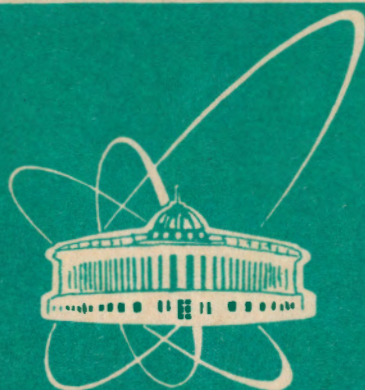


93 - 281



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-93-281

М.Н.Вергеш-Туняк

**АБСОЛЮТНО БЕЗМАСЛЯНЫЙ ВАКУУМ —
НОВОЕ В ЗАРУБЕЖНОЙ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ**
(по материалам II и III Европейских
вакуумных конференций)

I часть — Безмасляные средства откачки
в интервале: граница низкий — средний,
средний и высокий вакуум

Направлено в журнал «Вакуумная техника и технология»

1993

Введение

Бурное развитие микроэлектроники за последние 10÷15 лет и острая потребность в обеспечении безмасляными средствами откачки ее технологического оборудования дали мощный импульс для появления на мировой арене безмасляных насосов практически на все диапазоны вакуума со сравнительно большим выбором безмасляных форвакуумных насосов.

Техника современных физических и космических исследований, предъявляющая к вакууму аналогичные требования в создании чистого, не содержащего углеводороды, безмасляного вакуума получила таким косвенным образом набор нужных ей "чистых" средств откачки.

Под понятием безмасляный вакуум ранее (в первой половине последних 20 лет) понималось полное отсутствие паров рабочих жидкостей в откачиваемой системе, а безмасляными средствами откачки считались те, в которых отсутствовали рабочие жидкости и смазки.

В настоящее время безмасляным (чистым) вакуумом считается вакуумная среда, не содержащая тяжелых углеводородов с м/е более 44 [1,11].

На II-й (Триест, май 1990 г.) и III-й (Вена, сентябрь 1991 г.) Европейских Вакуумных конференциях, участницей которых являлась автор этих строк, была представлена широкая экспозиция зарубежных безмасляных средств откачки. Этот обзор посвящен рассмотрению увиденного в следующей последовательности:

безмасляные средства откачки на границе низкий ÷ средний вакуум, т.е. работающие в области давления ~650 Па ÷ 0,133 Па ($5,0 \div 10^{-3}$ торр);

затем современные безмасляные насосы для области высокого ва-

куума с интервалом давления $0,133 \text{ Па} \div 1,33 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ ($10^{-3} \div 10^{-7}$ торр)

и, наконец, насосы для сверхвысокого вакуума – ниже $1,33 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ (ниже 10^{-7} торр). При этом рассмотрению подлежат не отдельные экспериментальные образцы, а насосы, вышедшие в серийное производство.

Нужно отметить, что необходимость в безмасляных форвакуумных насосах возникла еще в 60-х годах при появлении магниторазрядных высоковакуумных насосов и была удовлетворена на том уровне развития вакуумной техники использованием форвакуумных цеолитовых насосов и насосов с масляным уплотнением, подсоединяемых к высоковакуумной системе через сорбционные охлаждаемые жидким азотом ловушки. Однако оба эти способа создания "безмасляности" имеют много недостатков, а второй – не может полностью исключить попадание углеводородов в высоковакуумную часть откачиваемых систем.

I. Безмасляные средства откачки на диапазон давлений $650 \text{ Па} \div 1,33 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ ($5,0 \div 1 \cdot 10^{-3}$ торр, $6,5 \text{ мбар} \div 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ мбар}$)

1. *Диафрагменные (мембранные) насосы на диапазон давлений до 200 Па ($\approx 1,5$ торр, 2 мбар).*

Первые их разработки были сделаны лет 20 тому назад и они широко используются в химической промышленности для откачки агрессивных газов и паров, в медицинской и в аналитической аппаратуре и там, где требуется низкий безмасляный вакуум. Насосы этого типа выпускаются многими зарубежными фирмами.

В вакуумной технике диафрагменные насосы, очевидно, производства фирмы Ribeg, впервые были применены французской фирмой Alcatel в середине 70-х годов в качестве форнасоса к гибриднему турбомолекулярному насосу [1]. Это стало возможным вследствие того, что

вышеназванной фирме к этому моменту времени удалось разработать конструкцию такого диафрагменного насоса, который обеспечивал высокий коэффициент компрессии откачиваемого газа при относительно высоком рабочем давлении $\sim 5 \cdot 10^2$ Па (~ 5 мбар) [1].

Абсолютная величина рабочего давления диафрагменного насоса, примененного в вакуумной технике, на 2 порядка меньше, чем диафрагменных насосов, применяемых для других вышеназванных целей, где это давление [2] имеет среднее значение $2 \cdot 10^4$ Па (300 мбар).

Принцип действия диафрагменных насосов основан на перемещении диафрагмы, изготовленной особым образом, по специальной геометрии в цилиндрической, рабочей части насоса, сжатие ею откачиваемого газа и выталкивание его из одной ступени насоса в другую. Это обеспечивает получение достаточно низкого вакуума – до $2 \cdot 10^2$ Па (2 мбар) для 4-х цилиндрических, 3-х ступенчатых насосов типа MD-4 (MD4C) фирмы Vacuubrand, имеющих к тому же минимальное мертвое пространство – и обеспечивает достижение достаточно большой производительности – в 0,95 л/с (3,4 м³/час) [3]. На рис.1 показано внутреннее устройство диафрагменного насоса на примере двухступенчатого диафрагменного насоса DIVAC 2,4L фирмы Leybold A.G. [4]. Фирма Vacuubrand в своем проспекте [3] не приводит ни схемы, ни фотографии внутреннего устройства своих диафрагменных насосов.

На выставках вакуумного оборудования при II-ой и III-ей Европейских вакуумных конференциях были представлены некоторые диафрагменные насосы фирмы Vacuubrand и диафрагменный насос DIVAC 2,4L фирмы Leybold A.G. Их технические данные приведены в таблице 1. Фирма Vacuubrand, возникшая в 1961 году, занимается разработкой и производством диафрагменных насосов последние 10 лет, добившись значительных результатов [3]. Она производит самую массивную се-

рию этих насосов с большим разнообразием технических параметров (P_{min} , S_H и др.). Оптимизированная кинетика перемещения диафрагмы обеспечивает минимальную изнашиваемость ее. Для диафрагменных насосов этой фирмы характерны:

большое время жизни, высокая надежность, низкий уровень шума и полное отсутствие загрязнения окружающей среды. Диафрагмы – легкозаменяемы, а насосы имеют компактную конструкцию. Внешний вид насоса MD-4 приведен на рис.2, а кривые откачки на – рис.3. Они обеспечивают абсолютно безмасляный форвакуум и используются в качестве насосов предварительной откачки к турбомолекулярным, молекулярным и крионасосам, что и будет рассматриваться ниже.

Фирма Vacubrand выпускает две разные серии диафрагменных насосов – стандартную серию и серию – "С" – химически- и коррозионностойкую. Эта фирма выпускает одно-, двух- и трехступенчатые диафрагменные насосы. В определенные типы насосов встроены газобалластные вентили.

При изготовлении этих насосов используются конструктивные материалы с хорошими вакуумными средствами. Так, для стандартной серии: – рабочий цилиндр из – Al –; диафрагма – креплёный витон; вентили – с винтовыми уплотнениями; соединяющие элементы – анодированный – Al; – соединительные трубки – из полиамида. Для химически- и коррозионностойкой серии "С": рабочий цилиндр – комбинация перфторированного полиэтилена и эпоксидных смол; диафрагма – сэндвич из перфторированного полиэтилена и пербувана; вентили – из Kalreza; соединяющие элементы – из специального пластика ETEF; соединительные трубки – из перфторированного полиэтилена.

