

Министерство образования и науки России
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

А.А. Райков, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров

РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС БЕЗМАСЛЯНОГО КУЛАЧКОВО-ЗУБЧАТОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

Монография

Казань
Издательство КНИТУ
2013

УДК 621.521
ББК 30

Райков А.А.

Рабочий процесс безмасляного кулачкового-зубчатого вакуумного насоса : монография / А.А. Райков, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2013. – 184 с.

ISBN 978-5-7882-1431-3

Представлены основные конструкции бесконтактных безмасляных вакуумных насосов и их откачные характеристики. Приведен обзор методов расчета рабочих процессов насосов объемного действия. Создана математическая модель расчета рабочего процесса безмасляного кулачкового-зубчатого вакуумного насоса. Описаны экспериментальные исследования этого насоса и получение индикаторных диаграмм и диаграмм температуры. Проведено расчетное и экспериментальное исследование течения газа во входном и выходном трактах насоса. Проанализировано влияние основных геометрических параметров рассматриваемого насоса на его откачные характеристики.

Предназначена для студентов, изучающих дисциплины «Роторные машины» и «Машины динамического действия».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского национального исследовательского технологического университета

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук *П.П. Осипов*
канд. техн. наук *Е.И. Капустин*

ISBN 978-5-7882-1431-3

© Райков А.А., Саликеев С.И.,
Бурмистров А.В., 2013
© Казанский национальный
исследовательский
технологический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Основные условные обозначения и термины	5
Введение	7
Глава 1. Безмасляные вакуумные насосы	13
1.1. Двухроторный вакуумный насос типа Рутс	18
1.2. Кулачково-зубчатый вакуумный насос	23
1.3. Винтовые вакуумные насосы	38
1.4. Спиральные вакуумные насосы	42
1.5. Выводы	47
Глава 2. Экспериментальное исследование КЗВН	49
2.1. Описание объекта исследования	49
2.2. Выбор датчиков для снятия индикаторных диаграмм	52
2.2.1. Тензометрический метод	53
2.2.2. Пьезоэлектрический метод	57
2.2.3. Емкостной метод	62
2.2.4. Резонансный метод	63
2.2.5. Индуктивный метод	64
2.3. Описание экспериментального стенда	69
2.4. Методика проведения испытаний	74
2.5. Обработка результатов измерений	80
2.6. Обсуждение результатов	85
2.7. Определение коэффициентов расхода входного и выходного трактов КЗВН	88
2.7.1. Стенд и методика измерения	89
2.7.2. Обработка результатов	93
Глава 3. Математическое моделирование рабочего процесса КЗВН ..	105
3.1. Состояние вопроса по теоретическому и экспериментальному исследованию КЗВН и других прямозубых насосов	105
3.1.1. Моделирование рабочего процесса бесконтактных вакуумных насосов	108
3.1.2. Моделирование течения газа в каналах сложной геометрии	109
3.2. Основные положения и допущения	115
3.3. Математическая модель рабочего процесса КЗВН	115
3.4. Вычисление быстроты действия насоса	118
3.5. Геометрия рабочей полости	119

3.6. Построение окон всасывания и нагнетания	129
3.7. Геометрические параметры исследуемого насоса.....	130
3.7.1. Расчет зависимости объема полостей всасывания и сжатия– нагнетания от угла поворота ротора.	133
3.8. Описание алгоритма расчета перетеканий газа через зазоры роторного механизма	137
3.8.1. Зависимость геометрических характеристик каналов от угла поворота роторов.....	137
3.8.2. Методика расчета перетеканий через щелевые каналы	144
3.8.3. Объединение перетеканий по направлениям движения газа.....	146
3.8.4. Учет тепловых деформаций.....	147
Глава 4. Результаты математического моделирования и анализ влияния геометрических параметров на рабочий процесс	149
4.1. Сравнение экспериментальных и расчетных данных	149
4.2. Анализ влияния геометрических параметров на рабочий процесс.....	154
4.2.1. Зазоры роторного механизма.....	154
4.2.2. Протяженность окна нагнетания	159
4.2.3. Ширина зуба ротора	163
4.2.4. Межосевое расстояние и радиус расточки корпуса.....	166
Заключение.....	169
Литература	171

