

Вакуумная техника является одной из основных составляющих мирового рынка высоких технологий. Согласно данным, представленным в [1], объем мирового рынка вакуумных технологий в 2012 году достиг почти 7 млрд. долл. По прогнозам до 2015 года сохранится положительная динамика рынка, и ежегодный прирост составит около 6,5% [1]. Основным двигателем рынка вакуумного оборудования является отрасль производства полупроводниковой техники. При этом на мировом рынке вакуумного оборудования четко выделяются три лидирующие компании – Oerlikon Leybold Vacuum (Германия), Edwards (Великобритания) и Varian (США). Объем российского рынка в 2011 году достиг 2,2 млрд. руб., при этом был отмечен значительный рост внутреннего производства. Это иллюстрирует табл., показывающая динамику одного из основных секторов – производство вакуумных насосов. Таблица 1 - Внутреннее производство вакуумных насосов и агрегатов в 2007-2011 гг. в натуральном и денежном выражениях

Год	2007	2008	2009	2010	2011
Производство, шт.	12904	13412	10865	11734	16193
Средняя цена, руб.	23,6	24,7	24,7	26,5	30,2
Оценка производства, млн. руб.	304,5	331,3	268,4	310,95	489,03

Однако для российского рынка по прежнему характерна высокая доля импорта, значительно превышающая долю внутреннего производства. Экспорт вакуумного оборудования традиционно невелик. Российские производители выпускают в основном вакуумные насосы для низкого и среднего вакуума - пластинчато-роторные, жидкостно-кольцевые и мембранные. Лидером отечественной отрасли производства вакуумных насосов и агрегатов долгие годы является ОАО «Вакууммаш» (г. Казань). Доля компании в натуральном выражении превышает 20-25% от общего объема производства в РФ. Можно также выделить ОАО «Ливгидромаш» (г. Ливны) и ЗАО «Беском» (с. Бессоновка). Сфера промышленного и научного применения вакуума охватывает очень широкий диапазон рабочих давлений Па. Обеспечить достижение даже среднего вакуума, не говоря уже о высоком и сверхвысоком, насосом одного типа невозможно, и ни одно откачное устройство не может одинаково эффективно работать в таком широком диапазоне давлений. В работе [2] отмечается, что физические механизмы функционирования конкретного откачного устройства при атмосферном давлении, в среднем и высоком вакууме, как правило, различны. Поэтому, даже если выбранное средство получения вакуума и было бы работоспособно во всём диапазоне давлений, попытка его универсального применения не привела бы к успеху из-за весовых, габаритных или стоимостных факторов. Именно с этим связано огромное количество разновидностей вакуумных насосов, выпускаемых серийно промышленностью. Очевидно, что одной из наиболее сложных задач, решаемых при проектировании вакуумной системы, является выбор откачных средств. Ошибочно, если проектант будет опираться только на требуемую производительность насоса и предельное остаточное давление. В правильно спроектированной системе для каждой

конкретной ситуации должно учитываться очень большое количество других аспектов, среди которых: диапазон рабочих давлений, характер откачиваемой среды (в первую очередь, агрессивность, токсичность, наличие твёрдых включений), время выхода системы на рабочее давление, длительность непрерывной работы, стоимость, габариты, уровень шума и вибрации, эксплуатационные расходы, потребляемая мощность, ресурс до капитального ремонта, надёжность. И это далеко не полный перечень. Например, выбирая конкретный насос предварительного разрежения и/или его предпочтительного изготовителя, полезно принимать во внимание другие аспекты и эксплуатационные особенности, например: наличие газобалластного устройства и входное давление при открытом газобалласте, возможность сохранения вакуума при остановке насоса; коррозионную стойкость, длительность периода восстановления начальных откачных параметров после откачки специфических газов и др. Проектируя вакуумную систему, следует также заранее ответить на вопрос: должна ли система откачки обеспечивать получение безмасляного вакуума? И если да, то, каким образом? Как известно, долгие годы наиболее популярной базовой схемой для получения высокого вакуума был агрегат с диффузионным насосом и установленной на его вход азотной ловушкой. Причем эта схема использовалась, а в России и сейчас нередко используется, даже в процессах очень критичных к присутствию паров масла в остаточной среде, например, в процессах нанесения тонких плёнок. В дальнейшем для получения безмасляного высокого и сверхвысокого вакуума стали применяться турбомолекулярные, электрофизические и криогенные насосы. В силу принципов своего действия данные средства откачки обеспечивали практически абсолютно «чистую» среду. Удивительно, но долгие годы в качестве насосов предварительного разрежения для них в основном применялись вакуумные насосы с масляным уплотнением (ВНМУ), например, золотниковые или пластинчато-роторные. Это объяснялось спецификой параметров, которые должен обеспечить насос предварительного разрежения или форвакуумный насос. В первую очередь, это относится к необходимому предельному остаточному разрежению. Для успешного функционирования высоковакуумных безмасляных насосов, как правило, требуется давление порядка 1 Па. Такое давление достаточно легко достигается двухступенчатым ВНМУ. Совсем по другому дело обстоит с получением безмасляного вакуума этого уровня давлений. На первый взгляд, разнообразие механических насосов, способных обеспечить получение безмасляного вакуума, впечатляет. Наиболее известны: поршневые, мембранные, винтовые, спиральные, осевые, центробежные, пластинчатые, двухроторные типа Рутс, кулачково-зубчатые. Однако, традиционно «сухие» мембранные, осевые и центробежные, а также безмасляные поршневые машины до этого давления «не дотягивают». Фактически единственными безмасляным средством предварительной откачки