Не могла остаться в стороне от разработки и производства диафрагменных насосов и такая универсальная вакуумная фирма, как

Leybold-Heraeus (Leybold A.G.), и в 1991 году выпустила I-ый тип двухступенчатого диафрагменного насоса, – насос DIVAC – 2,4L, с минимальным остаточным давлением $P_{\text{мин}}=10^3$ Па (10 мбар) и со скоростью откачки $S_n=0,67$ л/с (2,4 м³/час) [4]. Особенностью этого насоса является применение диафрагмы новой, усовершенствованной формы. Поскольку предельный вакуум, создаваемый этим насосом, – грубый вакуум – 10^3 Па, то он нашел применение только в лабораторной практике вместо водоструйных насосов. В ближайшее время ожидается появление на мировой арене вакуумных диафрагменных насосов этой фирмы. В качестве конструктивных материалов в них используются химически- и коррозионностойкие материалы: политетрафторэтилен (PTFE) и пластик PVDF, обладающие одновременно и хорошими вакуумными свойствами [4].

Предельный вакуум в 200 Па (2 мбар), создаваемый диафрагменными насосами, ограничивается экономическими соображениями [9].

2. Безмасляные поршневые вакуумные насосы на диапазон давлений до 1 Па (10^{-2} мбар)

Поршневые вакуумные насосы с масляной смазкой поршней существуют давно и широко используются промышленностью для создания грубого вакуума.

Американская фирма Varian разработала и с 1988 г. начала серийный выпуск безмасляного поршневого (reciprocating piston) четырехступенчатого насоса DVP–500 с предельным остаточным давлением $P_{\text{мин}}=1$ Па ($1 \cdot 10^{-2}$ мбар). Быстрота действия, записанная в каталоге, 6,25 л/с (22,5 м³/час) [6]. Насос этого типа экспонировался на выставочном стенде фирмы Varian при II-ой Европейской вакуумной

конференции, а ведущим специалистом фирмы Dr. M.Hablanian на конференции был представлен доклад об этом насосе [7]. На рис.4 приведена принципиальная схема насоса DVP-500. Американцы называют принцип действия своего насоса – принципом "перевернутых поршней". Насос имеет 4 поршня одинакового размера диаметром 100 мм каждый, в форме "ступеньки лестницы" с величиной хода δ 1 дюйм. Цилиндры ступеней насоса располагаются по обе стороны от каждого из двух стержней, смонтированных на эксцентричных выступах ведущего вала и приводящих в движение поршни. Подшипники ведущего вала постоянно смазываются специальной смазкой.

Для увеличения быстроты действия насоса два входных цилиндра соединены параллельно и являют собой I-ую ступень сжатия, третий цилиндр – II-ая ступень сжатия, а четвертый цилиндр с клапанами с обеих сторон является одновременно III-ей и IV-ой ступенью сжатия [7,8]. Скорость вращения мотора – 1200 об/мин, рабочее напряжение 220 ± 10 В, частота тока $50 \div 60$ Гц [6]. Цилиндры изготовлены из твердой стали, поршень – из Al – с твердым покрытием снаружи. Обе цилиндрические поверхности: поршня – наружная и цилиндра – внутренняя покрыты политетрафторэтиленом (PTFE), материалом с низким коэффициентом трения и малой скоростью износа. Насос обеспечивает отношение сжатия 100:1 с выбросом откачиваемых газов в атмосферу. Для достижения такого отношения сжатия поршень должен приблизиться к клапану на расстояние около 0,2 мм [7].

Выхлопные клапаны насоса дополнительно подпружинены. В области высокого впускного давления они работают, как в обычных компрессорах. В области низкого давления, близкого к предельному остаточному давлению, подпружиненный впускной клапан может не от-

крыться. Для исключения этого в каждый цилиндр откачиваемый газ попадает через боковые узкие щели, когда поршень в конце хода всасывания идет вниз. Для облегчения выталкивания поршнем выпускного клапана, если давление сжатого откачиваемого газа недостаточно для его открытия, на оконечной части тела поршня с меньшим диаметром имеется небольшой буфер. Он являет собой уплотнение из PTFE, которое прижимается к поверхности цилиндра с помощью кольцевого резинового уплотнения и имеет величину натекания $\approx 1 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ ($0,1 \text{ мбар} \times 1/\text{с}$) [6,7,8,10].

На рис.5 приводится чертеж внешнего вида насоса DVP-500, а кривые зависимости скорости откачки от давления приведены на рис.6.

Опыт опробования и последующей эксплуатации насоса DVP-500 показал, что откачка водяных паров и воздуха происходит в нем совсем по-другому, чем у форвакуумных масляных насосов. Удаление водяных паров и H_2 насосом DVP-500 продолжается и тогда, когда он достигает своего постоянного давления (см. приведенные кривые откачки). Это очень важно для области "перекрытия" - конца работы форвакуумных и начала работы высоковакуумных насосов. Было замечено, что турбомолекулярные насосы в паре с насосами DVP-500, вступавшие в работу после предварительной откачки реципиента до $p=30 \text{ Па}$ ($0,3 \text{ мбар}$), значительно быстрее достигали предельного вакуума, чем в паре с масляными форвакуумными насосами, снабженными сорбционными ловушками [7].

Однако необходимо более тщательно, чем для обычных форнасосов, выбирать области его применения - так этот насос хорошо применим для откачки чистых вакуумных систем: вакуумных систем ускорителей заряженных частиц, тороидов токамаков, имитаторов космического пространства, где оптимальное время использования насоса

будет составлять около 15000 часов (более 2-х лет) без необходимости проведения профилактического ремонта. Для вакуумных систем микроэлектроники, где нужно откачивать легко конденсируемые пары с применением газобалласта, при откачке газов в смеси с твердыми частицами - с применением фильтров, при откачке агрессивных газов - с применением специальных улавливателей их - это время будет равняться 8000÷10000 часов. В спектре остаточных газов отсутствуют ионы с массовыми числами более 44-х (отсутствие тяжелых углеводородов) и с массовыми числами 50, 64, 69, 119, что говорит об отсутствии термического разложения политetraфторэтиленового покрытия внутренних деталей насоса [10,19]. Этот насос в комбинации с "чистым" высоковакуумным насосом является прекрасным средством для создания "чистого" высокого и сверхвысокого вакуума. Технические данные насоса DVP-500 приведены в таблице 1.

3. Безмасляные форвакуумные насосы с ротором типа CLAW (кулачково-зубчатым профилем ротора) на диапазон давлений 1 Па и менее

На стендах фирмы Edwards и Leybold A.G. при II-ой и III-ей Европейских вакуумных конференциях была представлена обширная информация о насосах этого типа: схемы внутреннего устройства насосов, проспекты фирм. Кроме того, на конференциях по этим насосам было сделано несколько докладов.

Концепция разработки принципа действия насоса относится к патенту A.J.Northey от 1933 года [12], после появления которого в вакуумную технику вошло понятие насос Northey с ротором типа Claw (клешня), с последующим использованием множества до этого времени

не осуществленных патентов [13]. О новом насосе с использованием одной ступени ротора типа Рутса и двух ступеней ротора типа Слав написал впервые в своей статье 1987-ом году Н. Wycliffe [15]. На рис.7 приводится схематичное устройство ступени такого насоса [14]. Цилиндрические роторы на $3/4$ -ти длины окружности имеют зубообразный выступ и сразу за ним углубление. Роторы синхронно вращаются друг другу навстречу и почти соприкасаются по поверхности. Под правым ротором находится всасывающее отверстие, под левым – выпускное. Цикл откачки состоит из следующих фаз (см.рис.7):

1-я фаза – а) при вращении роторов открывается всасывающий канал и газ поступает в пространство – I; – б) в это время в пространстве – С – начинается сжатие.

2-ая фаза – а) объем всасывания – I – увеличивается дальше (всасывающее отверстие открыто); б) в объеме – С – сжатый в предыдущем цикле газ выталкивается через открывающееся выхлопное отверстие.

3-я фаза – а) фаза всасывания окончена, входной канал закрыт; б) сжатие закончено, газ вытолкнут. Некоторое количество газа "закрыто" во вредном – с – пространстве.