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТЕРМИНЫ

КЗВН – кулачково-зубчатый вакуумный насос;
ДВН – двухроторный вакуумный насос типа Рутс;
БГД – вычислительная гидро-газодинамика;
TDMA – Tridiagonal matrix algorithm;
SIMPLE – Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations;
LSODE – Livermore Solver for Ordinary Differential Equations;
 V_{MAX} – максимальный объем рабочей полости;
 V_{MIN} – минимальный объем рабочей полости;
 $P_{ВЫХ}$ – давление на выходе из насоса;
 $P_{ВХ}$ – давление на входе в насос;
 V_{BC} – объем полости всасывания;
 $V_{СЖ}$ – объем полости сжатия-нагнетания;
 $V_{ПЕР}$ – перевальный объем;
 L – глубина канала (длина ротора);
 R_1, R_2 — радиусы кривизны каналов;
 R_T – удельная газовая постоянная;
 T_1 – температура на входе в канал;
 dL – элементарная контурная работа тела;
 dL_M – элементарная миграционная работа тела;
 dQ_M – элементарная миграционная теплота;
 dQ_T – внешнее подведенное тепло;
 n – частота вращения роторов;
 φ – угол поворота роторов;
 ω – угловая скорость;
 dU – изменение внутренней энергии системы;
 $dm_{ПР}, dm_{УТ}$ – изменение массы системы за счет притоков и утечек в рассматриваемый объем соответственно;
 $h_{ПР}, h_{УТ}$ – энтальпия притекающего и утекающего газа;
 $M_{ПР}, M_{УТ}$ – секундные приход и расход газа;
 k – показатель адиабаты;
 c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении;
 $\vec{U}$ – векторное поле скорости;
 ρ – плотность газа;
 μ – коэффициент массового расхода;
 l_K – длина канала, соединяющего исследуемый объем с датчиком;

G_P – действительный массовый расход через входной (выходной) тракт;
 G_D – массовый расход через эквивалентную круглую диафрагму;
 $\Delta_{S_{\text{вх}}}$ – доверительные границы результата измерений;
 f – площадь поперечного сечения канала;
 δ_{PP} , δ_{PK} , δ_T – межроторный, радиальный и торцевой зазоры роторного механизма соответственно;
 U – проводимость канала;
 l – протяженность канала в направлении перетекания;
 $M_{\text{ЭКСП}}$ – экспериментальный массовый расход;
 λ – коэффициент подачи;
 S_G – геометрическая быстрота действия;
 S_{BX} – быстрота действия на входе в насос;
 R – радиус ротора;
 A – межосевое расстояние;
 η – коэффициент динамической вязкости;

ВВЕДЕНИЕ

Курс на инновационное развитие России обуславливает широкое развитие и внедрение высокотехнологичных производственных процессов. Реализацию большинства существующих и перспективных технологий трудно представить вне условий вакуума. Без преувеличения можно сказать, что без вакуума невозможна реализация ни одного из приоритетных направлений развития России [1 – 3]. Нанoeлектроника, наноинженерия, функциональные наноматериалы и высокочистые вещества, наноматериалы для энергетики, космической техники и биотехнологии, конструкционные и композитные наноматериалы, нанотехнологии для систем безопасности – вот далеко не полный перечень новейших приложений вакуумной техники. В таких областях как микроэлектроника, медицина, пищевая промышленность, металлургия, нефтехимическое производство, атомная энергетика, энергосберегающие технологии, индустрия получения теплозащитных покрытий на архитектурных стеклах и многих других других вакуум давно стал неотъемлемой частью технологического процесса.

Следует отметить, что сфера промышленного и научного применения вакуума охватывает очень широкий диапазон рабочих давлений (более 15 порядков). 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 [4] 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, удельная потребляемая мощность, 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 пленок.

