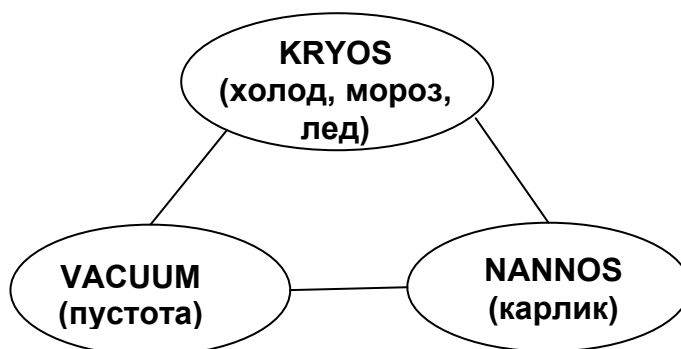


ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ, КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

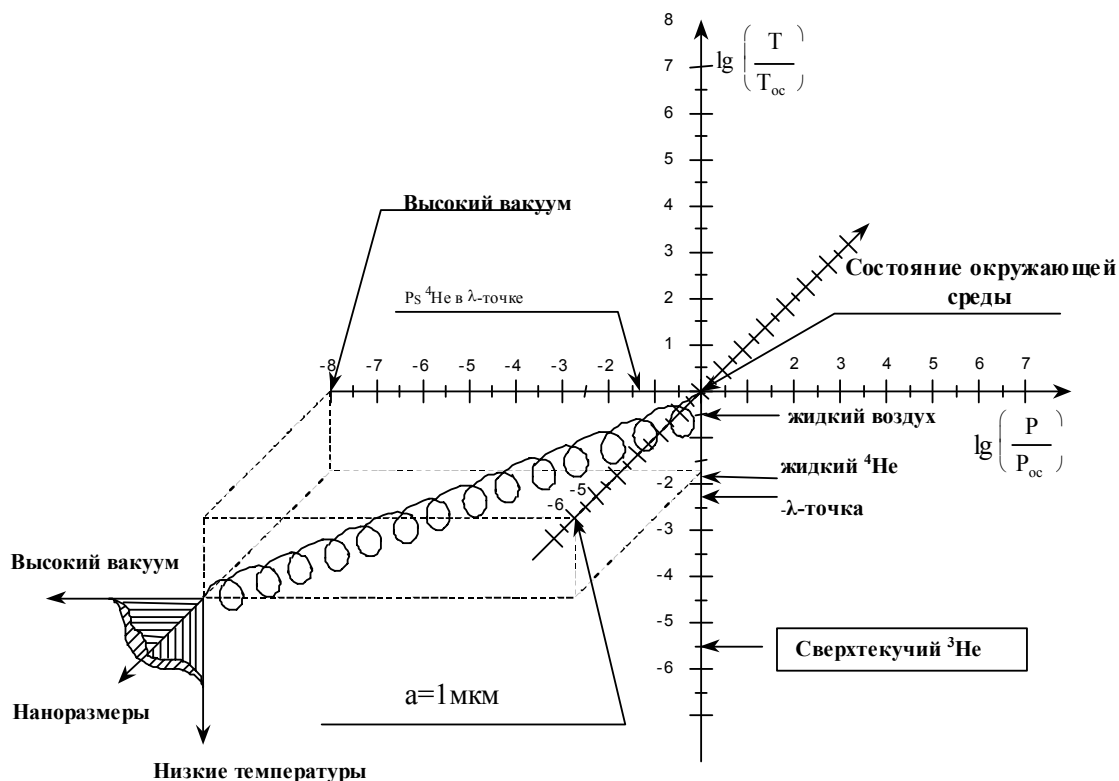
С.Б. Нестеров

ФГУП «Научно-исследовательский институт вакуумной техники
 им. С.А. Векшинского». Москва, Нагорный проезд, 7. E-mail: sbnesterov@niivt.ru

В работе показаны основные области использования вакуумной техники, криогенной техники и нанотехнологии.

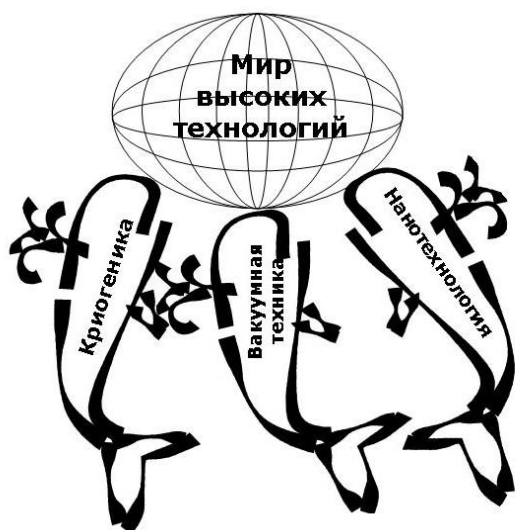


В трехмерных логарифмических координатах построены диапазоны применения криогенной техники, вакуумной техники и нанотехнологии.



Условное трехмерное пространство

Выполнен анализ современного рынка криогенных систем, систем создания и поддержания вакуума и наноиндустрии.



Рассмотрены примеры проектов, в которых одновременно используются элементы криогенной техники, вакуумной техники и нанотехнологии. К таковым можно отнести сверхвысоковакуумный низкотемпературный зондовый микроскоп, вакуумный туннельный диод, проект добычи ^3He на Луне, компрессор Кнудсена, нанокриогенику, производство углеродных наноматериалов и др.

Определены основные тенденции развития криогенной техники, вакуумной техники и нанотехнологии.

На основе анализа этих тенденций развития сделан вывод о том, что современный мир высоких технологий должен опираться на трех китов – криогенную технику, вакуумную технику и нанотехнологию.

ФГУП «Научно-исследовательский институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского» позиционируется сегодня как головное предприятие России в области вакуумной науки, техники и технологии и готов выступить в качестве базовой площадки для объединения предприятий, организаций, ученых и специалистов, занимающихся криогенной техникой, вакуумной техникой и нанотехнологией.

НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ ОАО «ВАКУУММАШ»

Е.Н. Капустин, А.С. Данилин

ОАО «Вакууммаш», Казань, ул. Тульская, 57. E-mail: kazan@vacma.ru

Открытое акционерное общество «Вакууммаш» является крупнейшим в России и странах содружества специализированным предприятием по разработке и производству вакуумного оборудования для различных отраслей промышленности, отметившим в 2003 году 60-летний юбилей.

ОАО «Вакууммаш» много внимания уделяет качеству, расширению номенклатуры, модернизации выпускаемой продукции. Высокий уровень выпускаемой техники подтверждается тем фактом, что более 40 % продукции экспортируется в страны ближнего и дальнего зарубежья.

В 2003 г. система менеджмента качества ОАО «Вакууммаш» сертифицирована фирмой «Интерсертифика ТЮФ», совместно с «ТЮФ Тюринген» (Германия) на соответствие стандарту ISO 9001:2001.

Пленарные доклады

В 1990-е годы в связи с резким падением спроса на вакуумную технику ОАО «Вакууммаш» освоил значительное количество непрофильной продукции: сельхозоборудования, электродвигателей, жидкостных центробежных насосов, шестеренчатых насосов и т.д. Поэтому разработкам новых видов вакуумного оборудования уделялось недостаточно внимания. В 2002 году руководством предприятия принято стратегическое решение об отказе от выпуска непрофильной продукции и переходе на выпуск исключительно вакуумной техники.

Однако требования к продукции, по сравнению с советским периодом, существенно изменились. В частности, востребованными оказались механические насосы, работающие на высоких входных давлениях. Кроме того, появление на рынке многочисленных представительств зарубежных фирм - производителей вакуумной техники потребовало повышения конкурентоспособности и модернизации хорошо известных насосов и освоения новых видов продукции. Поэтому за последнее время был проделан большой объём работ по модернизации и разработке новых видов вакуумной техники, краткий обзор которого мы и предлагаем Вашему вниманию.

1. Пластинчато-роторные вакуумные насосы

В конструкцию насосов были внесены достаточно серьёзные изменения, направленные на повышение надёжности, ресурса, конкурентоспособности путём замены материалов, комплектующих на более качественные, в основном на импортные, унификации узлов и деталей, снижении себестоимости изготовления. К сожалению, отечественная промышленность не смогла предложить качественные материалы и комплектующие, поэтому всё больше места в насосах занимают импортные детали. В качестве примера можно привести следующие нововведения:

- замена подшипников скольжения на подшипники качения на больших насосах, где они испытывают существенные нагрузки;
- применение в малых насосах, где подшипники скольжения были сохранены, импортных двухкомпонентных подшипников скольжения, имеющих гораздо более высокий ресурс;
- изготовление лопаток насоса из новых материалов фирмы «SGI», имеющих малый коэффициент теплового расширения, высокую прочность, износостойкость, позволившее, кроме того, достичь предельного остаточного давления $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.;
- за счёт изменения конструкции выхлопного канала удалось в 3 раза (в насосе 2НВР-5ДМ) снизить вылет масла в атмосферу;
- для полной очистки выхлопа от паров масла разработан и выпускается внешний фильтр с фильтрующими элементами фирмы "Man" (Германия), который обеспечивает степень очистки выхлопа от паров масла более 99 %.