4-ая фаза – это позиция "смены мест". Уплотнение между обоими роторами сохраняется, стартует новый цикл откачки [14].

В своей статье Wycliffe [15] показывает, что ступени с роторами типа Рутса дают высокую объемную производительность при низком давлении, но низкую степень сжатия – 25 при $p=100$ Па и не могут работать при больших перепадах давлений. Ступени же с роторами Слав обеспечивают высокую степень сжатия – 50 при 150 Па и 25 при 10^5 Па, но при низком давлении имеют меньшую объемную производительность, чем ступень с ротором Рутса. Комбинация ступеней этих обоих типов позволяет получить при низком давлении значительную

объемную производительность и высокую степень сжатия (до 10^5), предельное остаточное давление в 1 Па (10^{-2} мбар) при выпускном давлении 10^5 Па. Причем на входе в насос, т.е. 1-ой ступенью из-за некоторых конструктивных соображений, должна стоять ступень с ротором Рутса [15]. Английская фирма Edwards с 1988 года выпускает серию форвакуумных безмасляных насосов DRY STAR, в которой использован ротор типа Рутса в комбинации с 3-мя или с 2-мя роторами типа Claw, смонтированными на общей оси и находящимися в корректной фазе с 2-мя времязадающими шестернями. Различные рабочие механизмы этих роторов так подобраны и скорректированы, что каждый из них работает в оптимальном для себя интервале и, кроме вышеназванных параметров, работает еще с низкой энергозатратой в области предельного остаточного давления. Она возрастает при увеличении впускного давления и достигает максимума при давлении 10^5 Па.

Кроме того, в насосах этого типа имеется самый короткий путь [17] для прохождения его откачиваемым газом и он составляет только 60% от пути, проходимого им в других насосах подобной конструкции. Естественно, что в этих насосах отсутствует масляная уплотняющая среда. Они хорошо себя зарекомендовали в условиях постоянной эксплуатации с выбросом откачиваемых газов в атмосферу [16,18].

Корпус насоса изготавливается из чугуна, роторы и валы – из стали. Коробка передач и камеры подшипников изолированы от внутреннего объема насоса динамическим уплотнением валов. Подшипники и шестерни коробки передач смазываются смазкой на перфторированном полиэфире [11,16]. Через специальный вентиль между ступенями насоса может подаваться любой промывочный газ для разбавления откачиваемых газов и паров. Поскольку сжатие откачиваемого газа до

стигает достаточно больших значений, насос разогревается. Поэтому предусмотрено охлаждение его водой.

На рис.8 приведено внутреннее устройство насоса DRY STAR, а на рис.9 – сравнительные кривые откачки насосов с $S_n=22$ л/с (0.022 м³/с) с роторами только типа Claw и с запатентованной фирмой Edwards комбинацией роторов Рутс+Claw. В таблице 2 приведены основные технические данные насосов DRYSTAR-40-, 80-, и DRYSTAR systems-DP-250/80, DP-500A/80.

Спектр остаточных газов над насосами DRYSTAR, в комбинации с бустером-насосом Рутс, как показали исследования, проведенные Laurenson-ом и др. [19], содержит осколки нетяжелых (до $m/e=44$) углеводородов и осколки молекул перфторированного полиэфира (с m/e 50,64,69,99,119) в 1000 раз меньшем количестве, чем спектр остаточных газов для обычных ротационных форвакуумных насосов, заполненных маслом типа Fomblin – на перфторированном полиэфире (PFPE).

Для уменьшения на два порядка – до 10^{-2} Па предельного остаточного давления и увеличения скорости откачки в 3÷5 раз фирма Edwards предложила комбинацию насосов DRYSTAR с механическим бустерным насосом типа Рутса (Модели EH-250, EH500A), у которой валы и подшипники тоже смазываются смазкой на перфторированном полиэфире. Это – DRYSTAR systems. Laurenson указывает, что пары осколков PFPE обладают большой проникающей способностью, и вакуумные системы, в которых они могут мешать, нужно защищать ловушками с определенными сорбционными материалами, размещаемыми одна между насосами и другая на входном отверстии бустерного насоса [19]. Пары PFPE всегда остаются в газовой фазе, не образуя пленочных покрытий. На рис.10 приведен внешний вид насоса DRYSTAR, а на рис.11 комбинации насосов – DRYSTAR systems. В таблице 2 — основные технические данные насосов и комбинации насосов.

Фирма Leybold AG (ФРГ) с конца 1990 г. [20,21] выпускает на рынок целую серию ею разработанных четырехступенчатых безмасляных форвакуумных насосов DRYVAC с выхлопом откачиваемых газов в атмосферу. Все четыре ротора являются роторами типа Claw. На рис.12 приведен внешний вид насосов серии DRYVAC. Построение насоса вертикальное, ступени насоса располагаются одна на другой и между ними находятся промежуточные перегородки с каналами для перетекания откачиваемого газа. В перегородки впрессованы трубки после II-ой, III-ей и IV-ой ступени для введения промывочного газа в ступени насоса. Части насоса соединяются друг с другом особыми штифтами. Высокая точность сборки при соединении деталей этими штифтами делает возможным быструю замену деталей насоса в случае необходимости. Откачиваемый газ либо любая откачиваемая среда передвигаются в насосе вертикально сверху вниз, и благодаря вертикальному расположению ступеней насоса, частицы, находящиеся в откачиваемом газе, не оседают в ступенях, а могут накапливаться только на промежуточных перегородках, откуда удаляются при продувке насоса балластным газом через впрессованные трубки. В качестве балластного газа используют сухой азот либо инертные газы.

Роторы насосов серии DRYVAC приводятся в синхронное вращение электродвигателем с 3000 об/мин через шестерни, смазываемые смазкой на перфторполиэфире. Коробка передач отделена от внутренней части насоса уплотнением, исключая проникновение смазки в насос. К этому уплотнению может быть подведен промывочный газ, что защищает его от действия агрессивных сред. Зоны размещения подшипников и уплотнения валов охлаждаются водой.

Насосы снабжены впускными клапанами, закрывающимися авто-

матически при его остановке и отсекающим от насоса откачиваемый объем, а также выпускными клапанами, предотвращающими попадание атмосферы в насос при его остановке. За выпускным клапаном располагается ловушка ДАК, в которую может подаваться промывочный газ.

Контроль и управление работой насосов осуществляется через датчики температуры, давления и расхода инертного газа дистанционно, с автономного пульта управления. В таблице 2 приведены основные характеристики насосов этой серии [20,21,11]. В начале работы над серией DRYVAC фирма Leybold A.G. выпускала только насос DRYVAC M100S, но затем разработала серию форвакуумных насосов с облегченной, мобильной конструкцией, с улучшенным дизайном и увеличенным количеством насосов на разные значения скоростей откачки: от 7 л/с (0,007 м³/с) до 139 л/с (0,139 м³/с) и с величиной создаваемого предельного вакуума от 6 Па до 0,3 Па ($6 \cdot 10^{-3}$ мбар) . В зависимости от оснащённости насоса контрольными, измерительными и указательными приборами существуют насосы DRYVAC -B, -E, -S серий [21,25]. Насосы DRYVAC специально сконструированы и предназначены для использования в технологических процессах микроэлектроники. В то время, как насосы фирмы Edwards серии DRY STAR, особенно в комбинации с бустером Рутса, благодаря своему низкому предельному давлению, безмасляности и высокой производительности могут и должны найти широкое применение в вакуумных системах ускорителей заряженных частиц, управляемых термоядерных реакций и имитаторов космического пространства.