В дальнейшем для получения безмасляного высокого и сверхвысокого вакуума стали использоваться 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), типа НВР или НВЗ. Это объяснялось спецификой параметров, которые должен обеспечить насос предварительного разрежения или форвакуумный насос. В первую очередь, это относится к необходимому 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 безмасляными средствами предварительной откачки почти до конца XX столетия оставались криосорбционные насосы, со всеми присущими им недостатками в эксплуатации.

Ситуация кардинально изменилась, когда на рубеже XXI столетия почти одновременно было освоено промышленное производство трех видов механических безмасляных вакуумных насосов: спиральных (scroll), кулачково-зубчатых (claw) и винтовых (screw). Анализ тенденций развития рынка вакуумного оборудования показывает рост сектора безмасляных средств получения вакуума по отношению ко всем остальным [5, 6].

В данной работе будем рассматривать механические безмасляные насосы для получения низкого и среднего вакуума. К таким машинам относятся безмасляные пластинчато-роторные, мембранные, спиральные, винтовые и двухроторные насосы типа Рутс. Принцип работы безмасляных пластинчато-роторных насосов такой же, как и у пластинчато-роторных насосов с масляным уплотнением, за исключением того, что они работают без применения смазок. За счет этого они имеют существенно меньшие ресурс работы, степень сжатия и частоту вращения. Главные недостатки мембранных насосов - весьма ограниченный срок службы мембраны и низкая быстрота действия. Кроме того, возможности по снижению предельного остаточного давления весьма ограничены (порядка 10^4 Па для одноступенчатого насоса и 10^3 Па для двухступенчатого [7]).

Для получения безмасляного низкого и среднего вакуума наиболее перспективным является использование бесконтактных насосов, в частности, спиральных. По сравнению с любыми другими объемными насосами, они обладают наименьшими потерями на всасывании, что является следствием малой скорости газа на всасывании и большого раскрытия полости всасывания. Именно это, а также практически полное отсутствие мертвого пространства и малый подогрев газа на всасывании, обуславливают высокий коэффициент подачи [8]. Основными недостатками данных насосов являются

жесткие требования к чистоте откачиваемого газа и относительно низкая быстрота действия. Также распространению спиральных насосов препятствует сложность изготовления спирального профиля.

Винтовые насосы имеют лучшие массогабаритные показатели, полную уравновешенность и стабильные характеристики в течение длительного срока эксплуатации. Однако широкому внедрению данных насосов препятствует сложность изготовления трехмерного винтового профиля роторов, особенно с переменным шагом, который обеспечивал бы малые зазоры в зацеплении и, соответственно, – высокую степень повышения давления [9, 10]. Следует также отметить существенный нагрев газов при прохождении через насос, что не всегда допустимо.

Наибольшее распространение среди безмасляных машин получили двухроторные насосы типа Рутс, в первую очередь, за счет высокой быстроты действия [11]. Однако, в связи с низкой степенью повышения давления, возникает необходимость их эксплуатации с форвакуумными насосами. Традиционное использование для этой цели вакуумных насосов с масляным уплотнением, например пластинчато-роторных или золотниковых, приводит к тому, что такой агрегат уже не является «сухим». Поэтому в качестве форвакуумных также следует использовать безмасляные конструкции. Наиболее подходящим для этой цели является кулачково-зубчатый вакуумный насос, имеющий большую по сравнению с ДВН степень повышения давления. Конструкция этого насоса позволяет использовать его как в качестве основного средства откачки, так и в агрегате с насосом типа Рутс в качестве форвакуумного, что позволяет сочетать высокую быстроту действия с широким рабочим диапазоном [12].

