

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 81.29.14



ДЕМИХОВ
Константин Евгеньевич
доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой



НИКУЛИН
Николай Константинович
кандидат технических
наук, доцент кафедры
«Вакуумная
и компрессорная техника
физических установок»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Высоковакуумная откачка направленных потоков газа

К.Е. Демихов, Н.К. Никулин

Рассмотрена высоковакуумная откачка направленных потоков газа с помощью криоадсорбционных, электрофизических и механических средств откачки.

Ключевые слова: направленный поток, криоадсорбционный насос, механический насос, плотность молекулярных потоков, распределение, высоковакуумная система.

The paper deals with high-vacuum pumping of directed gas flows by means of cryoadsorption, electrical and mechanical pumping.

Keywords: directed flow, cryoadsorption pump, mechanical pump, molecular flows density, distribution, high-vacuum system.

Ряд технологических процессов осуществляется при напуске значительного количества газа до нескольких десятков килограмм в секунду, например, при испытании некоторых видов двигателей в вакуумной установке. При этом требуемое давление для проведения процесса может составлять $10^{-1} \dots 10^{-6}$ Па. Для удаления таких количеств газа приходится увеличивать объемы вакуумных камер, в которых проводится технологический процесс, и значительно увеличивать количество вакуумных насосов. В ряде случаев в качестве высоковакуумной системы откачки используется вся поверхность вакуумной камеры для размещения средств откачки на основе криоадсорбционных насосов. Напуск газа обычно осуществляется через локализованные источники газа из объемов со сравнительно большим давлением. Рас-

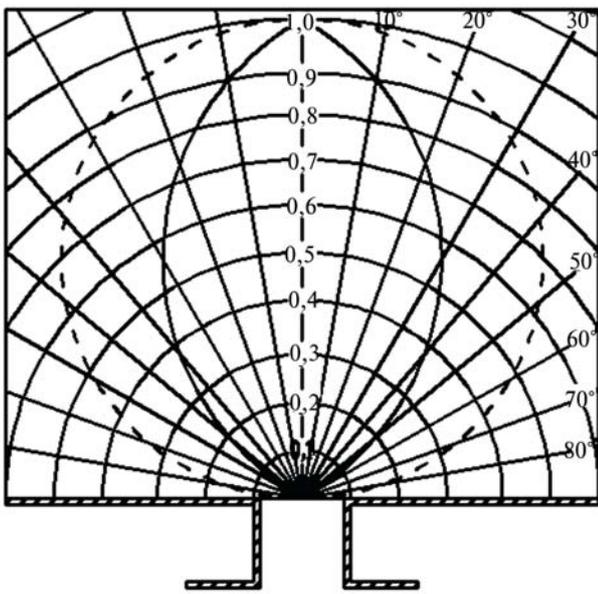


Рис. 1. Напускаемый поток газа

ширяющийся напускаемый газ в высоковакуумной камере имеет различную плотность потока в зависимости от направления истечения, а также плотность зависит от геометрических и тепловых характеристик источника газа и вакуумной камеры. Качественная картина распределения плотности напускаемого потока может быть оценена по данным работы [1]. Типичная картина напускаемого потока представлена на рис. 1.

При удалении больших потоков газа из вакуумной системы в основном используют адсорбционные, конденсационные и криоадсорбционные средства откачки. Однако при проведении высокотемпературных технологических процессов применение этих средств приводит к очень большим эксплуатационным затратам или вообще неприменимо. В этих случаях можно использовать высоковакуумные механические средства откачки на основе турбомолекулярных вакуумных насосов и электрофизические средства откачки. Кроме того, к современным технологическим процессам предъявляется обязательное требование «безмасляности» остаточной среды вакуумной камеры. Такие условия способны обеспечить высоковакуумные криоадсорбционные вакуумные насосы, электрофизические средства откачки

и турбомолекулярные вакуумные насосы. На основе этих средств откачки и создают вакуумные технологические установки.

Еще одно требование, предъявляемое к средствам откачки, — это способность удалять плохо сорбируемые и неконденсируемые газы (гелий, неон, иногда водород и пары воды). Криоадсорбционные средства откачки малоэффективны или не эффективны при откачке гелия, водорода и неона. Значительно ниже эффективность откачки гелия и неона и у электрофизических средств откачки. Высоковакуумные турбомолекулярные насосы обеспечивают откачку всех газов с практически одинаковой быстротой действия, но имеют ограничение по скорости действия до нескольких десятков кубических метров в секунду.