II – Безмасляный насос и комбинированная вакуумная система на нем на диапазон высокого вакуума от 0,133 Па до $1,33 \cdot 10^{-5}$ Па ($1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-7}$ торр)

Французская фирма Alcatel еще в 1975 году начала выпускать серию гибридных турбомолекулярных насосов, являющих собой 3 последовательно соединенные ступени: турбомолекулярную ступень, молекулярный насос Хольвека и газодинамическое уплотнение, которое очень резко поднимает границу выпускного давления насоса и являет собой тот же насос Хольвека, но с профилированными спиральными канавками меньше, чем у него размеров, – в несколько десятков мкм на валу и такого же порядка зазором между валом и корпусом. Насос имел аэростатическое подвешивание подшипников, работал в обычном откачном режиме с выхлопом на атмосферу. Но в интервале давления $100 \text{ Па} \div 2 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ к нему, в качестве форнасоса, подсоединялся диафрагменный насос, помогавший гибриднему насосу при высоком давлении (вязкостной режим) обеспечивать большое отношение сжатия [22,23,11]. Это был абсолютно безмасляный насос, но прецизионность его конструкции, исходящие из этого жесткие требования его эксплуатации и необходимость использования специально разработанных компрессоров резко ограничили его применение, а потом заставили фирму снять его с производства. На рис.13 представлен гибридный насос фирмы Alcatel конструкции и 1975 года.

В 1984/85 годах L.Maurice и C.Saulgeot разработали новую версию современного варианта насоса Хольвека, так называемого Molecular Drag Pump, насоса – MDP-, называемого еще Spiromolekularpumpen.

Насосы MDP – имеют:

– на входе – ”ступень наполнения”, являющую собой верхнюю часть

ротора с расположенными по его краям определенного размера лопатками, устанавливаемыми для каждого из типов MDP-насосов под определенным углом (см.рис.14). Назначение этой ступени – захватывание молекул откачиваемого газа и придания им импульса в направлении "внутри насоса" к собственно насосу Хольвека – 4-ем профилированным спиральным канавкам достаточно больших размеров, проточенным в корпусе насоса, и вращающемуся ротору, увлекающему молекулы, – это молекулярная ступень. Пройдя молекулярную ступень Хольвека, молекулы откачиваемых газов затягиваются в спиральные канавки динамического уплотнения значительно большего размера и с большим зазором, чем у гибридного насоса. В молекулярной ступени откачиваемый газ получает достаточное сжатие, которое затем значительно увеличивается в пространстве динамического уплотнения: у насоса MDP-5010 окончательное отношение сжатия для N_2 – 10^9 , для He – $2 \cdot 10^4$, для H_2 – $1 \cdot 10^3$, а у насоса MDP-5030 этот коэффициент сжатия для указанных газов на порядок меньше.

Из зазора с динамическим уплотнением сжатый газ выталкивается через внутренние каналы к выхлопному патрубку. Из-за вышеописанных явлений уплотненный откачиваемый газ создает на выхлопе – у насоса MDP-5010 выпускное давление $P_{\text{вып.}} = 4 \cdot 10^3$ Па (40 мбар), а у насоса MDP-5030 – 10^3 Па (10 мбар), что делает возможным использовать в паре вместе с ними диафрагменные безмасляные насосы. Естественно, что фирма Alcatel использовала эту возможность и создала комбинированные откачные системы Drytel-30, Drytel-100 и Drytel micro. В таблице 3 приводятся технические данные насосов MDP-5010 и MDP-5030, а также откачных систем Drytel-30, -100, micro. А на рис.15 – внутреннее устройство насоса серии MDP, на рис.16 – внешний вид системы Drytel-100. Насос MDP-5030 охлаждается водой, а MDP-5010 – воздухом.

В насосах этой серии применены подшипники, смазываемые консистентной смазкой, но поскольку подшипники расположены в зоне высокого выпускного давления и смазка имеет низкую упругость пара, то полностью исключается возможность противодиффузии паров смазки в реципиент. Предельное остаточное давление, создаваемое насосами – $1 \cdot 10^{-6}$ Па ($1 \cdot 10^{-8}$ мбар) в системах с металлическими прокладками и $1 \cdot 10^{-4}$ Па ($1 \cdot 10^{-6}$ мбар) – с витоновыми, быстрота же откачивающего действия насосов 7,5 л/с ($0,0075 \text{ м}^3/\text{с}$) – для MDP-5010 и 27 л/с ($0,027 \text{ м}^3/\text{с}$) для MDP-5030 по N_2 . На рис. 17 представлен типичный спектр остаточных газов над комбинацией насосов DRYTEL.

На рис.18 представлены кривые зависимости быстроты откачивающего действия S_n и выхода ее на максимальное значение приходится на ту область давлений $60 \text{ Па} \div 7 \text{ Па}$ (от $6 \cdot 10^{-1}$ мбар – до $7 \cdot 10^{-2}$ мбар), когда у форвакуумных насосов и насосов типа Рутса (см.рис.19) она начинает сильно заваливаться, а обычные турбомолекулярные насосы еще не достигли и $20 \div 30\%$ от своей оптимальной – S_n .

Системы Drytel полностью автоматизированы, имеют уменьшенную потребляемую мощность и меньшую массу, чем вакуумные агрегаты на ротационных и турбомолекулярных насосах. Они очень компактны [23,24,11].

Создавая высокий безмасляный вакуум, с хорошей скоростью откачки и высоким коэффициентом компрессии системы DRYTEL мгновенно нашли применение в создании безмасляного вакуума для ускорителей заряженных частиц. Многие участники II-ой Европейской вакуумной конференции в Триесте в 1990 г. стали свидетелями их применения для откачки вакуумных элементов накопительных колец строящегося синхротрона. На сверхвысокий вакуум вакуумная система по-

сле откачки Drytel может выводиться высоковакуумными насосами с использованием N.E.G.-а (Non Evaporated Getters), магниторазрядными либо крионасосами.



Рис.1. – Внутреннее устройство 2-х ступенчатого диафрагменного насоса (насос Divac 2,4L фирмы Leybold A.G.).

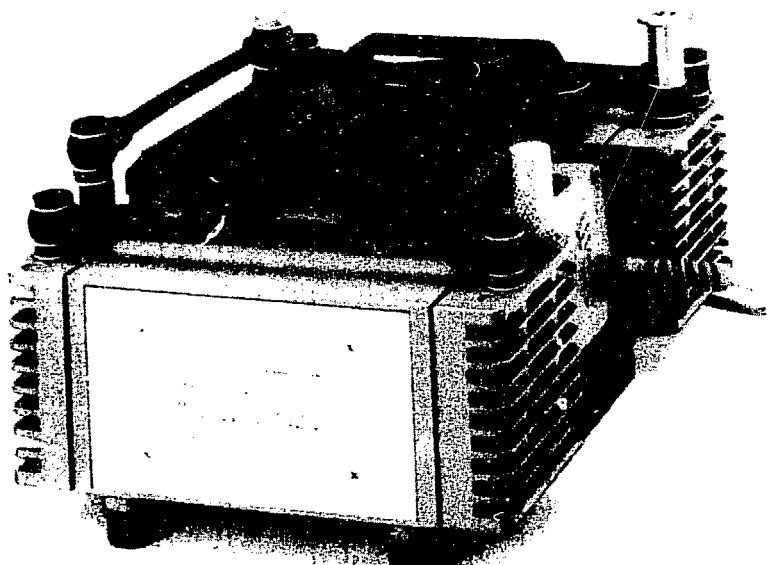


Рис.2. – Внешний вид диафрагменного насоса MD-4 фирмы Vacuubrand.

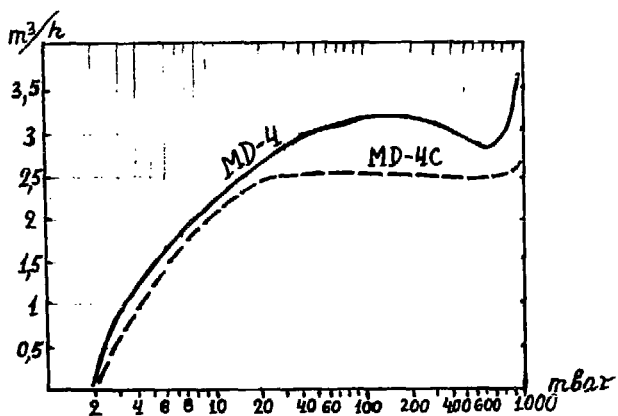


Рис.3. — Типичные кривые зависимости быстроты откачивающего действия от давления диафрагменного насоса MD-4; MD-4C.