Однако проблемы с применением насосов типа НВР во многих технологических процессах вызваны не только недостатками конструкции, а использованием их в таких режимах, для работы в которых они не были предназначены.

В первую очередь это касается работы на высоких входных давлениях (более 10 мм рт. ст.) в течение длительного времени.

Эту проблему невозможно было решить в общепринятой схеме двухступенчатого пластинчато-роторного насоса.

Поэтому были разработаны трехпластинчатые насосы НВРТ, имеющие принципиально другую систему охлаждения масла и рабочего цилиндра и способные работать при высоких давлениях очень продолжительное время. В результате разделения маслоотделителя и рабочего цилиндра насоса, именно цилиндр, а не корпус насоса, постоянно обдувается воздухом от крыльчатки вентилятора, что позволяет отводить большее количество тепла. Кроме того, масло, впрыскиваемое из маслоотделителя в цилиндр, также имеет более низкую температуру. Первым в этом году будет освоен насос с быстротой действия 16 л/с ($60 \text{ м}^3/\text{ч}$) НВРТ - 60. В течение 2007 года ОАО «Вакууммаш» планирует освоить насос НВРТ - 15 с быстротой действия $15 \text{ м}^3/\text{ч}$.

2. Золотниковые (плунжерные) вакуумные насосы

Вслед за насосом АВПл-20Д, разработан и изготовлен опытный образец насоса АВПл-125Д, стендовые испытания которого должны завершиться в 2007 году.

Особое внимание следует уделить агрегату АВПлС-125Д, который разработан на базе насоса АВПл-125Д и предназначен для откачки газов, содержащих делящиеся нуклиды и изотопы радиоактивных элементов. Конструкция насоса позволяет откачивать газы, содержание урана в которых превышает допустимые значения для обычных насосов типа АВЗ в 18 раз.

3. Водокольцевые вакуумные насосы

По модернизации насосов типа ВВН был проведён очень большой объём работ. Основные усилия были направлены на унификацию узлов и деталей, снижение материалоёмкости насосов и трудоемкости их изготовления, увеличению диапазона работы, повышению надежности насосов. В результате проведённых работ удалось существенно снизить массу насосов, на 10-15 % увеличить их производительность. Благодаря внедрению технологий динамической балансировки роторов и изготовлению колёс насосов в сварном варианте из стали (взамен литья из чугуна) удалось значительно снизить вибрацию насосов и, как следствие, повысить срок эксплуатации подшипников и ресурс всего насоса в целом. Освоены насосы с нержавеющей проточной частью и в полностью нержавеющей исполнении (2ВВН1-3МН и 2ВВН1-6МН).

Ещё одно направление развития водокольцевых насосов - это насосы с двойными торцевыми уплотнениями, которые предназначены для эксплуатации на взрыво- и пожароопасных производствах и откачки взрыво-, пожароопасных и токсичных газов.

Разработка и изготовление этих водокольцевых насосов ведется в соответствии с ТУ 3648-039-00218526-2004, утвержденных Госгортехнадзором РФ и на основании Разрешения № РРС 00-19741 Госгортехнадзора РФ от 21.02.06.

4. Вакуумные системы и агрегаты, откачные посты

ОАО «Вакууммаш» стал уделять большое внимание разработке вакуумных систем, откачных постов и т.п. по требованиям заказчиков, для индивидуальных условий работы. Главным принципом этих разработок стало решение любых проблем клиентов, связанных с созданием и поддержанием вакуума, подбор оптимальных средств откачки и разработка готовых решений «под ключ».

Ниже приведены лишь несколько вариантов таких систем, разработанных и реализованных в последнее время:

а) откачной пост ПВО-100М на базе агрегата АВДМ-100 имеет современную систему управления с полностью автоматизированным пуском и необходимой защитой. Для использования поста заказчику требуется только подвод питания и воды;

б) вакуумная система на базе насосов 2ВВН2-50 с ресивером;

в) вакуумная установка УВ-6, предназначенная для тепловых испытаний приборов в условиях космоса.

Установка представляет собой миницех. В этой установке реализован оригинальный подход загрузки-выгрузки изделий. Она оснащена высоковакуумной откачной системой на базе диффузионных и механических насосов производства ОАО "Вакууммаш". Система управления выполнена на базе персональной ЭВМ со следующими функциями: силовых сигналов до 100, входных контрольных сигналов до 148. Анализ аналоговых сигналов по необходимости до 48. Поддерживается многопользовательская информационная система.

5. Диффузионные паромасляные насосы

Технический уровень диффузионных насосов НД на сегодняшний день соответствует лучшим мировым образцам, а зачастую превосходит их, что подтверждается тем фактом, что более 90 % этих насосов экспортируется в дальнее зарубежье. Однако и в этой области мы не стоим на месте и проводим большой объем опытно-конструкторских работ, направленных, в первую очередь, на расширение диапазона работы насосов и увеличение скорости их действия в диапазоне давлений $10^{-2} \dots 10^{-3}$ мм рт. ст. Необходимость таких работ вызвана появлением новых технологий нанесения специальных покрытий в вакууме, в связи с чем насосы должны откачивать большие газовые потоки и работать практически в бустерном режиме, сохраняя при этом способность достигать очень низкого остаточного давления.

После завершения опытно-конструкторских работ планируется заменить новым насосом оба типоразмерных ряда диффузионных вакуумных насосов (НД и НВДМ), выпускаемых серийно в настоящее время.

6. Вакуумная арматура

Ассортимент вакуумной арматуры в ближайшее время ожидает самое существенное обновление среди всех классов вакуумного оборудования, выпускаемого ОАО «Вакууммаш». Разработана техническая документация на вакуум-

ные клапаны с пневматическим приводом типа КВП с условными проходами 25, 40, 63, 100 мм., планируется расширение типоразмерного ряда уже выпускаемых клапанов КВР, КВЭ, КВМ и выпуск клапанов (кроме имеющихся 25, 63 и 100 мм) с условными проходами 10, 16, 40 мм. Разработан новый вариант устройства управления электромагнитным клапаном (УУК), который реализован на современной элементной базе и имеет повышенный ресурс.

Разработана техническая документация на затворы серии 23ВЭ с пневмоприводом. Первые затворы уже изготовлены и эксплуатируются у заказчиков.

Готовится к выпуску в первой половине 2007 года клапан 2КВМ-100, унифицированный с клапанами типа КВР и КВЭ. Традиционно клапан 2КВМ-100 сохраняет работоспособность в вертикальном положении и обеспечивает возможность открывания заслонки при перепаде давления 760 мм рт.ст. с любой стороны заслонки.

Разработана и готовится к серийному выпуску в 2007 году новая серия вакуумных плоских проходных затворов типа 3ВПл с условными проходами 250, 400, 500 и 630 мм. С целью повышения надежности затвора 3ВПл разработан новый механизм закрывания и фиксации заслонки затвора.

Открывание и закрывание затвора производится электродвигателем с пульта управления или пневмоприводом. Затворы сохраняют работоспособность в горизонтальном и вертикальном положении, а главной особенностью новой серии является существенное уменьшение «строительной высоты» (расстояния между входным и выходным фланцами), что соответствует тенденциям развития вакуумной арматуры во всём мире.

Затвор 3ВПлЭ с условным проходом 630 мм прошел успешно испытания и предлагается заказчикам.

Взамен устаревшего и излишне сложного клапана напускного КН-2,5 разработан и готовится к выпуску клапан напускной 3КН-2,5 НО и НЗ, унифицированный по многим элементам с клапаном КВМ-25.

Готовится к выпуску серия клапанов ручных прямопроходных с условными проходами Ду 63, 100 мм. К достоинствам этих клапанов относится высокая проводимость, удобство монтажа, надежность механизма.

Присоединительные размеры разрабатываемой арматуры соответствуют международным стандартам ISO.

7. Пароэжекторные вакуумные насосы

Разработка и изготовление пароэжекторных насосов на ОАО «Вакууммаш» ведется в соответствии с ОСТ 26-291-94 и ТУ 3648-028-00218526-2002, утвержденных Госгортехнадзором РФ и на основании Разрешения № РРС 00-19741 Госгортехнадзора РФ от 21.02.06 на применение пароэжекторных насосов типа НВЭ на опасных производствах.

Пароэжекторные насосы - один из самых консервативных видов вакуумной техники, однако и в этой области в последнее время сделано немало. Основные усилия были направлены на оптимизацию массогабаритных характеристик,

Пленарные доклады

что, с учётом того, что вес насоса может достигать нескольких десятков тонн, позволяет получать Заказчику вполне ощутимую экономию.

Другое, не менее важное, направление работ - снижение расхода рабочего тела (пара) и охлаждающей воды, что с учётом постоянного роста цен на энергоносители приобретает с каждым годом всё большее значение.

Очень большой объём работ выполнен по разработке различных компоновок пароежекторных систем, которая также преследует цель оптимизации массогабаритных и откачных характеристик насосов. Пароежекторные системы могут иметь самую различную конфигурацию в зависимости от условий работы и требований Заказчика.

