



**ДЕМИХОВ**

**Константин Евгеньевич**  
доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедрой  
«Вакуумная  
и компрессорная техника  
физических установок»



**НИКУЛИН**

**Николай Константинович**  
кандидат технических  
наук, доцент



**СВИЧКАРЬ**

**Елена Владимировна**  
ассистент  
кафедры «Вакуумная  
и компрессорная техника  
физических установок»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
e-mail: nkn@bmstu.ru

## Исследование течения газа в канале молекулярного вакуумного насоса в вязкостном режиме течения

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

*Исследовано течение газа в проточной части молекулярного вакуумного насоса в вязкостном режиме течения с помощью программного комплекса гидрогазодинамики STAR—CCM+.*

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

## Investigation of gas flow in MVN channel under viscous flow regime

**K.E. Demikhov, N.K. Nikulin, E.V. Svichkar**

*The gas flow in the molecular vacuum pump channel under the viscous flow regime has been investigated by means of the fluid dynamics software complex STAR—CCM+.*

**Keyword:** molecular vacuum pump, vacuum, viscous flow regime, gas flow, spiral channel, pressure drop, velocity hodograph, geometrical parameters.

Обзор существующих работ в области создания новых средств получения вакуума показывает, что, разрабатывая их либо совершенствуя действующие, исследователи создают математические модели, описывающие течение газа в проточных частях вакуумных насосов. Анализируя опубликованные работы можно выделить основные этапы исследования:

- аналитическое решение математической модели;
- численное решение математической модели с помощью специализированных пакетов программ гидрогазодинамики;
- физический эксперимент.

Аналитическое решение математической модели необходимо для понимания физики процесса и параметрического описания модели. Любая математическая модель имеет комплекс ограничений, что зачастую отдаляет разработчика от реального процесса в разрабатываемых насосах и иногда становится невозможным точное моделирование процесса откачки, соответствующее эксперименту. Очевидно, что все разработанные модели должны пройти проверку на адекватность. Наилучшим способом проверки на адекватность является физический эксперимент. Однако, учитывая технические особенности проведения эксперимента, затраты времени и средств на его проведение, не всегда возможно получить полный спектр экспериментальных данных. На-

пример, при выявлении влияния геометрических параметров проточных частей молекулярных вакуумных насосов, требуется исследовать такие параметры как высота, ширина, угол наклона канала и т. д. Для проверки каждого параметра по отдельности или в разных сочетаниях потребуется изготовить весь размерный ряд проточных частей насоса, что не только проблематично, но и не целесообразно. Не стоит забывать, что в модели есть ряд допущений и, соответственно, в некоторых диапазонах исследуемых параметров, теоретические данные могут значительно отличаться от экспериментальных. Поэтому основную часть физического эксперимента заменяют численным экспериментом, оставляя для физического исследования только контрольные точки.

Вспомогательным инструментом для исследования математической модели являются программы гидрогазодинамики. Они имеют практическое преимущество по отношению к другим системам, так как могут моделировать течение газа в трехмерной геометрии вакуумного насоса. Однако у них 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 вакуумных насосов снизить затраты на изготовление прототипа и проведение реальных экспериментов, заменяя их численным экспериментом.

Благодаря увеличению вычислительных ресурсов, в последние десятилетия для решения сложных трехмерных задач выполнено немало численных расчетов для разных режимов течения газа. Математические модели основаны на статистическом моделировании методом Монте-Карло, численном решении модели уравнения Больцмана, а также на уравнениях Навье—Стокса для вязкого режима.