почти до конца XX столетия оставался криосорбционный насос, со всеми присущими недостатками в эксплуатации. Ситуация кардинально изменилась, когда в конце XX столетия почти одновременно было освоено промышленное производство трех видов механических безмасляных вакуумных насосов: спиральных (scroll), кулачково-зубчатых (claw) и винтовых (screw). Типичные характеристики данных видов насосов ведущих мировых производителей вакуумного оборудования представлены на рис. 1. Там же нанесена аналогичная кривая для двухступенчатого пластинчато-роторного насоса 2НВР-5ДМ производства ОАО «Вакууммаш». Можно видеть, что все три вида машин могут являться полноценной «сухой» альтернативой ВНМУ. Рис. 1 – Типичные паспортные характеристики механических насосов для получения среднего вакуума. При этом, для достижения давления порядка 1 Па, например, в машинах с роторами кулачково-зубчатого типа требуется 3-4 последовательно соединенные ступени. В спиральных и винтовых насосах, в силу особенностей принципа действия, прохождение газа через ряд последовательно соединенных полостей реализуется в одной камере. Кроме того, благодаря герметизации рабочей полости с помощью металлического сальфона, спиральные насосы могут быть абсолютно безмасляными. Этим они выгодно отличаются от винтовых, кулачково-зубчатых и двухроторных насосов, в которых уплотнение валов осуществляется при помощи сальниковых или динамических уплотнений. Отметим, что агрегаты в составе электрофизических или криогенных насосов в сочетании с «сухими» спиральными насосами позволяют добиться абсолютно безмасляного высокого и сверхвысокого вакуума. В то же время, спиральные насосы, вследствие наличия в конструкции неуравновешенных вращающихся масс, имеют физическое ограничение по скорости действия, - на сегодняшний день это порядка 15 л/с (насосы Anest Iwata ISP-1000, Edwards XDS-46i). Кроме того, спиральные насосы очень чувствительны к различным механическим загрязнениям, попадающим в рабочую камеру насоса, что не позволяет использовать их в ряде «грязных» технологических процессов. Винтовые и кулачково-зубчатые насосы, напротив, менее чувствительны к «чистоте» откачиваемой среды и, главное, имеют существенно большую скорость действия. Например, винтовой насос Dryvac 5000 (Oerlikon Leybold Vacuum) имеет скорость действия более 1000 л/с. Все эти три вида безмасляных вакуумных насосов достаточно сложны в производстве, поскольку требуют высокой точности изготовления деталей и узлов, входящих в их состав и высокой культуры производства. К сожалению, ни одна из данных машин в России серийно не производится. Вышесказанное позволяет понять, насколько сложна задача правильного выбора откачных средств. В этом контексте важно, чтобы проектант и эксплуатационщик вакуумных систем осознавали, какую цену придется заплатить за безмасляный вакуум. Помочь в этом может рис. 2. Рис. 2 – Удельная стоимость скорости действия ВНМУ и безмасляных насосов среднего

вакуума Здесь и ниже использовались данные более чем по 60 насосам ведущих мировых производителей откачных средств [3-11]: Varian Vacuum Technologies (США), Edwards (Англия), Pfeiffer Vacuum (Германия), Busch (Германия), Oerlikon Leybold Vacuum (Германия), Tuthill Vacuum (США), Anest Iwata (Япония), Adixen (Франция). Из рисунка видно, что при соизмеримой скорости действия стоимость получения безмасляного вакуума от 3-х до 10 раз выше, чем вакуума, обеспечиваемого с помощью ВНМУ. Как и следовало ожидать, для всех насосов стоимость единицы скорости действия снижается с увеличением скорости. Причем эта разница более ярко выражена у безмасляных насосов и может достигать 4-х раз. По удельной мощности (рис. 3) безмасляные насосы и ВНМУ находятся примерно на одном и том же уровне, также как и по коэффициенту подачи насоса. У насосов с большей скоростью действия удельные параметры, как правило, лучше, чем у насосов с малой скоростью действия. Самое высокое энергопотребление и худшие массогабаритные показатели характерны для вакуумных насосов кулачково-зубчатого типа. Коэффициенты подачи большинства насосов лежат в интервале от 0,8 до 0,9. Исключение составляют кулачково-зубчатые машины, для которых он ниже и составляет примерно 0,7 [12, 13]. Рис. 3 – Удельная мощность ВНМУ и безмасляных насосов среднего вакуума Конечно следует помнить, что представленные данные не учитывают затраты на покупку и обслуживание ловушек, устанавливаемых на вход ВНМУ для снижения обратного потока паров масла, затраты на замену и утилизацию масла. И самое главное, ни одна система с масляным насосом, даже при наличии криогенных ловушек, не гарантирует от попадания углеводородов в откачиваемый объем, особенно в нестандартных ситуациях. Таким образом, дополнительные издержки за безмасляную систему откачки становятся вполне приемлемой платой за лучшее качество производимой продукции. Статья подготовлена на кафедре «Вакуумная техника электрофизических установок» КНИТУ при финансовой поддержке проекта «Создание высокотехнологичного производства безмасляных спиральных вакуумных насосов для индустрии наносистем и наноматериалов» открытого публичного конкурса по отбору организаций на право получения субсидий на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства согласно постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года N 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».