Пароежекторные насосы имеют огромное количество вариантов исполнений и могут быть изготовлены в углеродистом, нержавеющей, кислотостойком исполнениях, с конденсаторами смешения или конденсаторами поверхностного типа, с компенсаторами или без них.

Кроме того, Заказчику, оказывается комплекс дополнительных услуг, позволяющих найти оптимальное решение в каждом конкретном случае, в том числе:

- пуско-наладочные работы по вводу в действие пароежекторных насосов;
- выбор оптимальной вакуумной системы, построенной на различных откачных средствах для обеспечения заданных параметров технологического процесса;
- восстановление работоспособности отечественных и импортных пароежекторных насосов, утративших паспортные характеристики;
- оснащение пароежекторных насосов системой автоматики;
- послегарантийное сервисное обслуживание пароежекторных насосов с восстановлением паспортных характеристик;
- привязка пароежекторных насосов к существующему оборудованию;
- перевод пароежекторных насосов с летнего на зимний режим работы с целью экономии энергоресурсов;
- изготовление пароежекторных насосов с барометрическими и поверхностными конденсаторами, в том числе покупными, с возможной установкой компенсаторов;
- оснащение существующих пароежекторных насосов пусковыми эжекторами для быстрого вывода насоса на рабочий режим;
- изготовление пароежекторных насосов для откачки воды;
- изготовление водоструйных насосов;
- изготовление пароежекторных компрессоров;
- агрегатирование пароежекторных насосов с водокольцевыми насосами для экономии энергоресурсов.

В завершение хочется отметить, что здесь были приведены лишь основные разработки, выполненные Научно-техническим центром ОАО «Вакууммаш» в последнее время, так как перечислить все незначительные усовершенствования и изменения конструкции выпускаемого оборудования просто не пред-

ставляется возможным. Все эти усилия направлены на повышение технического уровня выпускаемого оборудования, повышение его ресурса, надёжности, других эксплуатационных и потребительских характеристик и максимально полного удовлетворения пожеланий Заказчиков.

О СОЗДАНИИ И ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ БЕЗМАСЛЯНЫХ ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

К.Е. Демихов, Н.К. Никулин

МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, 2-ая Бауманская, 5. E-mail: nkn@bmstu.ru

Практически все технологические процессы, требующие обеспечение высоковакуумных условий, отличаются высокой чувствительностью к концентрации частиц определенных газов. В процессах электронно- и ионно-лучевой обработки, пленочных покрытий, электронно-лучевой и лазерной сварки, травления поверхностей, выращивания кристаллов и т.д. среда оказывает огромное влияние на качество изделия и возможность проведения самого технологического процесса.

Именно эти проблемы обеспечения и поддержания заданного состава среды в необходимом диапазоне давлений, обеспечение «безмасляности» откачки, постоянно стоят перед вакуумной техникой.

Обеспечение «безмасляности» создаваемого вакуума, в зависимости от требований к составу остаточной среды, возможно при использовании практически всех высоковакуумных средств откачки: высоковакуумных диффузионных, криосорбционных, электрофизических и высоковакуумных механических насосов. Вакуумные системы, использующие тот или иной тип насосов, имеют свои преимущества и свои недостатки.

Поглощающие насосы (криосорбционные и электрофизические) обеспечивают «идеально чистый» вакуум, но этим насосам присуща селективность откачки по различным газам (особенно низкая быстрота действия по таким газам, как гелий и водород). Кроме того, все эти средства откачки удерживают газ внутри себя и требуют регулярной регенерации.

Механические высоковакуумные насосы, турбомолекулярные вакуумные насосы и их комбинации с другими типами механических насосов, способны обеспечивать «безмасляный» вакуум в широком диапазоне давлений от 10^{-1} до 10^{-8} Па и ниже, обеспечивая быстроту действия от нескольких л/с до десятков тысяч л/с. Кроме того, эти насосы имеют приблизительно одинаковую быстроту действия по действия по всем газам, изменяясь в зависимости от проводимости высоковакуумного трубопровода.

Создание нового типа турбомолекулярных насосов с магнитными и газовыми опорами, комбинация проточных частей с молекулярными и вихревыми ступенями позволяют отделить проточную часть машины от опор качения, т.е. устраняется возможность загрязнения откачиваемого объёма парами смазки. Применение нового типа проточной части (молекулярновязкостных ступеней)

позволяет создавать комбинированные турбомолекулярные насосы без использования форвакуумной откачки. В данной работе рассматривается совместная работа всех проточных частей комбинированных турбомолекулярных насосов и перспективы их развития.

Вакуумные системы, использующие тот или турбомолекулярного высоковакуумного насоса (ТМН) проводится по нескольким направлениям.

Оптимизация проточной части ТМН позволяет увеличить быстроту действия и отношение давлений, обеспечиваемое насосом, сократить габаритные размеры и уменьшить металлоёмкость. Эти цели достигаются существующими методами расчета, которые дают возможность с достаточной точностью рассчитать оптимальную проточную часть ТМН и определить его откачную характеристику.

Не менее важным при эксплуатации ТМН является срок его службы и другие характеристики, определяющие его надёжность. Для увеличения надёжности насоса проводится достаточно большое количество исследований по прогнозированию работоспособности ТМН, разработке новых опор вращения и модернизации существующих. Применение газовых и магнитных подшипников позволяет практически полностью снять ограничения ресурса работы опор вращения. Совершенствование опор вращения на традиционных шарикоподшипниках и использование керамических подшипников позволило увеличить их реальный срок службы до 10-12 тысяч часов.

В то же время ТМН, изготовленные по традиционным конструктивным схемам с форвакуумной откачкой, оставляют возможность загрязнения среды откачиваемого объёма следами углеводородов при использовании в качестве форвакуумных маслозаполненных механических насосов. Полностью проблема обеспечения «безмасляной» откачки снимается лишь в случае, если подшипниковые опоры вынесены в область атмосферного давления и полностью отделены от проточной части ТМН. Такое конструктивное решение применено при создании комбинированного ТМН.

Комбинированные ТМН с молекулярными ступенями и винтовыми динамическими уплотнениями на одном валу позволяют вести откачку газа без дополнительного форвакуумного насоса, но высокая точность изготовления деталей (порядка 10 мкм) ограничивает широкое применение этих насосов.

В данной работе также рассматривается комбинированный ТМН (рис. 1), но в качестве второй низковакуумной ступени, вместо молекулярного насоса и динамических уплотнений, разработан новый безмасляный молекулярно вязкостный вакуумный насос (БМВВН). БМВВН (рис. 1) способен обеспечить быстроту действия от 10^{-1} до 10^2 л/с в диапазоне давлений от 10^5 до 10^{-3} Па и ниже при сравнительно больших радиальных и осевых зазорах между ротором и статором насоса.

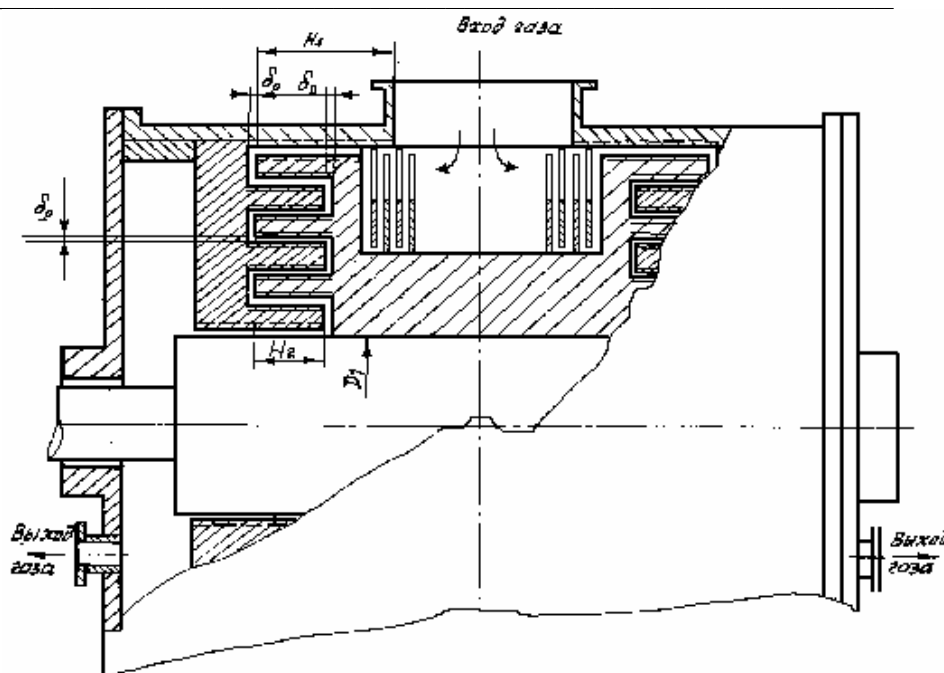


Рис. 1.

На одном валу насоса размещены проточные части ТМН и БМВВН. Совместная работа этих двух проточных частей обеспечивает откачку газа от атмосферных условий до рабочего давления, 10^{-7} Па и ниже. Выход проточной части БМВВН осуществляется в атмосферу, т.е. подшипниковые узлы могут конструироваться и эксплуатироваться в стандартных условиях, без дополнительных требований предъявляемых к вакуумному оборудованию. Кроме того, для обеспечения работы высоковакуумного насоса не требуется дополнительного форвакуумного насоса.