В современных турбомолекулярных насосах в качестве форвакуумных ступеней устанавливают молекулярные ступени. В этих насосах

возможно достижение форвакуумного давления порядка  $1 \cdot 10^3$  Па, а также сохранение безмасляности системы. Небольшая быстрота действия, высокая точность изготовления ограничивают возможность использования молекулярного насоса в качестве самостоятельных средств откачки. Результаты анализа теоретических и экспериментальных исследований молекулярного вакуумного насоса (МВН), показали, что одним из основных факторов, ограничивающих повышение откачных параметров насоса, является перетекание через радиальный зазор между ротором и статором насоса (для схемы МВН Геде — отсекателем). Для уменьшения перетекания газа через зазор проточной части, т. е. для снижения 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 [1—6], обладающую большим быстродействием по сравнению с молекулярной проточной частью, а также имеющую зазор порядка 0,1 мм. Особенностью такой 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  $1 \cdot 10^3$  Па, а в определенных конструкциях даже  $1 \cdot 10^5$  Па. Согласно методике описанной в работах [1—6], МВН является аналогом молекулярного насоса Хольвека. Поэтому создание и отработка математической модели молекулярно-вязкостной проточной части с помощью пакетов гидрогазодинамики, должны выполняться после получения численных данных для молекулярной проточной части с требуемой точностью.

В работе [7] авторы использовали модель молекулярного насоса Геде для исследований в области вязкостного режима течения и начинающемся переходном режиме с помощью комплекса гидрогазодинамики, основанного на уравнении Навье—Стокса. Полученные дан-

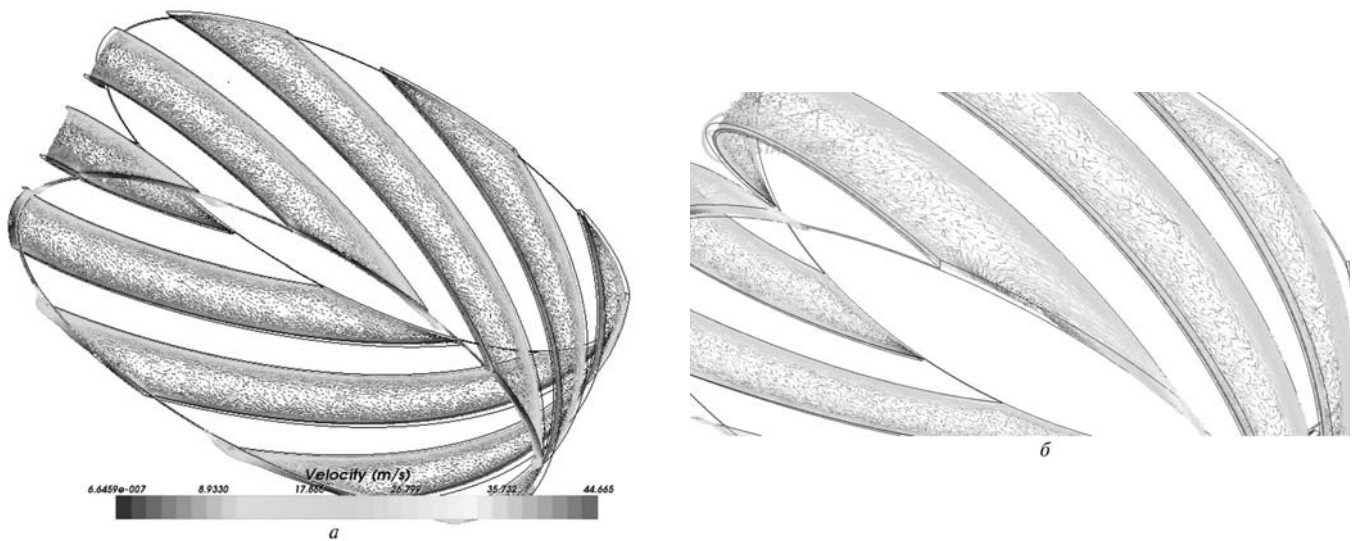


Рис. 1. Годограф скоростей газа в канале для скорости вращения ротора  $\omega = 15\,000$  об/мин

ные показали хороший уровень точности расчета отношения давления газа, а также, что модель Навье–Стокса работает, даже близко к условиям молекулярного потока. В статье [8] приведен аналогичный расчет молекулярного насоса Хольвека с коническими каналами с учетом граничных условий течения со скольжением. Полученные данные соответствуют экспериментальным для области вязкого течения газа. Статьи [7, 8] предполагают дальнейшее исследование работы молекулярных насосов для определения теплообмена в проточных частях, а также определения температуры ротора, что достаточно проблематично для быстровращающихся роторов вакуумных насосов [9].

