

Современные пути оптимизации откачных вакуумных систем на базе диффузионных насосов

Ю. К. Васильев, С. Б. Нестеров
ФГУП «НИИВТ им. С. А. Векшинского»

Одним из самых распространенных средств высоковакуумной откачки в настоящее время являются диффузионные насосы. Эти насосы обладают целым рядом преимуществ, например, высокая производительность (в том числе по легким газам, таким как, гелий, водород), наличие моделей с большими Ду (выше 500 мм) для объемных вакуумных камер, отсутствие движущихся частей в зоне откачки, высокая толерантность к «прорывам атмосферы» (резкому «взрывообразному» увеличению давления в вакуумной камере вследствие нарушения герметизации), низкая стоимость. Главным недостатком, который является основной причиной отказа от данного типа вакуумных насосов в современном производстве является наличие рабочей жидкости — вакуумного масла, и, соответственно, присутствие обратного потока ее паров в вакуумную камеру. Этот обратный поток вносит существенные изменения в компонентный состав среды разреженного газа в вакуумной камере и является крайне нежелательным, а некоторых процессах совершенно недопустимым. Например, даже в таких, казалось бы, толерантных к составу газовой среды процессах, как вакуумная металлургия уже стремятся избавляться от наличия масляных паров в рабочей камере, поскольку технологический процесс, проходящий в безпримесной среде позволяет получать продукт с существенно лучшими свойствами. А в таких технологиях и отраслях, как полупроводниковая промышленность, аэрокосмические системы, физика элементарных частиц и термоядерная энергетика наличие любой посторонней примеси делает технологический процесс невозможным.

Данная работа посвящена обзору возможных путей оптимизации откачных систем на базе диффузионных насосов с учетом современных наработок и достижений в области вакуумной техники.

Замена диффузионного насоса на безмасляный высоковакуумный насос

Наиболее радиальным и вместе с тем эффективным способом оптимизации системы на базе диффузионного насоса является его замена на безмасляный высоковакуумный насос. В этом направлении возможны два основных варианта — турбомолекулярный и криогенный (криовакуумный) насосы. Магниторазрядный принцип откачки не рассматривается в силу его существенной специфичности и отсутствия среди его представителей насосов с высокой производительностью более 1000-1200 л/с. Однако, нужно отметить, что данный тип насосов активно используется в приложениях, где необходимо получать высокий и сверхвысокий вакуум (до 10^{-10} торр) и удерживать его длительное время (например, несколько месяцев) — ускорительно-накопительные системы, физика элементарных частиц и т. п.

Турбомолекулярный насос (ТМН) является, возможно, одним из лучших вариантов замены диффузионного насоса. Прежде всего его отличает возможность непрерывной работы в течение длительного времени при откачке больших потоков газа, аналогично диффузионному насосу. Современные ТМН с магнитным подвесом ротора обладают высокой надежностью и обеспечивают наработку уровня 100000 часов непрерывной работы. Еще одним их преимуществом является высокая степень автоматизации, позволяющая сильно снижать возможное влияние человеческой ошибки — различные блокировки не позволят эксплуатировать насос в недопустимых для него условиях. Устанавливать современные ТМН на вакуумной камере можно в любом положении — в отличие от диффузионного насоса здесь также нет ограничений. Среди

недостатков нужно отметить высокую чувствительность данного типа насосов к «прорывам атмосферы». Надо сказать, что производители постоянно ищут новые технологии в этом направлении и улучшают конструкции современных ТМН. Так, указывается, что современные ТМН могут выдерживать десятки и даже сотни посадок на резервные подшипники на полной скорости, однако, методики такого тестирования, как правило, не разглашаются. Другим ограничением использования ТМН в качестве замены диффузионного насоса является отсутствие моделей с Ду более 320 мм. Известны лишь единичные модели с Ду 400 и 500 мм, однако они построены на подшипниках с традиционной смазкой и их относительная эффективность невелика. Самым существенным ограничением использования ТМН является его стоимость. Это одно из самых дорогих решений, особенно в диапазоне Ду 200-320 мм. Однако, когда требуется насос с Ду до 100 мм включительно, альтернативы ТМН практически нет. Диаметр условного прохода в 160 мм является для ТМН своего рода «переломным», когда по стоимости и эффективности он примерно равен криовакуумному. Также необходимо отметить, что ТМН является основным средством откачки в приложениях, где нужно откачивать агрессивные или активные газы.