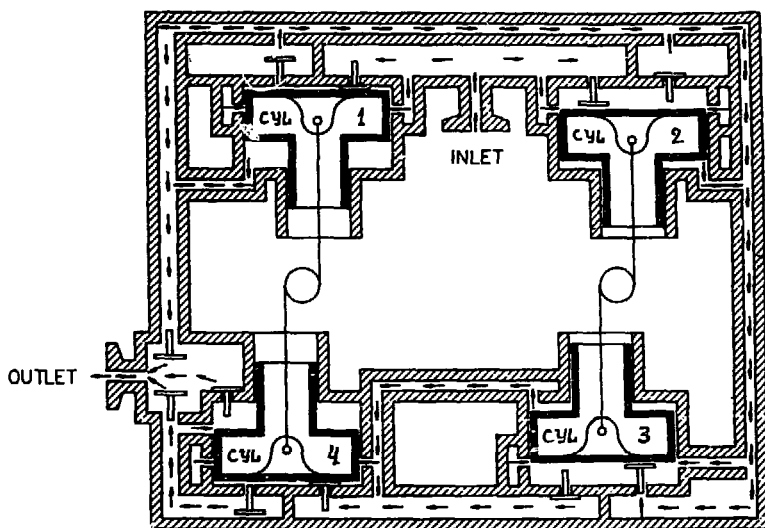


Рис.4. — Принципиальная схема внутреннего устройства безмасляного поршневого насоса VDP-500 фирмы Varian.

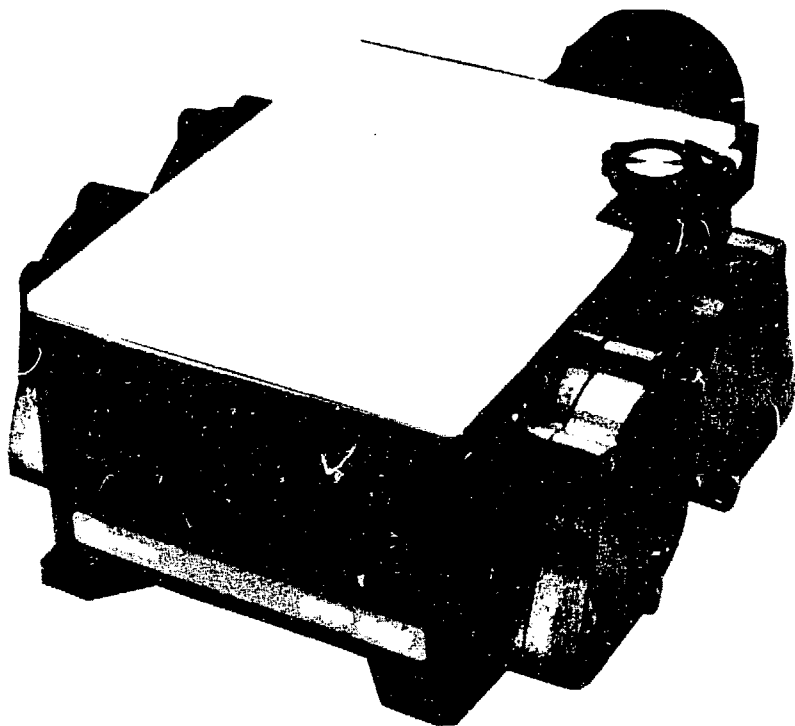


Рис.5. - Внешний вид насоса DVP-500.

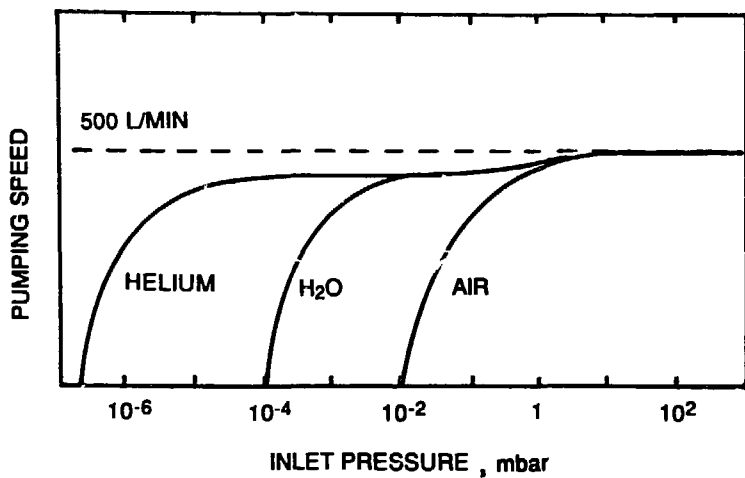


Рис.6. - Кривые зависимости быстроты откачивающего действия от давления насоса DVP-500 для разных газов и паров. 19

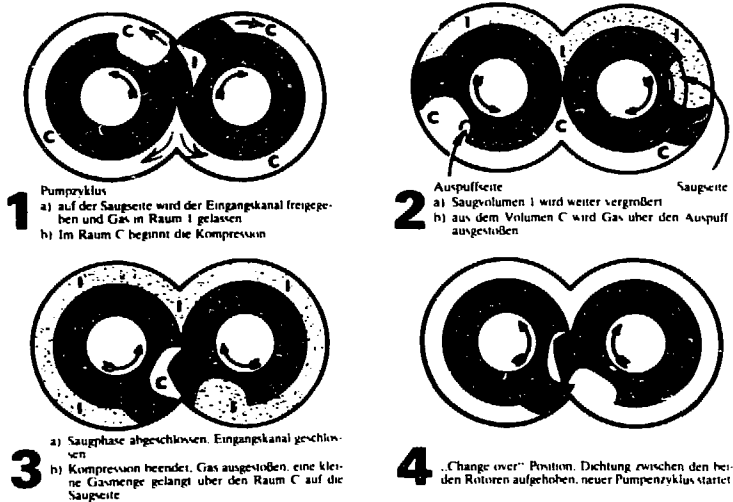


Рис.7. – Схема демонстрации по фазам откачного принципа действия насоса со ступенью Clow.

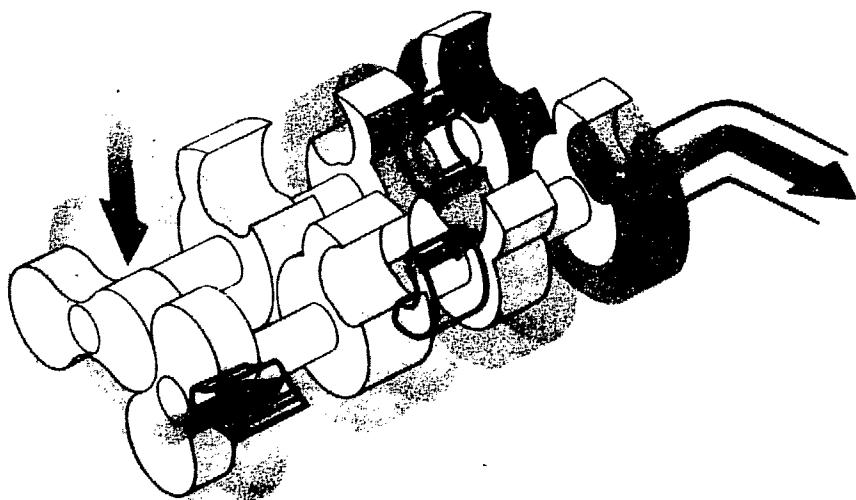
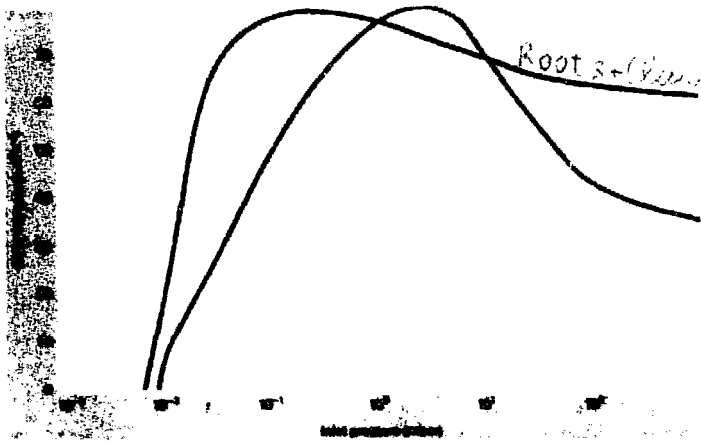


Рис.8. – Внутреннее устройство насоса DRYSTAR фирмы Edwards.