Как показали исследования при диаметре насоса 60 мм радиальный зазор между ротором и корпусом насоса может достигать 0,15 мм не ухудшая его откачной характеристики. Откачная характеристика комбинированного ТМН полностью идентична традиционным ТМН в области молекулярного режима течения газа. В этом диапазоне давлений расчёт проточной части ТМН комбинированного насоса может быть проведён на основании любого из известных методов [1]. Расчёт проточной части БМВВН проведён методами статистического моделирования. И расчёт их совместной работы представлен расчётом работы ТМН с последним рабочим колесом в виде проточной части БМВВН.

Разработанная модель расчёта БМВВН методами статистического моделирования дает возможность получить откачную характеристику во всем диапазоне изменения давлений всасывания и нагнетания при молекулярном режиме течения из уравнения

$$n_1 \cdot P = n_1 \cdot P_{1-2} - n_2 \cdot P_{2-1} \quad (1)$$

Пленарные доклады

где n_1 - концентрация частиц на входе в канал,
 n_2 - концентрация частиц на выходе из канала,
 P - вероятность перехода частицы через канал со стороны всасывания на нагнетание при разной концентрации частиц, $n_1 \neq n_2$ с учетом перехода частиц и со стороны входа на выход и со стороны выхода на вход,
 P_{1-2} - вероятность перехода частицы через канал со стороны всасывания на нагнетание,
 P_{2-1} - вероятность перехода частицы через канал со стороны нагнетания на всасывание.

Вероятности P_{1-2} и P_{2-1} вычисляется аналогично друг другу.

При давлениях всасывания, соответствующих переходной и вязкостной области течения газа быстрота действия комбинированного насоса снижается из-за относительно низкой эффективности рабочих колес ТМН в этих областях течения.

При работе БМВВН в условиях, близких к атмосферным, режим течения в его проточной части значительно отличается от молекулярного $K_n \ll 1$.

Величина R_e для всего диапазона течения газа от атмосферного давления 10^5 Па до $1 \div 10$ Па изменяется от $5 \cdot 10^4$ до 10 и течение газа может иметь и турбулентный и ламинарный характер.

При построении теоретической модели рабочего процесса в проточной части БМВВН были рассмотрены несколько известных подходов к описанию сходных течений газа в сложных геометрических структурах.

В данной работе учтены основные представления течения газа, соответствующие цилиндрическому течению Куэтта, и на базе основного уравнения Гедде для молекулярного насоса, работающего в вязкостном режиме течения газа составлены и расчетные зависимости для потока откачиваемого газа Q

$$Q = k' \cdot \Delta p \cdot z \cdot \int_F V_\ell \cdot b \cdot R_e^{a/\ell} \cdot dx \quad (2)$$

где k' - коэффициент, учитывающий влияние входа в канал и его геометрию;

Δp - перепад давления на канале;

z - число каналов;

F - площадь входа в статорный и роторный канал;

V_ℓ - составляющая скорости движения потока в направлении оси канала;

b - ширина канала;

R_e - число Рейнольдса, $R_e = \frac{\rho \cdot \bar{b} \cdot V_\ell'}{\eta}$;

ρ - плотность газа осредненная по длине канала;

\bar{b} - осредненная ширина канала;

V'_ℓ - результирующая скорость движения газа;

α - осредненный коэффициент по длине канала, зависящий от геометрии канала;

x - координата сечения канала в радиальном направлении.

Перепад давления определяется на основании уравнения Геде:

$$\Delta p = \frac{6 \cdot \eta \cdot V_\ell}{h^2} \cdot \left[\Delta \ell - \left(\frac{h}{g \cdot V_\ell} + \frac{g \cdot R \cdot T \cdot h}{3 \cdot M \cdot b \cdot \eta \cdot V_\ell^2} \right) \cdot \ln \frac{p_1 - \frac{2 \cdot g \cdot R \cdot T}{M \cdot b \cdot h \cdot V_\ell}}{p_2 - \frac{2 \cdot g \cdot R \cdot T}{M \cdot b \cdot h \cdot V_\ell}} \right], \quad (3)$$

где h - общая высота канала, $h = h_p + h_c$;

$\Delta \ell$ - длина канала, на которой определяется перепад давления;

g - коэффициент внешнего трения газа;

b - осредненная ширина канала;

M - молекулярная масса газа;

g - количество откачиваемого газа;

R - универсальная газовая постоянная;

T - температура газа.

При известном давлении на входе в канал p_2 или на его выходе p_1 вычисляется величина соответственно или p_1 , или p_2 ($\Delta p = p_1 - p_2$).

Это уравнение требует экспериментальной проверки коэффициента g .

Применительно к каналам молекулярного вакуумного насоса это уравнение удовлетворительно (с точностью до 6%) описывает течение газа в диапазоне $10^3 \dots 10^5$ Па.

В области давлений $1 \dots 10^3$ Па используется уравнение, полученное из аналогии течения в канале с течением Куэтта

$$\Delta p = \int_0^\ell C_D \cdot \frac{\rho \cdot U_\ell^2}{h} \cdot d\ell \quad (4)$$

где C_D - коэффициент трения газа с поверхностью, связан с коэффициентом “молекулярного трения” C_M

$$C_D = C_M \cdot (1 - G \cdot Kn), \quad (5)$$

G - безразмерный коэффициент, определяемый экспериментально;

Kn - число Кнудсена, $Kn = \lambda / h$,

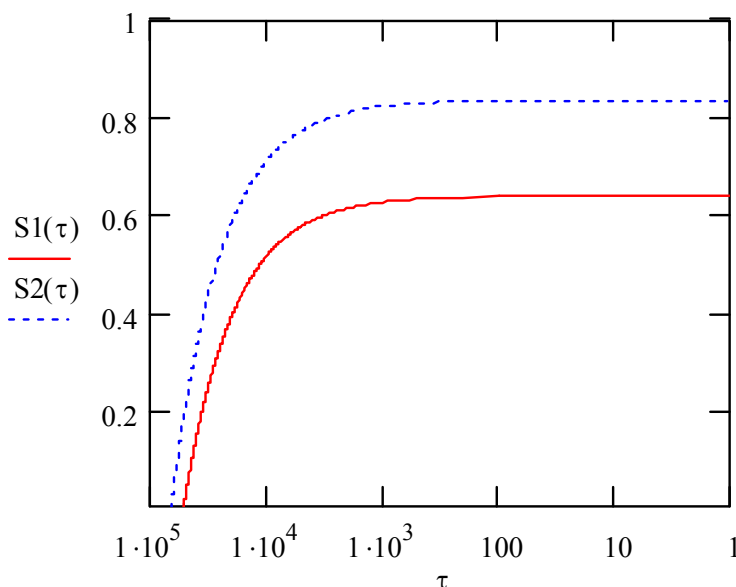
λ - средняя длина свободного пробега частицы

На рис. 2 представлена откачные характеристики комбинированных турбомолекулярных насосов ТМН-800 и ТМН-600 в диапазоне давлений от 10^{-6} Па до 10^5 Па при быстроте действия насоса $4.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Разработанная математическая модель работы комбинированного вакуумного насоса даёт возможность провести расчеты насоса и определить его основные откачные характеристики.

Разработка новых типов безмасляных опор ротора комбинированных насосов, обеспечивающих высокую точность вращения и увеличивающий ресурс работы насоса, позволяет продлить рабочую часть откачной характеристики комбинированного ТМН с молекулярными ступенями в область больших давлений и использовать в качестве безмасляных форвакуумных насосов – мембранные вакуумные насосы.

Расчет откачной характеристики комбинированного ТМН, работающего совместно с форвакуумным насосом объемного типа (пластинчато-роторные, мембранные и т.п.) можно проводить аналогично расчету ТМН, предполагая в качестве последней ступени форвакуумный насос. Теоретическая откачная ха-



рактеристика объемной машины имеет такой же вид, как и откачная характеристика рабочего колеса ТМН.

$$S = A(\tau_{\max} - \tau), \quad (6)$$

где S – быстрота действия насоса

A – константа, учитывающая максимальную быстроту действия насоса

τ_{\max} – максимальное отношение давлений создаваемое насосом

τ – текущее отношение давлений

В силу разных режимов течения в проточной части насоса расчет откачной характеристики системы для области молекулярного режима течения проводится по каждому из отдельных газов

$$\tau_i = \tau_{\max_i} - \frac{S_i}{S_{\max_i}} (\tau_{\max_i} - 1), \quad (7)$$

где $i=1 \dots k$, число газов в смеси,

и суммарная величина давления на всасывании насоса определяется как

$$p = \sum_{i=1}^n p_i$$

где p_i – парциальное давление i -го газа,

S_i – быстрота действия насоса по i -му газу.

Общий поток откачиваемого газа:

$$Q = \sum_{i=1}^n p_i S_i$$

При переходе к не молекулярному режиму течения быстрота действия определяется по суммарному давлению.

На входе в ступени, работающих при вязкостном и переходном режимах течения газа, давление определяется как

где τ определяют из соотношения (для τ) при $S = \frac{Q}{p}$.