Криовакуумный насос обладает рядом преимуществ по отношению к ТМН с точки зрения замены диффузионного насоса. Как правило, его производительность выше, чем у ТМН с аналогичным Ду, он хорошо качает легкие газы, а по скорости откачки водяных паров существенно их превосходит. Так же, как и ТМН он может устанавливаться на вакуумной камере в любом положении и обладает высокой степенью автоматизации. Существенным преимуществом по отношению к ТМН является полная толерантность к «прорывам атмосферы» - никакой прорыв никогда не выведет данный насос из строя. Нарботка современных криовакуумных систем, к примеру, японских производителей, составляет до 100000 часов непрерывной работы, а последние технологические решения позволяют не менять адсорбер компрессора в течение всего срока эксплуатации. Данные насосы гораздо умеренней в цене, чем ТМН, особенно в области Ду от 160 мм. Единственным, пожалуй, существенным ограничением является их конечная емкость и, связанный с этим, циклический характер работы – после накопления некоторого количества откачанного газа им требуется регенерация. Надо сказать, что данное количество достаточно велико – крионасос может откачивать существенные потоки непрерывно в течение суток и более, а при их отсутствии – работать месяцами без необходимости регенерации. В приложениях, которые работают в циклическом режиме с периодической загрузкой/выгрузкой образцов или подложек, например, напылительные системы криовакуумные насосы являются оптимальным выбором и в настоящее время занимают лидирующие позиции. Безальтернативным вариантом крионасосы являются, если необходим безмасляный высоковакуумный насос с Ду больше, чем 320 мм, в приложениях, где нужно откачивать большие (единицы-десятки кубометров) вакуумные камеры, например, большие напылительные системы, аэрокосмические установки и т. п. Существуют крионасосы с Ду до 1200 мм и производительностью до 60000 л/с по азоту. Таким образом, в диапазоне Ду от 160 мм крионасос является, пожалуй, наиболее эффективной заменой диффузионного в большинстве приложений.

Модернизация откачной системы на базе диффузионного насоса с целью снижения обратного потока паров масла

Основным и, пожалуй, самым распространенным методом модернизации откачной системы с диффузионным насосом для снижения обратного потока масляных паров является установка ловушки на входе в насос.

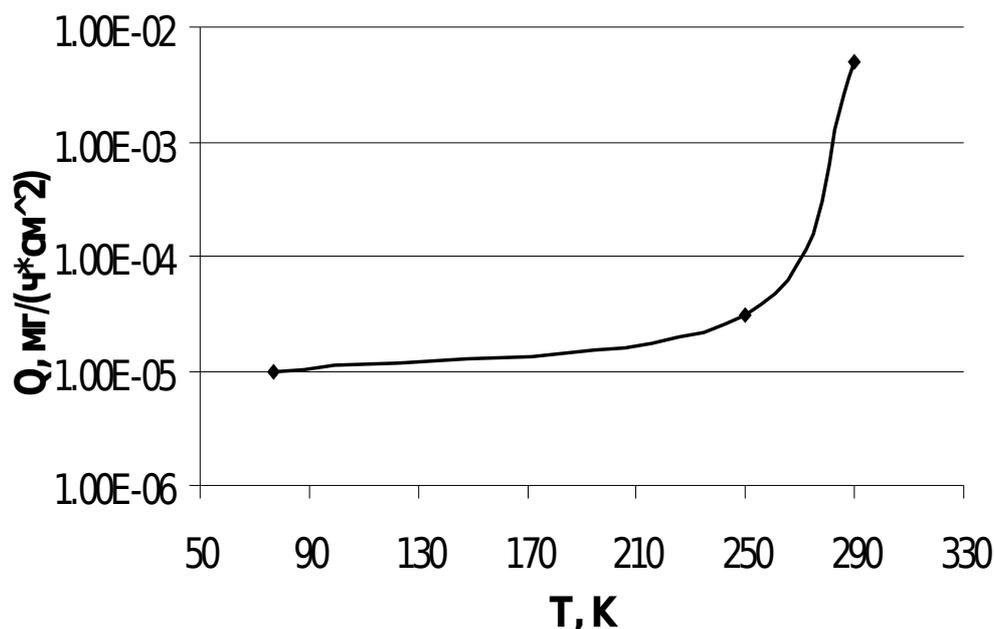
Как показано в [1], одним из ключевых параметров, влияющих на защитную способность ловушки оказывает температура ее панелей, которые служат для

конденсации масляных паров. Так, удельный обратный поток масляных паров из диффузионного насоса без ловушки составляет $1 \text{ мг}/(\text{ч}\cdot\text{см}^2)$.