Канал МВН в вязкостном режиме течения газа может быть рассчитан программным комплексом STAR–CCM+, предназначенным для решения задач механики сплошных сред.

При построении сеточной модели необходимо значительно измельчать сетку на входе, выходе из проточной части и в области зазора, поскольку крупная сетка в этой зоне не позволяет получать достоверные данные. Например, для проточной части со следующими параметрами: семь каналов высотой 1 мм и шириной 7 мм, кромка 6 мм, зазор 0,05 мм, длина проточной части 20 мм; сетка должна быть не менее  $2 \cdot 10^6$  ячеек.

При построении физической модели принимают следующие допущения:

- течение газа ламинарное;
- температура газа считается постоянной, так как она увеличивается в процессе перехода молекул газа со стороны всасывания на сторону нагнетания, вследствие газового трения о поверхность канала, а также за счет перехода части кинетической энергии газа в тепло в статоре. В дальнейшем, возможно определение влияния температуры газа на откатную характеристику насоса по экспериментальным данным;
- не учитывается влияние входа канала на течение газа в нем. В дальнейшем исследовании этот факт необходимо рассмотреть, так как он

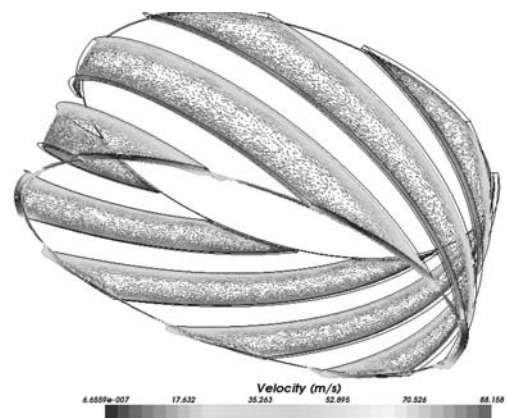


Рис. 2. Годограф скоростей газа в канале для скорости вращения ротора  $\omega = 30\,000$  об/мин



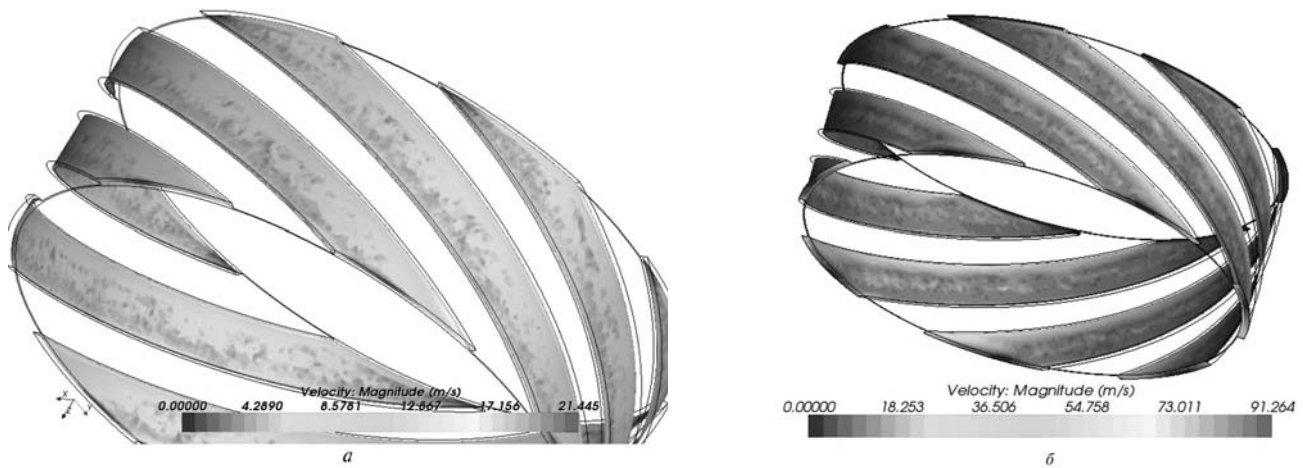


Рис. 3. Годограф скорости газа в канале по абсолютной величине для разной скорости вращения ротора:  
 $a - \omega = 15\,000$  об/мин;  $b - \omega = 30\,000$  об/мин

окажет отрицательное влияние на откачную характеристику насоса.

