирмы Varian. *Inc. Vacuum Technologies*.
- [3] 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, N 2, 2005.
- [4] 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. I. Vacuum performance. *J. Vac. Sci. Technol, A*, vol. 24, 4, 2006.
- [5] Cozza I.F., Campagna L., Emelli E. A kinetic Approach in Modelling Compact Siegbahn Molecular Drag Stages: Physical and Numerical Aspects. *64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology*, 2011.
- [6] Dolcino L. A new Technology for high performance Turbomolecular-Drag Pumps. *IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology*, 2010.
- [7] Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Расчет параметров течения газа в тонких каналах с подвижной стенкой. *Вестник МГТУ, сер. Машиностроение*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, вып. 4.
- [8] Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Теоретические характеристики МВВН при течении газа со скольжением, «Будущее машиностроения России. Сб. тр. всерос. конф. молодых ученых и специалистов/ Московский Государственный Технический Университет МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 332 с.
- [9] Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Математическая модель молекулярно-вязкостного вакуумного насоса при течении со скольжением. Вакуумная техника, материалы и технология. *Мат. VI Международной научно-технической конференции*. С.Б. Нестеров, ред. Москва, Новелла, 2011.
- [10] Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В., Антипов И.А. Измерение температуры проточной части молекулярно-вязкостного вакуумного насоса. *Известия вузов. Машиностроение*, № 10, 2011.
- [11] Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Исследование течения газа в канале МВН в вязкостном режиме течения. *Известия вузов. Машиностроение*, 2012.
- [12] Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Течение газа в спиральном канале молекулярного вакуумного насоса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012
- [13] Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Вакуумная техника, материалы и технология. *Мат. VIII Международной научно-технической конференции*. Нестеров С.Б., ред. Москва, Новелла, 2013, с. 111–118.

Статья поступила в редакцию 31.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Перспективы развития комбинированных турбомолекулярных вакуумных насосов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/754.html>

Демихов Константин Евгеньевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заслуженный деятель науки Российской Федерации. Автор более 170 научных работ.

Никулин Николай Константинович родился в 1946 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Работает в области вакуумной техники более 32 лет. Автор более 100 научных трудов.

Свичкарь Елена Владимировна окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005 г. Ассистент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, работает в области вакуумной техники 8 лет. Автор 15 научных трудов.
e-mail: svic@bk.ru