Самым недорогим решением является ловушка, охлаждаемая проточной водой. Такая ловушка снижает обратный поток паров масла примерно в 100 раз, практически не требует обслуживания и проста в обращении и эксплуатации. Однако, как показывает практика ее эффективности недостаточно даже для самых нечувствительных к масляным парам приложений, таких как вакуумная металлургия. Поэтому, несмотря на широкое распространение, данный вариант нельзя назвать достаточной.

Также недорогим и весьма эффективным вариантом является ловушка, охлаждаемая жидким азотом. Простота конструкции, невысокая стоимость и снижение удельного обратного потока масляных паров на 5 порядков величины до $10^{-5} \text{ мг}/(\text{ч}\cdot\text{см}^2)$ (по данным [1], см. рис. 1) позволяют говорить о высокой эффективности и распространенности данного решения. Из недостатков следует отметить высокую стоимость владения и эксплуатации — необходимо наличие запаса жидкого азота и специального работника для обслуживания ловушки. В итоге, в процессе эксплуатации стоимость такой ловушки постоянно возрастает и, например, в течение года превосходит стоимость многих других решений. Такое решение может быть оправдано для приложений, где не ведется активная эксплуатация диффузионного насоса, например, в условиях лаборатории, но никак не в условиях реального производства.

Рис. 1. Зависимость обратного потока паров рабочей жидкости от температуры



Как видно из рис. 1 при увеличении температуры панелей ловушки до примерно 210-230 К (-40 — -60 С) ее эффективность практически не снижается. Поэтому активно стали развиваться автономные системы охлаждения на криогенных циклах, где в качестве криоагента используются специальные смеси.

Одним из таких решений являются высокопроизводительные системы охлаждения для криогенных ловушек до уровня 150-160 К (-120 — - 110 С). В качестве рабочей поверхности в таких системах используется длинная металлическая трубка в форме змеевидной спирали. Как правило, такие системы достаточно высокопроизводительные (холодопроизводительность около 2-3 кВт при 160 К) и

используются сразу в двух направлениях — криогенная ловушка внутри вакуумной камеры для откачки паров воды и других конденсируемых при 160 К веществ и система охлаждения проточной ловушки, установленной на входном фланце диффузионного насоса. Такая установка существенно увеличивает общую производительность откачной системы за счет резкого улучшения откачки водяных паров и является эффективным решением для предотвращения обратного потока паров масла в вакуумную камеру. Особенный эффект достигается при интеграции такой ловушки в откачную систему в приложениях, где необходимо быстро откачивать большие объемы — большие напылительные установки, например, для покрытия лопаток турбин электростанций. В таких приложениях интеграция подобной системы позволяет сокращать общее время откачки до 90%. В качестве основного ограничения нужно отметить достаточно высокую стоимость такого решения.

Более оптимальным представляется решение на базе не такой высокопроизводительной криогенной системы. В настоящее время есть решения, позволяющие эффективно модернизировать проточные водоохлаждаемые ловушки, заменив воду в них на смесевой криоагент, циркулирующий по замкнутому циклу. Такие рефрижераторы позволяют достигать температурного уровня также до -120 С (150 К), при этом их холодопроизводительность составляет сотни Вт. Этого достаточно для эффективного охлаждения панелей ловушки, защитная способность которой становится близка к ловушке, охлаждаемой жидким азотом. При этом, такая система полностью автоматизирована, проста в эксплуатации и не требует дополнительного обслуживания. Еще одним существенным преимуществом является ее относительно невысокая стоимость, позволяющая окупить такую систему в течение полугода по отношению к ловушке, охлаждаемой жидким азотом. Кроме того, такие системы имеют компактные размеры (занимаемая площадь около 0,2 м²) и низкий уровень шума, что позволяет их успешно использовать даже в условиях лабораторий.

Список литературы

1. Нестеров С.Б., Андросов А.В. Применение охлаждаемых ловушек для диффузионных насосов. Материалы XIII научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». Под редакцией доктора технических наук, профессора Д.В.Быкова. М.: МИЭМ. 2006. – с.62 – 66.