Наилучшим способом для определения отношения давлений на проточной части служит безрасходный режим течения, когда в проточной части можно получить максимальное отношение давлений.

На рисунках 1–6 показано распределение параметров течения газа в канале молекулярного насоса в зависимости от скорости вращения ротора  $\omega$ . Распределение параметров потока газа показано в сечении, проходящем через

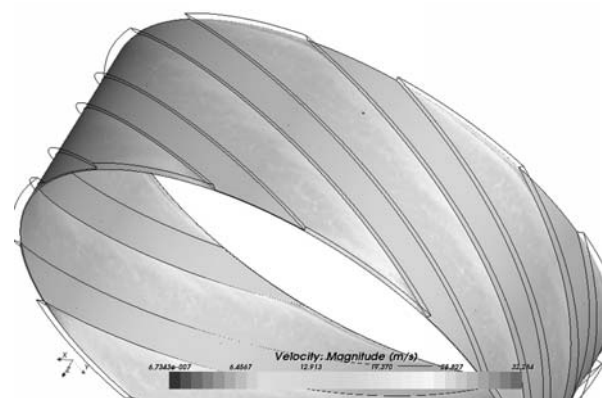


Рис. 4. Годограф скорости газа в зазоре по абсолютной величине для скорости вращения ротора  $\omega = 15\,000$  об/мин

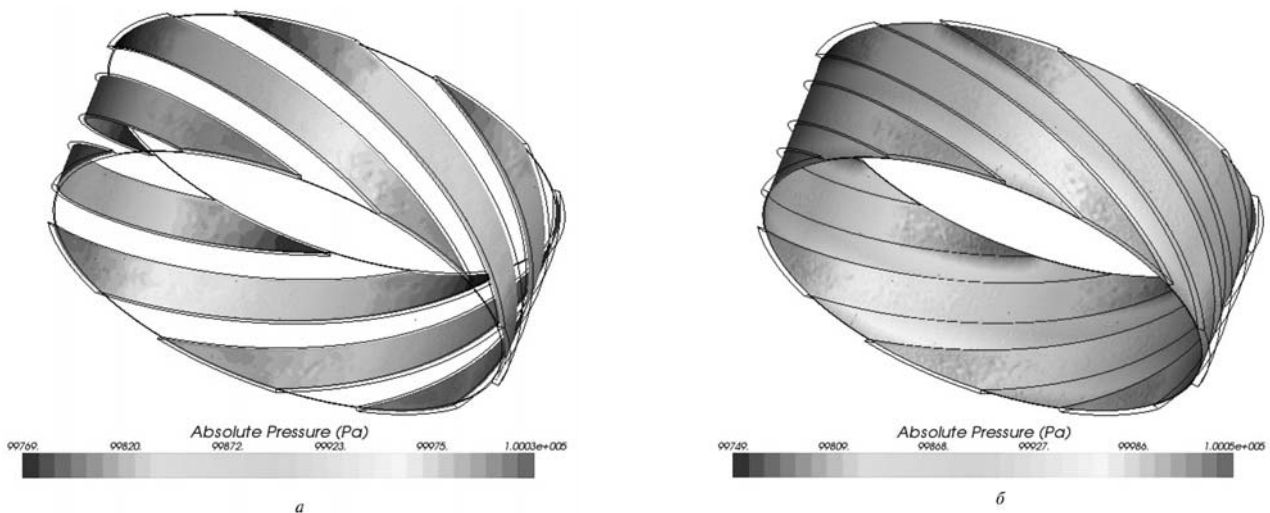


Рис. 5. Годограф давления газа в канале (a) и зазоре (b) для скорости вращения ротора  $\omega = 15\,000$  об/мин