Кулачково-зубчатый вакуумный насос (КЗВН) – это бесконтактный безмасляный двухроторный механический вращательный насос объемного принципа действия, в котором перемещение газа осуществляется за счет периодического изменения объема замкнутой полости, образующейся между зубьями роторов, расточкой корпуса и торцевыми крышками [13, 14]. В зарубежной литературе данная машина носит название «Claw». Этот насос, наряду с винтовыми и спиральными, обладает полным внутренним сжатием, необходимым для работы с выхлопом непосредственно в атмосферу и, следовательно, более высоким адиабатным КПД по сравнению с насосами с внешним сжатием (насосы типа Рутс) и насосами с частичным внутренним сжатием (ВНЧС). Несмотря на несколько меньшую, по сравнению с винтовыми и спиральными вакуумными

насосами, степень сжатия, эта машина за рубежом находит довольно широкое применение. При этом в литературе практически отсутствуют методики расчета их откачных характеристик. Экспериментальные исследования сводятся к представлению зависимостей быстроты действия от давления, как правило, для одной частоты вращения. В настоящее время в России и странах СНГ данный вид насосов не производится.

В данной монографии представлены результаты экспериментального и теоретического исследования рабочего процесса кулачкового-зубчатого вакуумного насоса, разработки математической модели процесса откачки, и приводятся рекомендации по повышению эффективности работы насоса на основе полученных результатов.

Монография состоит из введения, четырех глав, списка использованной литературы и приложения.

В первой главе проведен обзор конструктивных разновидностей кулачкового-зубчатых вакуумных насосов. Рассмотрены методы и средства измерения быстропеременных давлений в условиях низкого вакуума. Приведено обоснование выбора средств измерения. Проанализировано существующее на данный момент положение в отношении теоретического и экспериментального исследования КЗВН. Рассмотрены методы математического моделирования рабочих процессов компрессоров и вакуумных насосов. Представлены методы решения задач вычислительной газодинамики.

Основу второй главы составляют экспериментальные исследования откачных характеристик КЗВН и индикаторных диаграмм. Приведено описание стендов и методик получения индикаторных диаграмм и быстроты действия КЗВН. Представлены результаты экспериментов при различных давлениях на входе в насос, скоростях вращения роторов и температурных режимах. На специально изготовленном стенде проведено экспериментальное исследование сопротивления входного и выходного трактов КЗВН и расчетным путем получены коэффициенты массового расхода газа. Рассчитана погрешность измерений.

Третья глава посвящена разработке математической модели КЗВН. Определены основные допущения математической модели. Проведен расчет профиля роторов и объемов рабочих полостей КЗВН с симметричными и ассиметричными роторами. В математической модели учтены сопротивления входного и выходного трактов.

В четвертой главе проведено сравнение экспериментальных и расчетных индикаторных диаграмм и откачных характеристик насоса. Представлены результаты численного расчета откачных характеристик КЗВН при варьировании основных геометрических параметров роторного механизма: величины зазоров, расположения кромки окна нагнетания, ширины зуба ротора и отношения межосевого расстояния к диаметру расточки корпуса. По результатам исследования приводятся рекомендации по совершенствованию конструкции насоса.

ГЛАВА 1. БЕЗМАСЛЯНЫЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

К настоящему времени существует большое количество конструктивных разновидностей вакуумных насосов, предназначенных для получения низкого и среднего безмасляного вакуума: поршневые, мембранные, винтовые, спиральные, осевые, центробежные, пластинчатые, двухроторные типа Рутс, двухроторные насосы с частичным внутренним сжатием, кулачково-зубчатые.

На первый взгляд, предпочтительно выглядят насосы контактного типа, способные создать степень повышения давления до 10^8 в двухступенчатом и до 10^5 в одноступенчатом исполнении, при ресурсе работы в несколько лет. Однако такие показатели обеспечиваются лишь для насосов с масляным уплотнением, и они существенно снижаются при попытках использования таких конструкций без масла.

Бесконтактные роторные насосы за счет наличия гарантированных зазоров в роторном механизме обладают высокими частотами вращения и высокими удельными откачными характеристиками, позволяют вести откачку агрессивных, взрывоопасных и дорогих газов, парогазовых конденсирующихся смесей и сред, содержащих твердые включения.