Исследования распределения плотности молекулярных потоков по объему высоковакуумных камер при напуске из локализованного источника газа [2—5] позволяют определить требования, предъявляемые к создаваемой системе откачки для обеспечения удаления основного количества напускаемого газа при более высоких давлениях, если поглощающие поверхности системы откачки расположить в местах с наибольшей плотностью молекулярного потока. При этом давление в остальном пространстве будет значительно меньше, чем в местах с наибольшей плотностью потока. Это возможно осуществить, зная распределение плотностей молекулярных потоков по объему вакуумной камеры. Все вакуумные камеры и устройства для проведения технологических процессов можно представить в виде совокупности элементов поверхности, представляющих собой цилиндры, конусы и сферы. Примеры возможного размещения поглощающих поверхностей для цилиндрической камеры с напуском газа из локализованного источника в ее торце представлены на рис. 2—4. На рис. 2 эта система решена для криоадсорбционных средств откачки, на рис. 3, 4 — для высоковакуумных систем на основе механических насосов (турбомолекулярных и молекулярно-вязкост-

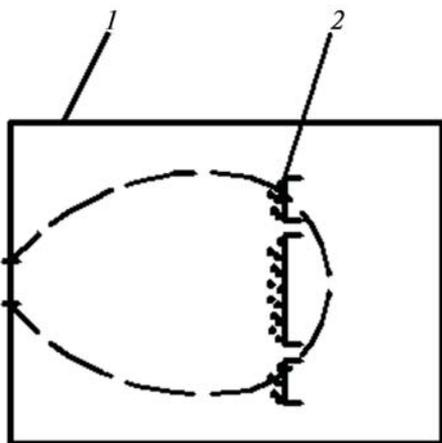


Рис. 2. Вакуумная система с использованием криоадсорбционных средств откачки:

1 — вакуумная камера; 2 — криопанели

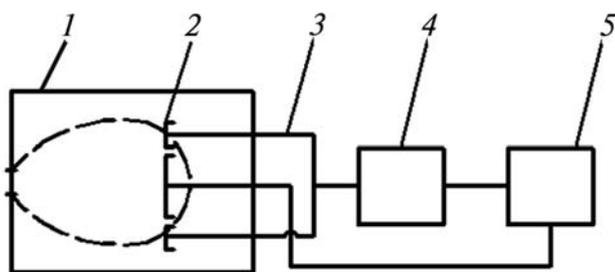


Рис. 3. Вакуумная система с использованием механических средств откачки в одном направлении:

1 — вакуумная камера; 2 — всасывающие патрубки насосов; 3 — трубопроводы; 4 — высоковакуумный насос; 5 — низковакуумный насос

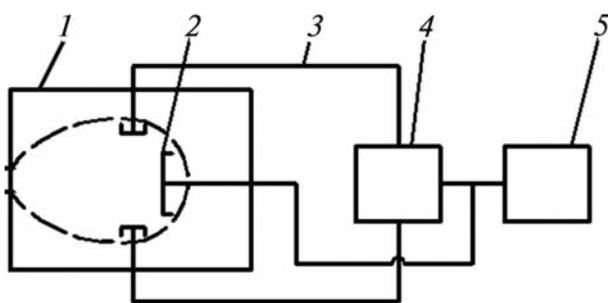


Рис. 4. Вакуумная система с использованием механических средств откачки в разных направлениях:

1 — вакуумная камера; 2 — всасывающие патрубки насосов; 3 — трубопроводы; 4 — высоковакуумный насос; 5 — низковакуумный насос

ных вакуумных насосов). В отличие от других средств откачки комбинированные турбомоле-

кулярные вакуумные насосы совместно с молекулярно-вязкостным насосом позволяют осуществлять откачку из различных объектов с разной плотностью откачиваемого газа. На рис. 4 представлена расчетная схема обеспечения вакуумирования вакуумной камеры с использованием комбинированного вакуумного насоса и молекулярно-вязкостного вакуумного насоса. Из условий постоянства потока можно сделать вывод, что оптимальное размещение средств откачки в условиях максимальной плотности молекулярного потока позволяют уменьшить требуемую быстроту действия вакуумного насоса пропорционально отношению плотностей потоков в рабочей зоне технологического процесса и в зоне максимальной плотности. Снижение быстроты действия возможно в несколько раз при обеспечении требуемого рабочего давления.

Общее количество газа Q , поступающего в результате технологического процесса, будет удаляться двумя отдельными вакуумными системами:

- первая система работает при повышенной плотности потока

$$Q_1 = n_1 F_1,$$

где n_1 — плотность потока частиц в местах повышенной концентрации, $1/(m^2 \cdot c)$; F_1 — площадь поглощающей поверхности, m^2 ; Q_1 — технологический поток газа, $1/c$.

Давление, соответствующее плотности потока частиц n_1 ,

$$p_1 = 4kTn_1 / v,$$

где k — постоянная Больцмана, Дж/К; T — температура газа, К; v — средняя арифметическая скорость молекул газа, m^2/c ;

- вторая система работает при пониженной плотности потока

$$Q_2 = n_2 F_2,$$

где n_2 — плотность потока частиц в местах повышенной концентрации, $1/(m^2 \cdot c)$; F_2 — пло-

щадь поглощающей поверхности, m^2 ; Q_2 — технологический поток газа, l/c .