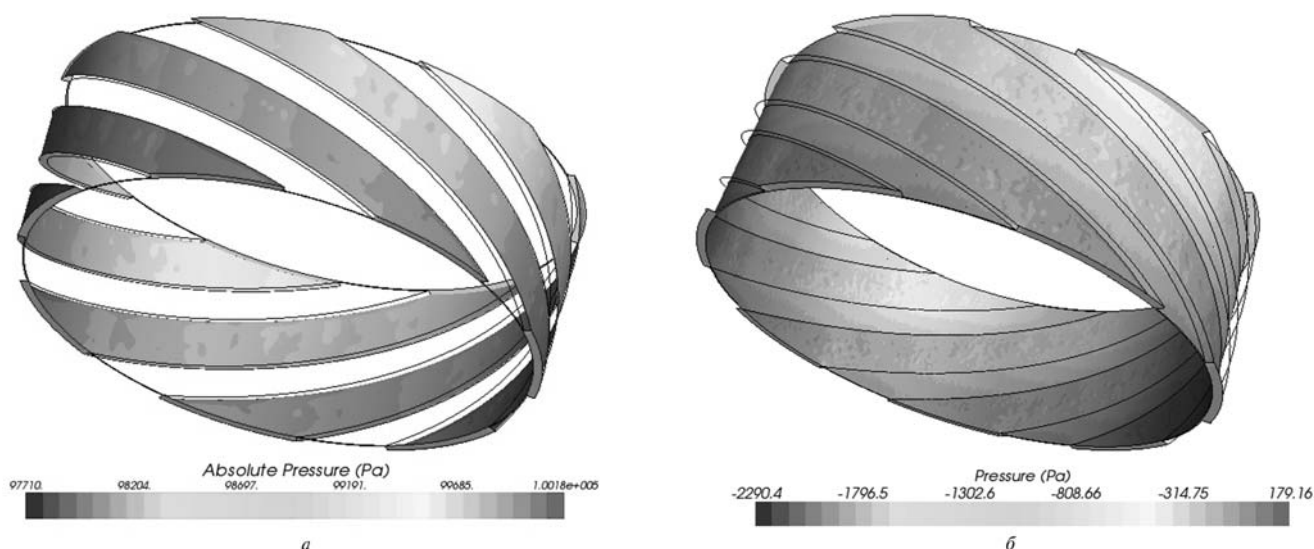


Рис. 6. Годограф давления газа в канале (а) и зазоре (б) для скорости вращения ротора  $\omega = 30\,000$  об/мин

середины канала по высоте и через середину зазора по высоте.

Результаты течения газов в проточной части расчета позволяют получить распределение давления по длине канала и в зазоре (см. рис. 5, 6).

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

## Литература

1. Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Модель молекулярно-вязкостного вакуумного насоса в условиях низкого вакуума // Конверсия в машиностроении, 2007. С. 85–88.
2. Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Расчет откачной характеристики МВВН в вязкостном режиме течения // Сб. тр. I Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты». М., 2008. С. 128–139.
3. Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Модель ламинарного течения газа в тонких каналах с подвижной стенкой. Компрессорное и энергетическое машиностроение, Украина: Сумы, 2009.
4. Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Расчет параметров течения газа в тонких каналах с подвижной стен-

кой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2009. Вып. 4. С. 19–26.

5. Демихов К.К., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Теоретические характеристики МВВН при течении газа со скольжением // Сб. тр. всерос. конф. молодых ученых и специалистов. «Будущее машиностроения России». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 332 с.

6. Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь 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.: НОВЕЛЛА, 2011. С. 126–130/

7. 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. Mar/Apr 2005. P. 336–346.

8. 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. N. 4. Jul/Aug 2006. P. 1584–1591.

9. Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В., Антипов И.А. Измерение температуры проточной части молекулярно-вязкостного вакуумного насоса // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 10. С. 34–37.

Статья поступила в редакцию 07.08.2012