Схемы некоторых бесконтактных роторных машин [15, 16, 17] представлены на рис. 1.1. Они отличаются как профилем роторов, их количеством, так и характером повышения давления газа. В промышленных масштабах выпускаются двухроторные машины типа Рутс, винтовые, спиральные и кулачково-зубчатые насосы.

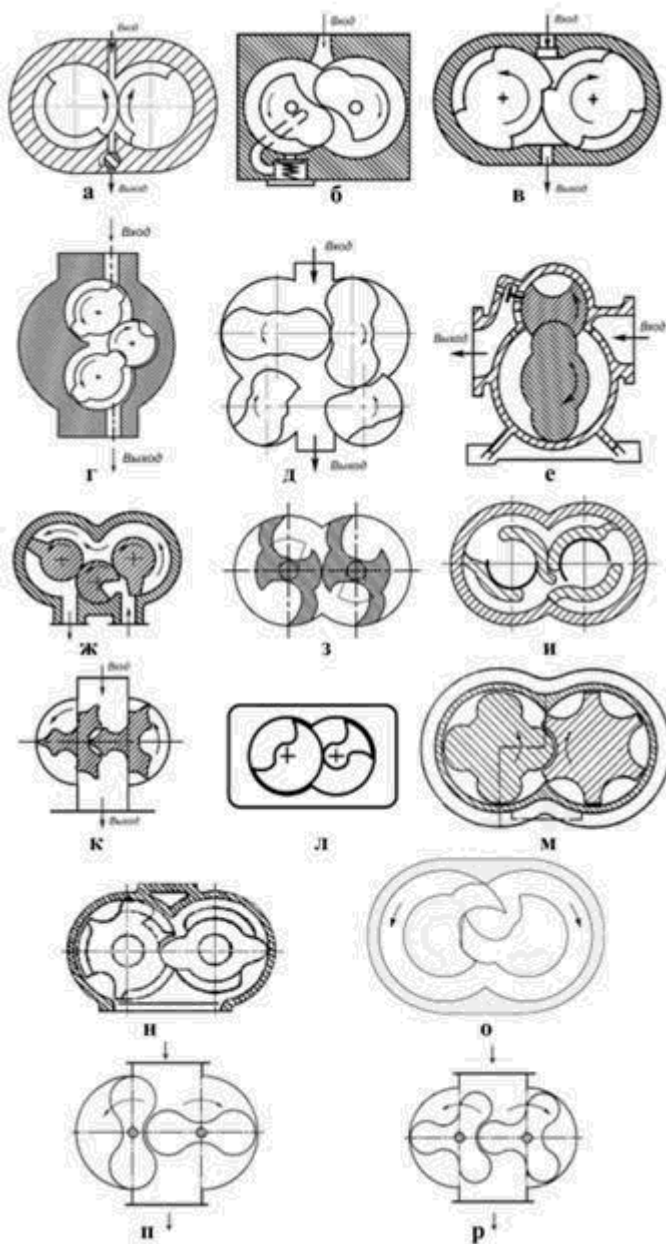


Рис. 1.1. Схемы некоторых роторных бесконтактных насосов

Все эти виды бесконтактных машин сложны для производства, поскольку требуют высокой точности изготовления деталей и узлов, входящих в их состав и высокой культуры производства. Это обуславливает большую стоимость безмасляных насосов по сравнению с вакуумными насосами с масляным уплотнением (ВНМУ). На рис. 1.2 показана зависимость удельной стоимости быстроты действия ВНМУ и безмасляных насосов среднего вакуума от давления на входе, полученная в работе [4] в результате анализа характеристик более чем 64 насосов ведущих мировых производителей откачных средств [18 – 28]: Varian Vacuum Technologies (США), Edwards (Англия), Pfeiffer Vacuum (Германия), Busch (Германия), Oerlikon Leybold Vacuum (Германия), Tuthill Vacuum (США), Anest Iwata (Япония), Adixen (Франция).