— Conventional $80\text{m}^3\text{h}^{-1}$ multi-stage claw only configuration
 - - - Drystar DP80 with Edwards patented Roots+claw configuration

Рис.9. — Сравнительные кривые зависимости быстроты откачивающего действия от давления для насосов только с роторами Claw и комбинацией Рутс+Claw роторов.

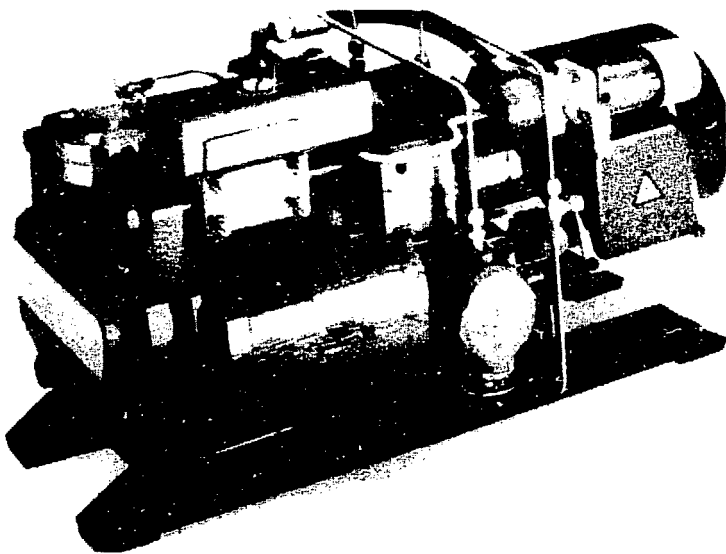


Рис.10. — Внешний вид насоса DRYSTAR-80 фирмы Edwards.

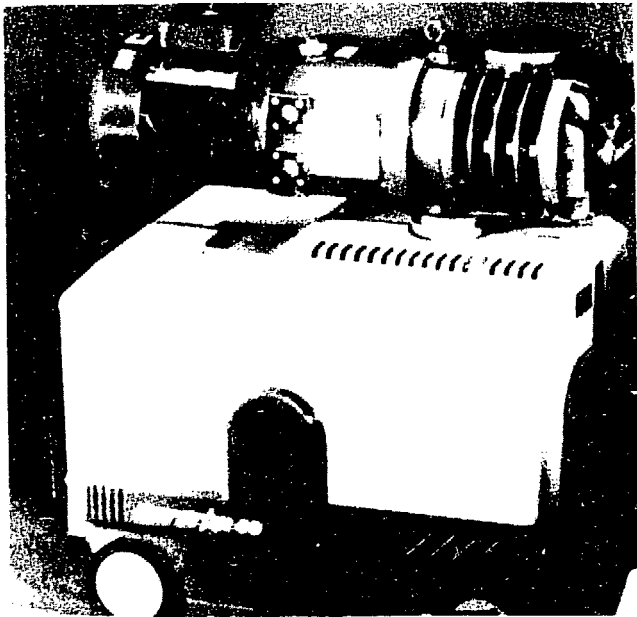


Рис.11. – Внешний вид комбинации насосов DRYSTAR и бустера Рутса (фирма Edwards).

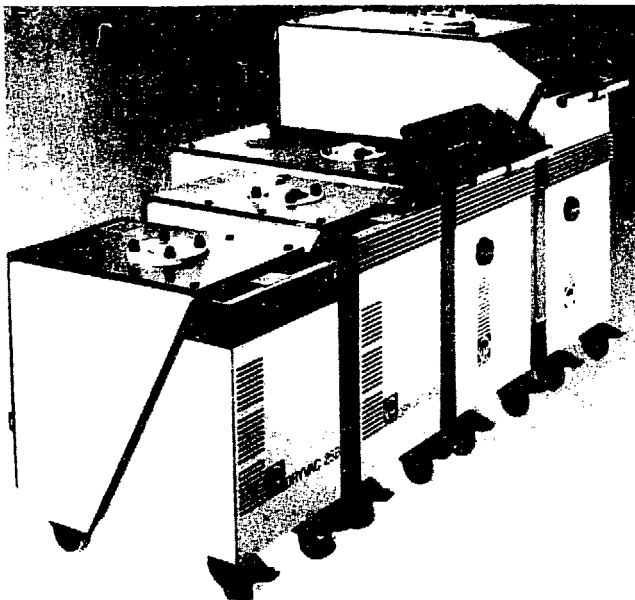


Рис.12. – Внешний вид насосов серии DRYVAC фирмы Leybold A.G.

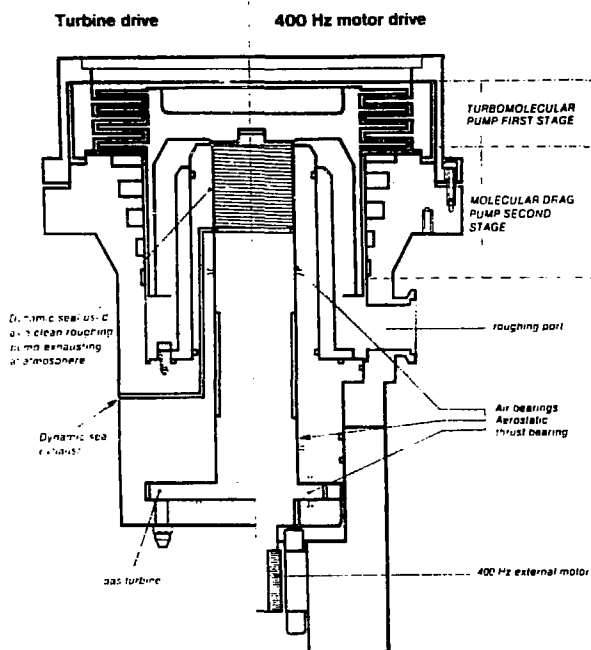


Рис.13. – Внутреннее устройство гибридного турбомолекулярного насоса на аэростатических опорах фирмы Alcatel (1975 г.).

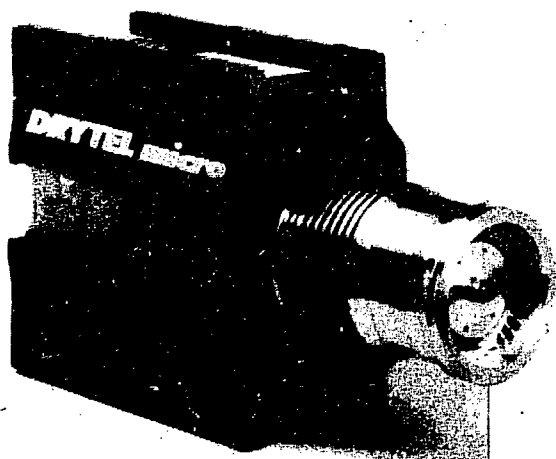


Рис.14. – Внешний вид насоса серии MDP фирмы Alcatel (в комплексе DRYTEL micro).