Таким образом, при постоянном откачиваемом потоке Q , суммарная быстрота действия насоса $S = \frac{Q}{\sum_{i=1}^n p_i}$;

а максимальное отношение давлений

$$\tau_{\max} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_{\max_i}}} \cdot \tau_{\max_0}, \text{ где } \tau_{\max_0} = \prod_{j=n} \tau_{\max_j}$$

N – число ступеней насоса, работающих в переходном и вязкостном режиме течения, включая форвакуумный насос объемного действия

τ_{\max_j} – максимальное отношение давлений ступеней в переходном или вязкостном режиме течения газа.

Т.о. при постоянном давлении на выходе насоса (атмосферное давление), можно определить давление всасывания $p = \frac{p_a}{\tau_{\max}}$, при отсутствии потока откачиваемого газа. $Q=0$.

И по двум основным откачным параметрам S_{\max} насоса и τ_{\max} , можно рассчитать откачную характеристику всего комбинированного вакуумного насоса.

Литература

1. Справочник «Вакуумная техника» под ред. Е.С.Фролова, В.Е.Минайчева.,1994
2. Вихревые компрессоры, И.М. Виршубский, Ф.С. Рекстин, А.Я. Шквар.,1988

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ НАСОСОВ

Н.А. Ахмеджанов, Ф.Д. Путиловский

ОАО «Вакууммаш», Казань, ул. Тульская, 57. E-mail: kazan@vacma.ru

Диффузионные насосы, история развития которых перешагнула столетний рубеж, и сегодня являются одним из распространенных средств получения высокого вакуума.

Этому, безусловно, способствуют их основные достоинства:

- простота и надежность конструкции;
- возможность обеспечения больших быстрот действия;
- возможность откачки различных газов;
- простота эксплуатации.

Больше полувека диффузионные насосы в России выпускает предприятие, носящее сегодня имя ОАО "Вакууммаш".

Первые модели промышленных образцов насосов, разработанные в НИИ им. С.А. Векшинского, составляли типоразмерный ряд из пяти насосов, вошедший в историю вакуумной техники под названием диффузионные насосы единой серии.

Насосы обеспечивали быстроты действия от 100 до 8000 литров в секунду в диапазоне давлений от $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. до $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. и предельное остаточное давление $(2 \div 4) \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. Наибольшее выпускное давление не ниже 100 мкм рт.ст.

Насосы предназначались, в основном для нужд электронной техники.

Конструктивная схема насоса модели Н-5Т, входящего в этот ряд, приведена на рисунке 1.

Конструктивные решения, положенные в основу разработки насосов, аккумулировали результаты исследований в НИИ им. С.А.Векшинского физиче-

ских процессов, происходящих в насосе. Насосы соответствовали мировому техническому уровню.

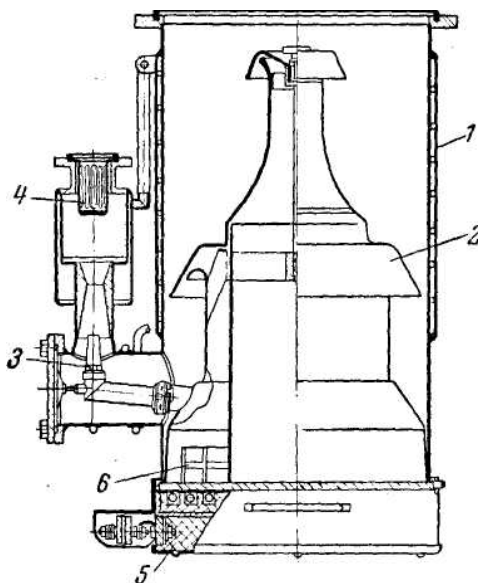


Рис. 1. Трехступенчатый паромасляный высоковакуумный насос Н-5Т.

1- корпус; 2 - паропровод; 3 - эжекторная ступень; 4 - ловушка для паров масла; 5- электронагреватель; 6 - лабиринтные кольца.

Непрерывное совершенствование известных и появление новых вакуумных технологических процессов требовало повышения основных вакуумных характеристик насосов и, в первую очередь, расширения диапазона входных давлений. Наибольшее входное давление насосов единой серии равнялось $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. ($1,33 \cdot 10^{-2}$ Па).

Это, во-первых, суживало область применения насосов и, во-вторых, усложняло систему вакууммирования, т.к. для расширения ее диапазона рабочих давлений требовалось применять вспомогательные (бустерные) насосы.

Исследования взаимодействия струи рабочего пара с корпусом насоса, процесса фракционирования, работы эжекторной ступени позволили разработать ряд насосов НВДМ, с существенно улучшенными характеристиками, которые приведены в таблице 1.

За счет повышения наибольшего входного давления до $5 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. и быстроты действия до 16 000 л/с понизилось предельное остаточное давление до $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст., резко расширилась область применения насосов. Стало возможным применять их в системах вакуумной сушки и плавки, вакуумных печах, пропитывающих установках.

Для многих технологических процессов стало возможным применять насосы без промежуточного бустерного насоса, что упрощает систему вакууммирования.

Ряд современных технологических процессов требует повышения наибольшего входного давления насосов до $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. при сохранении предельного остаточного давления, равного $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст.

Очередным шагом на пути совершенствования диффузионных насосов был разработан типоразмерный ряд насосов НД, имеющий целую гамму принципиально новых конструктивных решений в системе парообразования, конденсации пара на стенках корпуса и схеме паропровода.

Таблица 1. Технические характеристики насосов НВДМ

Наименование параметра	Значение для насоса, типа				
	НВДМ-100	НВДМ-160	НВДМ-250	НВДМ-400	НВДМ-630
Быстрота действия в диапазоне рабочих давлений, л/с: от $6,6 \cdot 10^{-4}$ до $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па (от $5 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.) от $6,6 \cdot 10^{-4}$ до $6,6 \cdot 10^{-2}$ Па (от $5 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.),	340	700	2350	- 5900	- 16250
Предельное остаточное давление при работе на масле ВМ-1С, Па (мм рт.ст.)	$6,6 \cdot 10^{-5}$ ($5 \cdot 10^{-7}$)	$6,6 \cdot 10^{-5}$ ($5 \cdot 10^{-7}$)	$6,6 \cdot 10^{-5}$ ($5 \cdot 10^{-7}$)	$6,6 \cdot 10^{-5}$ ($5 \cdot 10^{-7}$)	$6,6 \cdot 10^{-5}$ ($5 \cdot 10^{-7}$)
Наибольшее выпускное давление, Па (мм рт.ст.)	35 (0,263)	33,3 (0,25)	33,3 (0,25)	33,3 (0,25)	33,3 (0,25)
Обратный поток паров рабочей жидкости, мг/мин·см ²	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Потребляемая мощность, кВт	0,5	0,8	2	4	9

Характеристики насосов этого ряда приведены в таблице 2.

Таблица 2. Технические характеристики насосов НД.

Наименование параметра	Значение для насоса, типа					
	НД-250	НД-400	НД-500	НД-630	НД-800	НД-1000
Быстрота действия, л/с, при давлении: $5 \cdot 10^{-2}$ Па ($3,75 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.) $1 \cdot 10^{-1}$ Па ($7,5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.) 1 Па ($7,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.)	2700	7200	10800	18000	27000	45000
	1500	4000	6000	10000	15000	23000
	225	600	900	1500	2250	3500
Предельное остаточное давление при работе на масле ВМ-1С, Па (мм рт.ст.)	$3 \cdot 10^{-5}$ ($2,25 \cdot 10^{-7}$)	$3 \cdot 10^{-5}$ ($2,25 \cdot 10^{-7}$)	$3 \cdot 10^{-5}$ ($2,25 \cdot 10^{-7}$)	$3 \cdot 10^{-5}$ ($2,25 \cdot 10^{-7}$)	$3 \cdot 10^{-5}$ ($2,25 \cdot 10^{-7}$)	$3 \cdot 10^{-5}$ ($2,25 \cdot 10^{-7}$)
Наибольшее выпускное давление, Па (мм рт.ст.)	60 (0,45)	60 (0,45)	60 (0,45)	60 (0,45)	60 (0,45)	60 (0,45)
Обратный поток паров рабочей жидкости, мг/мин·см ²	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Потребляемая мощность, кВт	2,4	4,8	7,2	12	18	24

Максимальная быстрота действия насосов в ряду - 45 000 л/с.

Повышение наибольшего выпускного давления до 0,45 мм рт.ст. позволяет уменьшать размеры форвакуумного насоса, по сравнению с насосами ряда НВДМ.

Насосы способны работать при входном давлении $7,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. Быстрота действия насосов сохраняется постоянной до давления $3,75 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.

Это условие ограничивает их использование в ряде технологических процессов.