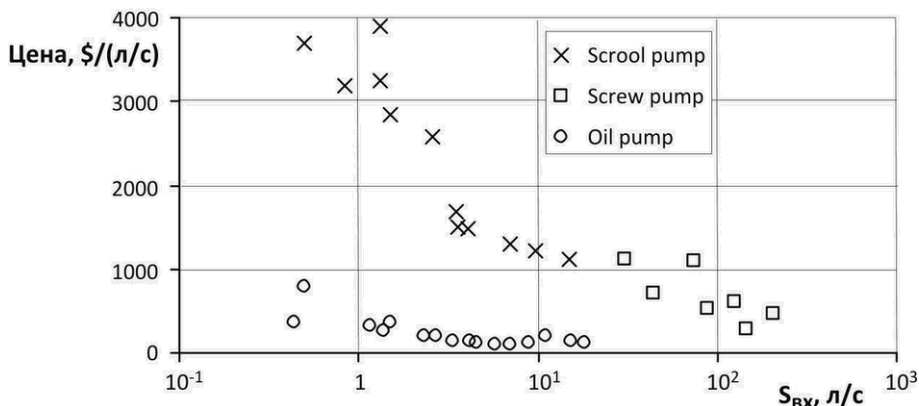


Рис. 1.2. Удельная стоимость быстроты действия ВНМУ и безмасляных насосов среднего вакуума

Можно видеть, 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.

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 нештатных ситуациях. Таким образом, дополнительные издержки за безмасляную систему откачки становятся вполне приемлемой платой за лучшее качество производимой продукции.

По удельной мощности (рис. 1.3), массогабаритным характеристикам (рис. 1.4) безмасляные насосы и ВНМУ находятся примерно на одном и том же уровне, также как и по коэффициенту подачи насоса λ (рис. 1.5).

У насосов с большей быстротой действия удельные параметры, как правило, лучше, чем у насосов с малой быстротой 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.