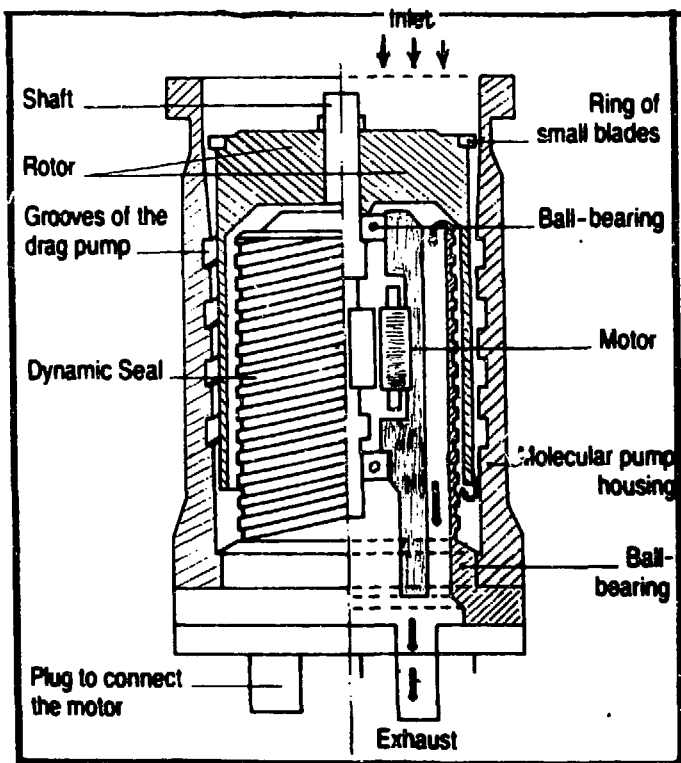


Рис.15. - Внутреннее устройство насоса MDP серии, типа MDP 5010.

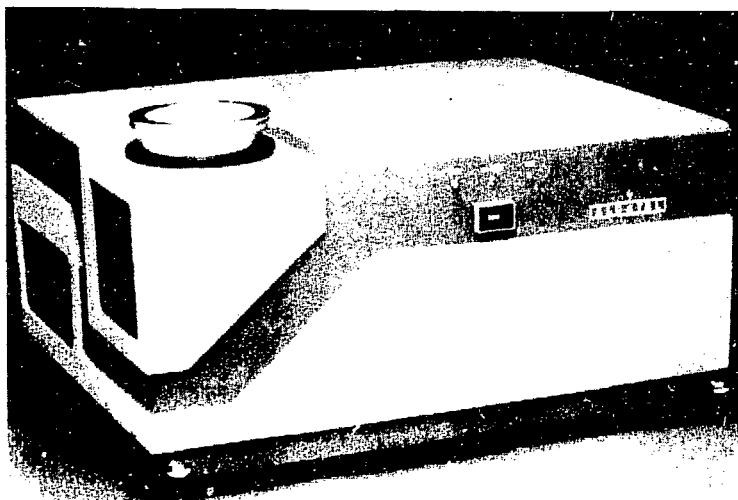


Рис.16. - Внешний вид откачной комбинированной системы DRYTEL-100. 24

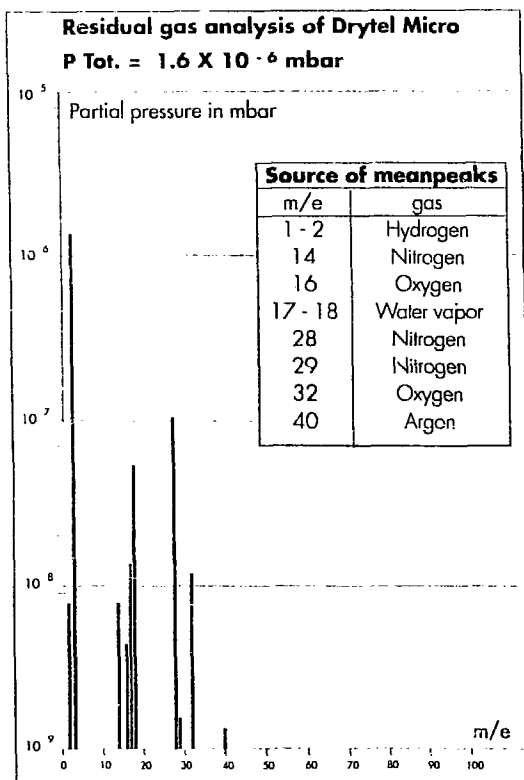


Рис.17. -- Типичный спектр остаточных газов вакуума, создаваемого комбинацией насосов системы DRYTEL.

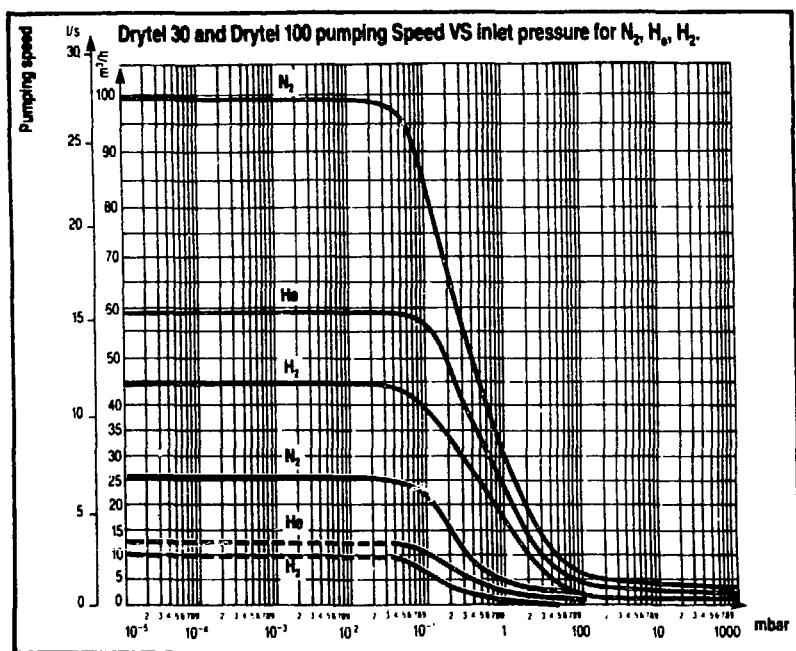


Рис.18. — Кривые зависимости быстроты откачивающего действия от давления откачивающих систем Drytel-30 и Drytel-100.

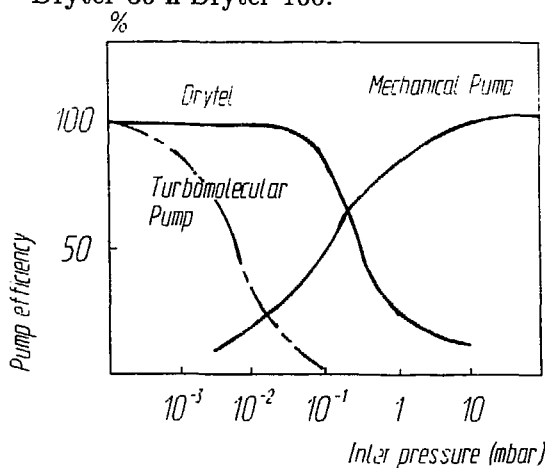


Рис.19. — Сравнение кривых зависимости быстроты откачивающего действия от давления систем DRYTEL, турбомолекулярных насосов и механических форвакуумных насосов.