Рис. 2. Насос НД-630Э

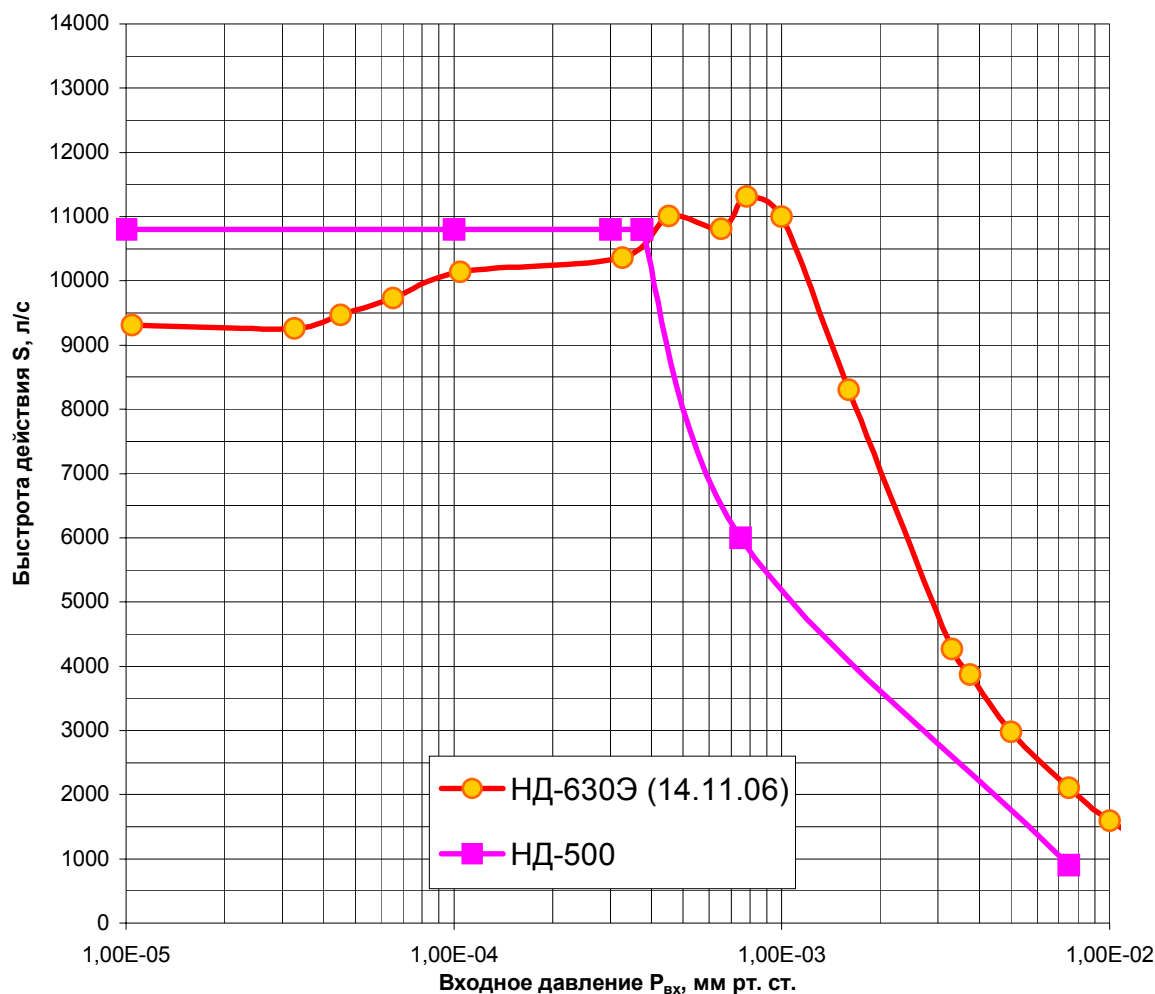


Рис. 3. Быстроты действия насосов НД-500 и НД-630Э

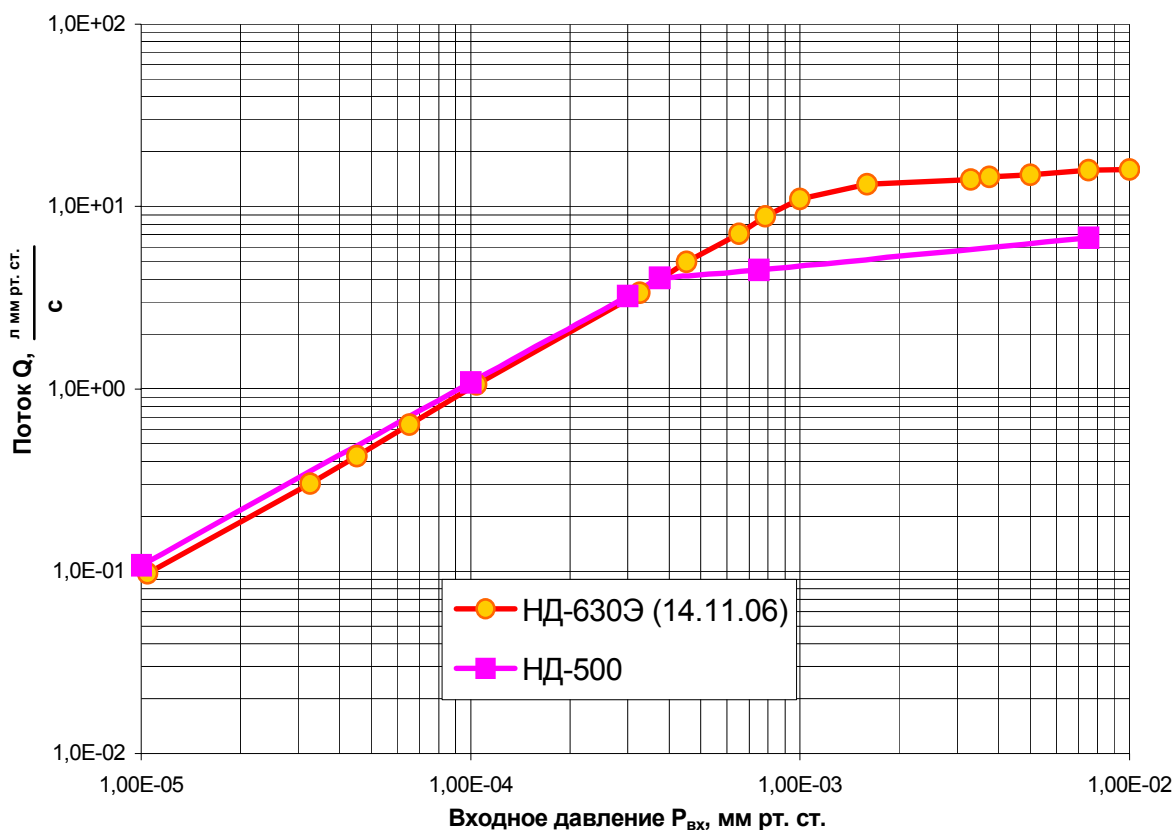


Рис. 4. Откачиваемый поток насосов НД-500 и НД-630Э

С целью расширения областей возможного применения диффузионных насосов специалисты ОАО "Вакууммаш" приступили к разработке нового типоразмерного ряда диффузионных насосов с расширенным диапазоном входных давлений. Базовый (пилотный) представитель этого ряда насосов прошел этапы доводки и изготовления опытной партии. ОАО "Вакууммаш" может принимать заказы на насос от потребителя.

Фото насоса приведено на рисунке 2.

Новый насос обладает рядом преимуществ, а именно:

1. Насос сохраняет постоянное значение быстроты действия в диапазоне входных давлений от $5 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.

2. Насос в диапазоне входных давлений от $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. до $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. обеспечивает откачку потоков газа от 10 л · мм рт.ст./с до 15 л · мм рт.ст./с соответственно.

3. Насос при любом входном давлении от $5 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. может длительное время работать, сохраняя свои характеристики.

Основные характеристики насоса – зависимости быстроты действия и потока откачиваемого газа от входного давления приведены графиками на рисунках 3 и 4. Так же для сравнения даны основные характеристики насоса НД-500. Графики показывают явное преимущество насоса НД-630Э в зоне входных давлений от $4 \cdot 10^{-4}$ до $7,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Пленарные доклады

Указанные преимущества побудили ОАО "Вакууммаш" приступить к разработке системы вакууммирования, которая способна обеспечивать сокращенное время предварительной откачки вакуумной камеры. Такая система обеспечивает непрерывное протекание характеристики от атмосферного давления до $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.

В состав системы входят: необходимая вакуумная арматура, ловушки, вакуумные датчики, форвакуумный трубопровод, входной патрубок.

В зависимости от требований заказчика она комплектуется затвором Ду 400 или Ду 630 и соответствующими водяными ловушками.

Номенклатура вакуумного оборудования, выпускаемого ОАО "Вакууммаш", позволяет осуществлять комплектную поставку вакуумной системы или, другими словами, "под ключ".

**ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ
СОВРЕМЕННОЙ ВАКУУММЕТРИИ**

В.В. Кузьмин

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. E-mail: ksenkuz@mail.ru*

Развитие промышленности и научных исследований привело в последние годы к существенному возрастанию роли вакуумных измерений и трансформации соответствующих контрольно-измерительных средств – вакуумметров. Как известно, эти приборы по принципу действия делятся, в основном, на следующие виды:

- деформационные,
- тепловые (теплоэлектрические),
- ионизационные,
- магниторазрядные.

Вклад вакуумметров данных видов в общий парк используемых в Российской Федерации (и отчасти в странах СНГ) средств измерений вакуума выглядит примерно следующим образом:

- деформационные вакуумметры – 5 %,
- тепловые вакуумметры – 35 %,
- ионизационные вакуумметры – 25 %,
- магниторазрядные вакуумметры – 30 %.