Давление, соответствующее плотности потока частиц n_2 ,

$$p_2 = 4kTn_2 / v.$$

Соответствующая быстрота действия этих двух вакуумных систем должна обеспечить удаление всего напускаемого потока:

$$Q = S_1p_1 + S_2p_2,$$

где S_1 , S_2 — быстрота действия соответствующей системы откачки, m^3/c ; Q — технологический поток газа, $m^3 \cdot Pa/c$.

Из условия сохранения количества откачиваемого газа

$$Q = (Q_1 + Q_2)kT.$$

Зона рабочего давления p_2 обеспечивается системой откачки с быстротой действия S_2 . Причем для удаления даже одинаковых количеств газа из зоны с давлением p_1 и давлением p_2 необходимо быстроты действия соответствующих систем изменять обратно пропорционально величинам давления. Если давление p_2 в 2 раза меньше давления p_1 , то быстрота действия S_2 в 2 раза больше, чем S_1 . Таким образом, удаляя газ из зоны 1 можно значительно сократить требуемую быстроту действия для зоны 2, тем самым, уменьшая габаритные размеры вакуумной системы и ее стоимость. Для расчета вакуумных систем откачки при проведении технологических процессов с перечисленными выше условиями в качестве расчетной схемы принимается схема вакуумной системы, состоящей из цилиндрической камеры, на торце которой размещен локальный источник газа. Вакуумная система откачки представляет собой поглощающие поверхности в виде плоских поверхностей, свойства которых определяются их температурой, площадью, коэффициентом поглощения. Такая расчетная схема (см. рис. 2) имитирует работу криoadсорбцион-

ного насоса. Поглощающие поверхности размещаются в двух зонах: в зоне повышенной плотности потока частиц (зона 1) и в рабочей зоне технологического процесса (зона 2) с пониженной плотностью потока частиц. Требуемые свойства поглощающих поверхностей для каждой из этих зон определяют из условий обеспечения процесса и распределения плотности потока частиц напускаемого газа. При обеспечении постоянства быстроты действия насосов по всем газам в качестве поглощающих поверхностей рассматриваются сечения входа в высоковакуумный механический насос (турбомолекулярный). Каждая из поглощающих поверхностей в зоне 1 и зоне 2 (см. рис. 3) имитируют отдельные вакуумные системы на основе турбомолекулярных вакуумных насосов.

Создание комбинированных турбомолекулярных вакуумных насосов и молекулярно-вязкостных вакуумных насосов обеспечивает откачку одним насосом двух объектов с различной быстротой действия и при разных давлениях всасывания. Такие насосы можно использовать в качестве основного средства откачки вакуумной камеры. Эти насосы имеют два всасывающих патрубка: один — для высоковакуумной откачки, второй — для откачки камеры с более высоким давлением. Расчетная схема процесса с использованием этих насосов представлена на рис. 4.

Преимущество вакуумной системы на основе комбинированного турбомолекулярного и молекулярно-вязкостного насоса обусловлено значительным снижением габаритных размеров системы откачки, так как вместо двух автономных вакуумных систем используется один насос.

Математические модели процессов откачки на базе криoadсорбционных и механических высоковакуумных насосов включают в себя моделирование распределения плотности потока частиц по всем отражающим и поглощающим поверхностям вакуумной камеры с учетом взаимодействия газа с поверхностью [5—8] и дают возможность достаточно точно опреде-

лить положение поглощающих поверхностей рассматриваемых средств откачки относительно источника напуска газа в вакуумных камерах различного вида.

Литература

1. *Рамзей Н.* Молекулярные пучки. М.: Иностранная литература. 1960. 412 с.
2. *Абрамов Б.М.* Моделирование заданного распределения давления разреженного газа в вакуумных установках // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 1983. № 1. С. 63–66.
3. *Никитченко Ю.А., Никулин Н.К.* Исследование распределения плотности молекулярного потока по поверхности вакуумного канала // 1983. № 3. С. 67–71.
4. *Фролов Е.С., Никитченко Ю.А., Гришин В.К., Никулин Н.К.* Метод создания заданного распределения плотности молекулярного потока в вакуумном канале // 1983. № 11. С. 69–73.
5. *Никитченко Ю.А., Гришин В.К., Никулин Н.К.* Расчет распределения молекулярных потоков в системе камера-объект // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 1984. № 6. С. 68–72.
6. *Демихов К.Е., Никулин Н.К.* Математическое моделирование взаимодействия частиц газа с поверхностью космического аппарата в полете // Полет. 1999. № 2. С. 86–91.
7. *Демихов К.Е., Никулин Н.К.* Моделирование условий орбитального полета космического летательного аппарата // Полет М.: Машиностроение. 2000. № 2. С. 78–84.
8. *Горячева Е.А., Демихов К.Е., Никулин Н.К.* Расчет вакуумных систем различного назначения для откачки объектов одним или несколькими вакуумными насосами // Конверсия в машиностроении. 2007. № 1. С. 61–68.

Статья поступила в редакцию 05.10.2011 г.