Таблица 1

Технические данные диафрагменных форвакуумных насосов

Марка насосов	Быстрота откачивающего действия л/с	Предельное остаточное давление Па	Количество рабочих цилиндров	Количество ступеней сжатия	Число оборотов мотора в мин при 50 Hz	Мощность электродвигателя Вт	Масса кг	Габаритные размеры мм	Фирма-производитель, страна и стоимость
MZ2	0,56 л/с	$1,5 \times 10^3$ Па (15 мбар)	2	2	1.500	180	9.2	266×241×159	Vacuubrand. ФРГ
MZ2C	0.56	1.5×10^3 Па	2	2	1.500	180	9.7	266×241×159	— " —
ME4R	1.1	4×10^2 Па (4 мбар)	2	2	1.500	180	9.7	266×249×242	— " —
ME4P	0.84	7×10^2 Па (7 мбар)	2	2	1.500	180	9.7	— " —	— " —
MZ4C	1.1	1.5×10^3 Па	4	2	1.500	200	16	315×241×155	— " —
MZ4	1.1	1.5×10^3	4	2	1.500	200	15	— " —	— " —
MD4	0.95	2×10^2 Па (2 мбар)	4	3	1.500	200	15	— " —	— " —
MD4C	0.67	2×10^2 Па	4	3	1.500	200	16	— " —	— " —
DIVAC-2.4L	0.67	10^3 Па (10 мбар)	2	2	950	120	12.5	—	Leybold A.G. ФРГ 21500DM

Технические данные поршневого безмасляного форвакуумного насоса

DVP-500	6,26 л/с	1 Па	4	4	1.200 при 60 Hz	700	68	774×508×238	Varian S.p.A. USA
---------	----------	------	---	---	--------------------	-----	----	-------------	-------------------

Таблица 2

Технические данные механических безмасляных форвакуумных насосов
с ротором типа Claw (кулачко-зубчатый ротором)

Марка насосов и комбинирован- ных систем с ними	Быстрота откачиваю- щего дейст- вия л/с	Предельное остаточное давление Па	Число ступе- ней сжатия и количество роторов	Количество оборотов ротора в мин. (урт)	Наибольшее выпускное давление в Па	Мощность мотора кВт	Масса кг	Фирма-производитель, страна и стоимость
Насосы: DRY-STAR-40 QDP40	14,5	3 Па (3×10^{-2} мбар)	4 и 4	—	10^{+5}	2,2 → 1,2 в вакууме 4 → 2	164	Фирма Edwards, Англия;
DRY-STAR-80 QDP80	25,2	3 Па	4 и 4	—	10^5		202	35.400 DM (на 1992 г.) — 40.700 DM (на 1992 г.)
DRY-STAR SYSTEMS — насос DRY-STAR + Рутс (бустер):								
DP 250/80	86,3	4×10^{-2} Па	4 и 4	—	10^5	4 - для DRY-STAR насоса 1,5 - для бустера	347	Edwards, Англия Рутс EH-250 ~12.400 DM
DP 500A/80	140,4	3×10^{-2} Па	—	—	10^5	—	360	— Рутс EH-500A ~15.000 DM
Насосы: DRYVAC-25-B,E,S	при 50 Hz 6,95	6 Па	4 и 4	3.000 при 50 Hz 3.600 при 60 Hz	10^5	3	170 средн.	Leybold A.G., ФРГ: ~33.100 DM средняя
DRYVAC-50-B,E,S	12,51	4 Па	4 и 4	—	10^5	3	180 средн.	— ~37.500 DM
DRYVAC-100-B,E,S	27,8	1 Па	—	—	10^5	4	210 средн.	— ~55.200 DM
DRYVAC-151-S	34,75	2×10^{-1} Па	—	—	—	4,1—2,5 при $P_{отк.} \leq 10^{-1}$ mbar	280	—
DRYVAC-251-S	58,38	2×10^{-1} Па	—	—	—	—	290	—
DRYVAC-501-S	111,2	3×10^{-1} Па	—	—	—	6,2—3,4	360	—
								92.000 DM

Технические данные молекулярных (drag) насосов и комбинированных откачных систем с ними

Типы насосов и комбинированных систем с ними	Быстрота откачивающего действия л/с	Предельное остаточное давление в Па	Наибольшее выпускное давление в Па	Потребляемая электрическая мощность Вт	Масса кг	Габариты мм и скорость вращения ротора (грм)	Время выхода на номинальный режим мин	Фирма-производитель, страна и стоимость
Насосы:								
MDP-5010	по N ₂ - 7,5 по He - 4,0 по H ₂ - 3,1	1×10 ⁻⁶ Па (с метал. прокладкой)	10 Па	50	2,4	— 27.000	1,5	Alcatel. Франция
MDP-5030P	по N ₂ - 27 по He - 18 по H ₂ - 15	— —	10 ³ Па	150	6,0	- 27.000	1,5	— —
DRYTEL SYSTEMS – насос MDP + диафрагменный насос								
DRYTEL micro	по N ₂ - 7,5 по He - 4,0 по H ₂ - 3,1	1×10 ⁻⁴ Па (1×10 ⁻⁶ мбар)	10 ⁵	150—50 150 - в начале пуска; 50 - в постоянном рабочем режиме;	6,5	313×211×140 27.000	≤1,0	— —
DRYTEL-30	7,5	1×10 ⁻⁴ Па	10 ⁵	250—165	17	386×306×274 27.000	3	— — 46.000 французских франков (на 1992 г.)
DRYTEL-100	27,8	1×10 ⁻⁴ Па	10 ⁵	650—500	43	625×465×310	1,5	— — 58.000 французских франков (на 1992 г.)

Использованная литература

1. High vacuum technology. Vacuum components. Проспект фирмы Alcatel, 1978 г.
2. "Small vacuum pump series". Проспект фирмы Ulvac 1988 г.
3. Проспект фирмы Vacuubrand, 1989 г.
4. Divac 2,4L – проспект фирмы Leybold A.G., 1991 г.
5. F.J.Eckle, S.Blösl, et al. "A new concept for small dry vacuum systems", "Vuoto", 1990, Volume XX, N2, p.532-534 — Proceedings of 2nd European Vacuum conference (EVC-2).
6. Каталог фирмы Varian, 1989 г.
7. M.Hablanian, E.Bez, "Performance of oil-free rough vacuum pumps", Vuoto, 1990, Volume XX, N2, p.535-538.
8. "Varian dry vacuum pump – for complete oil-free vacuum" – prospect, "Vacuum", 1988, 38, N3.
9. M.H.Hablanian, "Design and performance of oil-free pumps", Vacuum, Volume 41, N7-9, p.1814-1818/1990.
10. E.Bez, D.G.Guarnaccia "Operational experience with totally oil-free rough vacuum pumps", Vacuum, Volume 41, N7-9, p.1819-1891/1990.
11. И.Ю.Гинденбург, А.Б.Цейтлин "Безмасляные механические форвакуумные насосы", Обзор ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, Серия ХМ-6, Москва, 1990 г.
12. A.I.Northey, British Patent Specification 499171 (25.VIII.1933).
13. Proceedings of meeting on "Clean pumping-techniques and applications" by the Vacuum Group at the Institute of Physics, University of Sussex, October 1990, – Vacuum, 1991, N..., p.953-955.
14. "Vakuumtechnik + Kryotechnik" – Проспект фирмы Klaus Schaefer and Co., 1990.
15. H.Wycliffe "Mechanical high-vacuum pumps with an oil-free swept volume", Journal Vacuum Science and Technology, -A-, 5, N4, 1987, p.2608-2611.

16. Проспекты фирмы Edwards - 1988 г., 1989 г.
17. U.K. Patent GB2088957B.
18. Проспект фирмы Edwards — DRY STAR SYSTEM, 1988.
19. L.Laurenson, D.Turrell, A.P.Troup "Practical Contamination — Free Dry Pump Combinations for Industrial Use" "Vuoto", 1990, Volume XX, N2, p.539-542.
20. Проспект фирмы Leybold A.G. - "DRYVAC-system", III.1990.
21. Проспект фирмы leybold A.G. - "DRYVAC-trockenvredichtende Vakumpumpe DRYVAC^R 25B,50B,100B,25E,50E,100E", X.1990.
22. Проспект фирмы Alcatel, 1978 г., — High Vacuum Technology, Vacuum components.
23. "Spiromolekularpumpen MDP-5010; MDP-5030,5030CP", Alcatel Hochvakuum1988.
24. Вакуумная техника — Каталоги фирмы Alcatel 1988, 1990 г.
25. "Trockenverdichtende Vakuumumpen - DRYVAC^R - 25-B;-E;-S; 50-B;-E;-S; 100-B;-E;-S; 151-S; 251-S; 501-S"; Проспект фирмы Leybold A.G., V, 1991.
26. DRYTEL micro - Проспект фирмы Alcatel, 1991 г.

**Рукопись поступила в издательский отдел
21 июля 1993 года.**