Доля приборов зарубежного производства – приблизительно 5 % и продолжает расти. Кроме того, наблюдаются постепенное уменьшение доли ионизационных вакуумметров и определенное увеличение доли деформационных вакуумметров.

Основными направлениями развития вакуумметрической аппаратуры являются:

- миниатюризация всех составных частей вакуумметров,

Пленарные доклады

- расширение номенклатуры и конструктивное усовершенствование комбинированных

вакуумметров и комбинированных преобразователей давления,

- разработка и внедрение новых форм вакуумметрических приборов – т.н. вторичных электронных устройств, сопрягаемых с первичными преобразователями и обеспечивающих выработку измерительного сигнала только в цифровом виде без непосредственного отображения на выходном показывающем приборе.

Рассмотрим первое из перечисленных направлений – миниатюризацию первичных преобразователей давления (датчиков) и измерительных блоков, осуществляющих электропитание преобразователей и вывод их сигналов на выходной прибор. Работы в этом направлении идут, собственно, уже достаточно давно. Например, еще в чувствительном элементе известного ионизационного преобразователя ПМИ-10-2 система электродов имела очень незначительные размеры, всего несколько миллиметров.

Существенным достижением здесь стало введение планарных чувствительных элементов, чаще всего пленочного вида. СКТБ твердотельной электроники (г. Кишинев) разработало гамму термопарных преобразователей, в которых батарея термопар и нагреватель сформированы путем вакуумного напыления на тонкой диэлектрической поверхности. Толщина напыленных слоев составляет примерно 0,8 мкм. Батарея термопар составлена ветвями из сплава висмута и сурьмы, расположенными радиально между окружностями диаметром 9 и 14,5 мм. Рабочий диапазон соответствующих датчиков типов ПДТ-13 и ПДТ-14 составляет от 10^{-3} до 10^3 Па. Существуют и другие конструктивные виды миниатюрных термопарных чувствительных элементов.

В части ионизационных вакуумметров стремление к миниатюризации чувствительных элементов реализуется не только посредством введения плоских электродов, как, например, в преобразователе ПМИ-10-2, но и с помощью планарных источников электронов, например, в виде *p-n* перехода или холодного катода другой структуры. Это связано с тем, что само наличие накаливаемого катода требует определенного пространства. Исследования в последнем направлении пока не привели к созданию промышленного вакуумметра с линейной характеристикой, но все же дают возможность измерения давлений в области от 10^{-4} до 1 Па.

Касаясь магниторазрядных вакуумметров, отметим, что само наличие магнита всегда было некоторым препятствием для миниатюризации преобразователей. Однако, и здесь имеются интересные предложения, в частности, с использованием неоднородного поля, создаваемого магнитом в виде таблетки из сплава кобальта и самария, являющейся одновременно и катодом. Таблетка размещена на изолированной штанге внутри сетчатого сферического анода. Размеры такого преобразователя могут быть сведены к минимуму, хотя измерить с его помощью давления ниже 10^{-5} Па не удастся.

Наконец, следует упомянуть о деформационных преобразователях миниатюрной конструкции. СКТБ ТЭ разработало преобразователь типа ПДД-1, в котором используется тензорезистивный эффект на базе кремниевой мембраны.

Деформация последней под воздействием измеряемого давления преобразуется с помощью мостовой схемы, сформированной непосредственно на самой мембране, в электрический сигнал. Прибор ВДБ-1 с преобразователем ПДД-1 имеет рабочую область от 10^3 до 10^5 Па. Некоторые модели миниатюрных деформационных преобразователей имеются и за рубежом.

Преимущества миниатюрных преобразователей наиболее важны для аэрокосмических приложений. При этом там во многих случаях нет специфических проблем, связанных с необходимостью присоединять датчики к стандартным разъемам вакуумно-технологических систем. Однако, для промышленных установок такие проблемы существуют. Различные виды разъемных соединений имеют как правило в соответствии с действующими стандартами ограниченный ряд диаметров условного прохода. Минимальное значение в этом ряду – 10 мм. На практике используются и другие размеры – 16, 25, 40, 50 мм. В связи с этим миниатюризация преобразователей имеет пределы, обусловленные нецелесообразностью уменьшать размеры чувствительного элемента до величин, которые фактически не имеют смысла при использовании того или иного диаметра условного прохода из указанного ряда. Так, например, разработчики миниатюрных чувствительных элементов в преобразователях ПДТ-13 и ПДТ-14 вынуждены помещать их в корпуса, соответствующие обычным датчикам. В принципе, эти ограничения имеют конструктивную природу, а не физическую, и поэтому могут быть преодолены в дальнейшем.

Что касается миниатюризации измерительных блоков вакуумметров, то усилия в этом направлении тоже предпринимались давно. Так, еще более 30 лет назад стал выпускаться и затем широко использовался вакуумметр 13ВТЗ-003 (разработчик и изготовитель – завод «Токамак», г. Петушки Владимирской обл., выпускался также и заводом «Маяк», г. Курск) на базе терморезисторного преобразователя ПМТ-6-3. Габаритные размеры его измерительного блока – 100 x 158 x 206 мм. Сходные размеры имел и магниторазрядный вакуумметр ВМЦБ-12 – 100 x 158 x 230 мм. Несколько меньшими значениями характеризуются некоторые типы вакуумных реле.

Существенный прогресс в данном направлении достигнут в последнее время – в тепловом вакуумметре «Термодат-12ВТС2» (разработан и производится приборостроительным предприятием «Системы контроля», г. Пермь) измерительный блок имеет габаритные размеры 96x96x110 мм. Таким образом, объем прибора $\sim 10^3$ см³ более, чем в 3 раза, меньше объема блока вакуумметра 13ВТЗ-003. Соответственно минимальна и масса прибора $\sim 0,8$ кг. Вакуумметр «Термодат-12ВТС2» имеет преимущества в отношении массо-габаритных характеристик и перед рядом зарубежных приборов. Указанные параметры достигнуты благодаря применению современных технологий и оптимизации конструктивных решений.

Другим направлением совершенствования современных вакуумметрических приборов можно считать развитие техники комбинирования. Первоначально последнее подразумевало сочетание одного измерительного блока с несколькими преобразователями одного или разных типов. В первом случае, т.е. если

Пленарные доклады

все преобразователи – одного типа, то такой вакуумметр часто называют многоканальным. В отечественной практике наиболее распространены многоканальные вакуумметры на базе уже упоминавшегося преобразователя ПМТ-6-3 и магниторазрядного преобразователя ПММ-32-1. Например, вакуумметр УКВ-3/0-002 (разработчик и изготовитель – завод «Токамак») имел до 8 каналов измерений на базе ПМТ-6-3 с одним выходным прибором, встроенным в электронный блок БПДВ-8-001 (диапазон измерений $1-4 \cdot 10^3$ Па). На Сморгонском заводе оптического станкостроения - СЗОС (г. Сморгонь, Респ. Беларусь) выпускались также многоканальные вакуумметры ВТ1-4 (на базе ПМТ-6-3, 4 канала) и ВМБ1-2 (на базе ПММ-32-1, 2 канала). Опрос преобразователей производится посредством переключения соответствующих кнопок.

Гораздо более широко используют комбинированные вакуумметры с сочетанием преобразователей разных типов. Исторически первыми такими приборами были сочетания одного измерительного блока с термopарным (типа ПМТ-2 или ПМТ-4М) и ионизационным (типа ПМИ-2) преобразователями – вакуумметры ВИТ-1 и ВИТ-2А (диапазон измерения и индикации $10^{-5} - 10^2$ Па). В них было два отдельных выходных прибора для каждого преобразователя. В дальнейшем и особенно после внедрения цифровых дисплеев стало достаточно одного выходного прибора. Появилось много различных комбинаций, и в настоящее время большинство эксплуатируемых в отечественной промышленности вакуумметров относится к числу комбинированных многоканальных устройств. То же можно сказать и о многих зарубежных приборах. Из наиболее известных моделей данного вида следует выделить приборы УКВ-3/7-001 и УКВ-3/7-003 (изготовитель – завод «Токамак»), а также разработки, выполненные в странах СНГ – ВТМ-2 (СЗОС) и ВМТ-001 (ЗАО «Сэлми», г. Сумы, Респ. Украина). Все эти приборы имеют от 2 до 8 каналов измерений на базе преобразователей ПМТ-6-3 и ПММ-32-1. Предпринимались попытки реализовать и более широкую комбинацию датчиков, что имело целью не только расширение диапазона измерений (в целом от 10^{-7} до $4 \cdot 10^3$ Па), но и универсализацию практических приложений. В частности, ЗАО «Высокий вакуум» (г. Минск, Респ. Беларусь) разработало вакуумметры типов ВК-3 и ВК-6, которые наряду с ПМТ-6-3 и ПММ-32-1 комплектуются ионизационными преобразователями ПМИ-55 и ПМИ-10-2 (ВК-3) и ПМИ-51 (ВК-6). Правда, эти попытки нельзя признать успешными.