$W_{уд}, \text{Вт/(л/с)}$



Рис. 1.3. Удельная мощность ВНМУ и безмасляных насосов среднего вакуума

$M_{уд}, \text{ кг/(л/с)}$

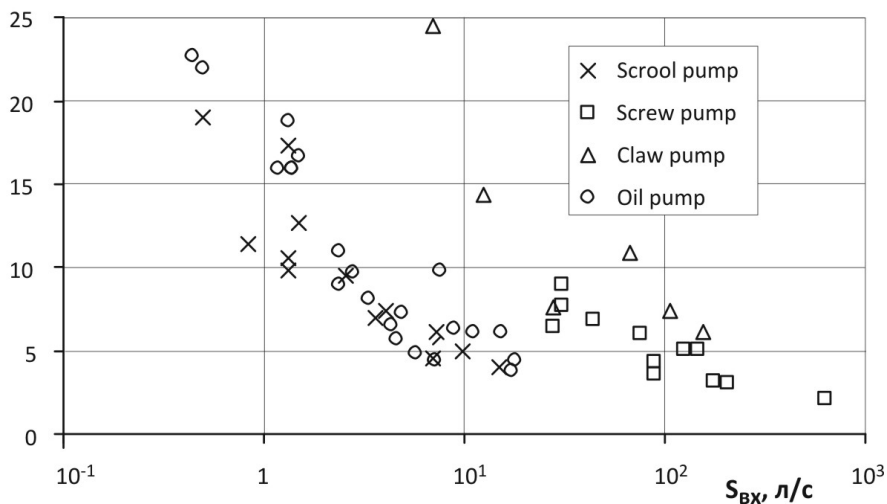


Рис. 1.4. Удельная масса ВНМУ и безмасляных насосов среднего вакуума

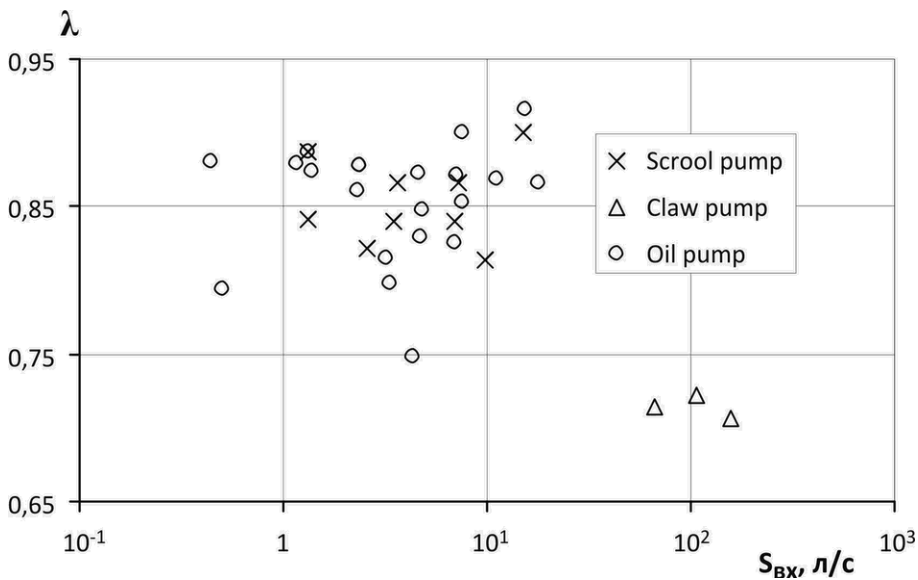


Рис. 1.5. Коэффициент подачи ВНМУ и безмасляных насосов среднего вакуума

Рассмотрим очень коротко конструктивные разновидности, откачные характеристики, достоинства и недостатки этих четырех серийно выпускаемых безмасляных машин.

1.1. Двухроторный вакуумный насос типа Рутс

Наиболее известной «сухой» машиной является ДВН типа Рутс (рис. 1.6). Анализ достоинств и недостатков различных типов бесконтактных машин [10] показал, что в области режимов, где потери от внешнего сжатия соизмеримы с другими видами потерь, насосы и компрессоры типа Рутс остаются вне конкуренции [17]. Доля ДВН от всех выпускаемых безмасляных насосов с быстротой действия до 30 л/с — 50%, свыше 30 л/с — 43,2% . По отношению к бесконтактным системам эти проценты еще выше. С 1997 года ежегодный рост объема выпуска ДВН составляет более 4%, а по количеству предложений средств откачки насосы типа Рутс прочно занимают второе место в мире (рис. 1.7), незначительно уступая лишь традиционно популярным пластинчато-роторным. И это не считая машин, выпускаемых в качестве воздуходувок.

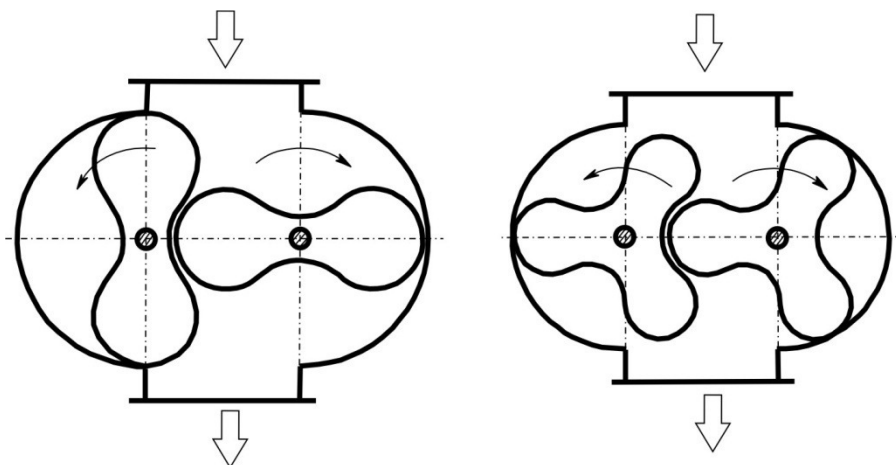


Рис. 1.6. ДВН типа Рутс