Ряд комбинированных вакуумметров предложило СКТБ ТЭ. Модели, разработанные там в предыдущие десятилетия, в частности, ВТБ-13 и ВТБ-14 (на базе термopарных преобразователей ПДТ-13 и ПДТ-14) обеспечивают измерения давлений в диапазоне $10^{-3} - 10$ и $4 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^3$ Па соответственно с относительной погрешностью $\pm 10\%$. Учитывая пожелания потребителей иметь прибор, охватывающий и высоковакуумную область, и субатмосферные давления, разработчик – СКТБ ТЭ предложил новый комбинированный вакуумметр ВДТБ-10 (другая модификация – ВДТ-2), в котором в сочетании с электронным блоком помимо преобразователей ПДТ-13 и ПДТ-14 задействован и новый деформационный (тензорезистивный) преобразователь ПДД-1, что позволило довести верхний предел измерений прибора до 10^5 Па. Вакуумметр ВДТБ-10 реализуется

Пленарные доклады

в ряде версий, отличающихся друг от друга числом каналов измерений и блокировки и набором указанных преобразователей (при относительной погрешности $\pm 15\%$). Аналогичная комбинация датчиков представлена в вакуумметре Membranovac DM11/DM12 (изготовитель Leybold Vacuum). Правда, его рабочий диапазон заметно уже – от 10^{-1} до $2 \cdot 10^4$ Па, а погрешность доходит до $\pm 20\%$.

Интересную, ранее не применявшуюся комбинацию датчиков – термпарного ПМТ-2 или ПМТ-4М и терморезисторного ПМТ-6-3 осуществило предприятие «Системы контроля» в вакуумметре «Термодат-12BTC2». Этот прибор позволяет использовать для измерений фактически любой тепловой преобразователь, что может быть весьма полезно в практике вакуумных измерений.

В более широком масштабе соответствующие работы проводятся ведущими зарубежными компаниями. Вслед за фирмой Varian, чьи широко известные приборы Multigauge обеспечивают до 13 каналов измерений (практически со всеми видами преобразователей, вплоть до деформационного), и MKS Instruments – вакуумметры Clustergauge, многоканальные комбинированные вакуумметры стали выпускать и другие фирмы. Так, Alcatel производит серию приборов μ Pascal с исключительно широкими функциональными возможностями, а Leybold Vacuum – вакуумметры Combivac с набором различных конфигураций. Отметим также вакуумметр IKR 270 (фирма Pfeiffer), который благодаря включению в него ионизационного преобразователя с модуляцией коллекторного тока имеет нижний предел измерений 10^{-9} Па.

Характерной чертой последнего времени стала разработка целого ряда комбинированных вакуумметрических преобразователей. Эти последние представляют собой сочетания чувствительных элементов терморезисторных, ионизационных, магниторазрядных типов внутри единого корпуса и с общим присоединительным фланцем (штуцером). Преимущество таких конструкций лежит, очевидно, в экономической плоскости, т.к. стоимость двух отдельных преобразователей разных типов как правило выше стоимости одного комбинированного датчика. Кроме того, достигается и уменьшение требуемого пространства и массы электродной структуры, что немаловажно для некоторых приложений. Успешно работает в этом направлении, например, компания Leybold-Inficon: она разработала и выпускает комбинированный преобразователь BPG-400 с сочетанием чувствительных элементов терморезисторного и ионизационного типов. Можно сказать, что подобная техника представляет собой определенную веху в развитии вакуумметрии, т.к. до последнего времени не было возможности охватить с помощью одного датчика такой широкий диапазон давлений, как, например, для приведенного примера – от $6 \cdot 10^{-8}$ до 10^5 Па, т.е. от сверхвысокого вакуума до атмосферы.

В нашей стране впервые комбинирование чувствительных элементов в одном датчике было осуществлено давно, еще при создании известного ионизационного преобразователя ПМИ-27. В нем было найдено эффективное сочетание ионизационных чувствительных элементов двух видов – с осевым коллектором (для измерений высокого и сверхвысокого вакуума) и с минимизированными расстояниями между электродами (для измерения среднего вакуума). При этом

удалось придать ряду электродов двойное назначение в зависимости от одного из двух электрических режимов соответствующего вакуумметра ВИ-14. В дальнейшем был разработан, но по ряду причин не производился, тепловой преобразователь ПДТ-20, в котором на одном основании (в стеклянном корпусе) было смонтированы чувствительные элементы терморезисторного и термопарного типов.

В последнее время в СКТБ ТЭ создан комбинированный преобразователь нового типа – ПДДТ-1. В нем реализовано сочетание термопарного и тензорезистивного чувствительных элементов. Их конструкция и рабочий режим аналогичны тем, которые установлены для преобразователей ПДТ-13, ПДТ-14 и ПДД-1 (см. выше) соответственно. Выходной прибор вакуумметра ВДТ-3 (диапазон измерений – от 10^{-3} до 10^5 Па), который укомплектован преобразователем ПДДТ-1, индицирует давление, преобразованное деформационным элементом, в области выше 40 Па и преобразованное термопарным элементом в области ниже 40 Па, причем переключение происходит автоматически. Таким образом, один преобразователь ПДДТ-1 заменяет собой два преобразователя – термопарного и деформационного типов.

Важный момент, отличающий современный этап развития вакуумметрического приборостроения, - разработка и производство гаммы вторичных устройств, сопрягаемых, в том числе и конструктивно, с первичными преобразователями и выдающих информацию об измеряемом давлении только в аналоговом (0 – 10 В) или чаще – цифровом (по RS 232 или RS 485 интерфейсу) виде, т.е. без традиционного выходного прибора с непосредственным визуальным отсчетом. В большинстве случаев такие устройства весьма невелики по габаритам, имеют небольшую массу (до 0,5 кг) и незначительное энергопотребление (с питанием от источника постоянного тока напряжением от 12-14 до 30-36 В). В то же время рабочий диапазон и точность, обеспечиваемые такими устройствами (в ФРГ их называют – Transmitter, в англоязычных странах – Electronic Transducer), в принципе, не уступают соответствующим параметрам показывающих вакуумметров. Так, фирма Alcatel перешла к выпуску ионизационных вакуумметрических приборов только в виде вторичных устройств АНГ111D (диапазон измерений – от 10^{-8} до 1 Па, относительные погрешности до $\pm 10\%$). В них, кроме того, предусмотрена возможность подстройки по индивидуальному значению приведенной чувствительности первичного преобразователя (от 0,01 до 0,2 Па⁻¹). Все большее распространение вторичных устройств указанного вида, естественно, не случайно: оно самым непосредственным образом связано с расширением масштабов и с повышением уровня автоматизации производственных процессов, их компьютеризацией.

Примечательно, что функционально сходные устройства – «датчики вакуума» типов ДВЭ, ДВТ, а также ДВИ (на базе первичных преобразователей ПММ-32-1, ПМТ-6-3 и ПМИ-10-2) были разработаны ряд лет назад и даже производились на заводе «Токамак». Однако, потребность в такой аппаратуре в стране, особенно в условиях начинавшегося кризиса, была незначительной, и поэтому заводу пришлось комплектовать указанные устройства дополнительным

электронным блоком БПДВ-8-001 (8 каналов измерения) с показывающим выходным прибором. Данный блок обеспечивал необходимое электропитание «датчиков вакуума» и цифровую индикацию измеряемого давления. Комплект из «датчиков вакуума» того или иного типа и блока БПДВ-8-001 (соответствующие обозначения – УКВ-3/7-001, УКВ-3/0-002, УКВ-3/7-003 – см. выше) представляют собой, по существу, полноценные вакуумметры с автономным устройством вторичного преобразования.

Спрос промышленности на многоканальные комбинированные вакуумметры, как и на вторичные устройства с цифровым выходом, в значительной степени определяется уровнем развития современных технологий. Для их реализации часто нужны весьма сложные установки с рядом вакуумно-технологических зон, в которых требуется поддерживать различные давления остаточного газа. Их, в свою очередь необходимо контролировать и регулировать. Эти функции и вообще управление установками все чаще осуществляется с помощью современной электронно-вычислительной техники. Очевидно, что в таких условиях указанные выше приборы эффективны и оправдывают расходы по их приобретению и эксплуатации. Для высокоразвитого и широкомасштабного производства они не просто желательны, а остро необходимы. Когда такие производства станут превалирующими в Российской Федерации, описанные тенденции станут еще более актуальными.

Наконец, важным направлением работ остается расширение функциональных возможностей вакуумметрической аппаратуры, что диктуется потребностями различных сегментов вакуумно-технологических процессов. За рубежом разработаны и выпускаются вакуумметры, в которых помимо цифрового отсчета имеется дисплей для графической интерпретации динамики процесса откачки, например, 8-канальный прибор IGC100 (компания SRS). При этом в качестве дополнительного сервиса показание по каждому из каналов снабжается указанием на месторасположение соответствующего преобразователя в рамках разветвленной вакуумной системы. Предлагаются также информационно-измерительные комплексы Multivac (фирма Varian), представляющие собой сочетание вакуумметра и блока электропитания вакуумного насоса. В них управление и регулирование параметров питания ионного насоса непосредственно связаны с уровнем отсчетов давления по вакуумметру, что обеспечивает оптимизацию рабочего режима насоса.