

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ.

СОВРЕМЕННЫЕ ФРАКЦИОНИРУЮЩИЕ НАСОСЫ

А. П. Невлев

Скорость действия 7000 л/сек*), предельное давление в 10^{-9} мм без применения ловушек, максимальное рабочее форвакуумное давление в 1 мм¹, способность масла как угодно долго выдерживать нагревание в кипятильнике при сообщении насоса с атмосферой² — вот последние достижения вакуумной техники, ставшие возможными благодаря применению фракционирующих насосов и современных высококачественных масел. Правда, 7000 л/сек были измерены при 10^{-8} мм, так что производительность насоса, определяемая произведением скорости действия на давление, при котором она измерена, равна всего около 10 мм³ при атмосферном давлении, но по сравнению с 1 л/сек для обычных ртутных лабораторных насосов это — величина громадная.

Насосы высокого вакуума с такой большой скоростью действия оказываются необходимыми в тех областях науки и техники, где требуется откачивать очень большие объёмы и трудно создать абсолютно надёжные вакуумные уплотнения.

Скорость действия построенного Лангмюром³¹ первого ртутного конденсационного насоса в 4 л/сек в своё время вполне удовлетворяла требованиям, превосходя в этом отношении все другие известные насосы. Давление в 10^{-6} — 10^{-7} мм, достигаемое при вымораживании ртутного пара жидким воздухом, было пределом мечтаний физиков, работающих в области высокого вакуума.

Существенным недостатком была потребность насоса в низком форвакуумном давлении. Это затруднение оказалось возможным обойти, применяя последовательное соединение насосов, так, что насосы (или насос), работавшие со стороны низкого вакуума, создавали (при слабом форвакууме) давление, достаточное для нормальной работы высоковакуумного насоса. В результате появились конструкции, в которых два и более насоса объединялись в один. Таковы многоступенчатые насосы Фольмера³², Ганфа и Бюста³³, Дюнуайе³⁴, стальной насос Гедде³⁴ и другие. При этом зазор у сопла, через который произво-

*) К моменту опубликования настоящей статьи стали известны³⁶ скорости действия в 12 000 л/сек и выше.

дилась откачка, в каждой из ступеней насоса, по мере приближения к стороне высокого вакуума, делался всё более и более широким. Это способствовало увеличению скорости действия и давало одновременно возможность пользоваться более высоким форвакуумным давлением. В усовершенствованном таким образом двухступенном насосе Пайна³⁵ удалось получить скорость действия в $15,5 \text{ л/сек}$ при форвакуумном давлении в 3 мм и предельном вакууме в $3 \cdot 10^{-7} \text{ мм}$.

Несмотря, однако, на все достоинства усовершенствованных насосов, оставался один недостаток, который нельзя было устранить. Он заключался в самой ртути. Без применения искусственного вымораживания жидким воздухом с помощью ртутных конденсационных насосов можно было получить лишь давление, равное упругости пара ртути при наинизшей температуре, имеющейся в какой-либо части откачиваемой системы. Но даже и вымораживание не приводило к быстрому получению хорошего вакуума. Требовалось несколько часов, прежде чем достигалась упругость ртутного пара, соответствующая температуре жидкого воздуха. Кроме того, ртутный пар внутри вакуумной системы амальгамирует металлы, входящие в состав откачиваемых приборов, что нежелательно.

Всё это заставило начать поиски других рабочих жидкостей, в особенности для мощных высокопроизводительных насосов больших размеров. Такие жидкости вскоре нашлись. Ими оказались различного рода масла и эфиры с упругостью пара (при комнатной температуре) в тысячи и более раз меньше упругости пара ртути.

Так как ртуть долгое время была единственной рабочей жидкостью в конденсационных насосах, то при переходе к маслу на него вначале механически перенесли установившиеся «ртутные традиции». Однако, из рассмотрения свойств ртути и масла (эфира) вытекает необходимость совершенно иного подхода к маслу.

ПРИНЦИП ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ

Если в резервуар конденсационного насоса, который может работать и с ртутью и с маслом, налить ртуть и, при достаточно хорошо работающем форвакуумном насосе, производить её нагревание, то вначале, до некоторой температуры, определяемой конструкцией, мы будем наблюдать отсутствие какого-либо действия насоса. По достижении этой температуры насос начнёт работать, и при дальнейшем повышении температуры ртути и хорошим действием водяного охлаждения насос будет продолжать хорошо работать. Струя ртутного пара, вырывающаяся из сопла, будет преодолевать встречное стремление газовых молекул проникнуть из форвакуума в откачиваемый объём, и предельное давление, которое сможет создать ртутный конденсационный насос, определится только парциальным давлением примесей к ртути и упругостью её пара в наиболее холодной части вакуумной системы.

Если теперь в резервуар того же самого насоса налить какое-либо из практически применяемых масел, то картина будет иной. При повышении температуры, так же как и для ртути, будет достигнут некоторый нижний температурный предел (лежащий, кстати, ниже, чем для ртути), после чего насос начнёт работать. Однако, при дальнейшем повышении температуры масла давление на стороне высокого вакуума (начиная с некоторой критической температуры) начнёт повышаться, и, наконец, насос перестанет работать вовсе. Этот верхний температурный предел для масла (отсутствующий у ртути) связан с разложением тяжёлых углеводородов, из которых оно состоит, на более лёгкие газообразные неконденсирующиеся продукты, попадающие на сторону высокого вакуума и ведущие к прекращению работы насоса.

Если принять за критерий начала и прекращения работы насоса давление перманентных газов на стороне высокого вакуума в 10^{-5} мм, то, например, для старого насоса Хикмена и Санфорда¹⁶ рабочая температурная область будет ограничена всего лишь двумя градусами Цельсия. Птицын²¹ приводит для апиэзонового масла кривую, дающую рабочую область температур, при том же ограничении, в 30°C . Естественно стремление расширить эти пределы, но, как оказывается, сделать это простым выбором масла нельзя, а приходится обратиться к изучению самого механизма работы паромасляного насоса и к его усовершенствованию.

Любое минеральное масло имеет свой температурный предел разложения и (в противоположность ртути), являясь смесью различных компонент, не имеет ни определённой точки кипения, ни определённой точки затвердевания. Пользуясь различием физических свойств этих компонент, можно, нагревая масло последовательно до различных температур, отделить их друг от друга в виде фракций, кипящих в узких температурных интервалах.

Выберем такие температурные интервалы, в пределах которых перегонкой отделяются погоны масла или посторонние примеси к нему, обладающие родственными друг другу свойствами, и обозначим количества этих погонов в пределах выбранных температурных интервалов (или количество вещества в каждой из полученных таким образом фракций) буквами A , B , C и т. д. Как показал Хикмен⁴, любое масло можно будет тогда представить как сумму ряда слагаемых

$$A + B + (C + D + \dots + W + X + Y) + Z.$$

Здесь A — фракция, состоящая из водяного пара и растворённых в масле и получающихся из него при его разложении перманентных газов (предполагая, что точки кипения остальных фракций лежат выше). B — лёгкие фракции, участие которых в работе насоса нежелательно благодаря высокой упругости их паров, $(C + D + \dots + W + X + Y)$ — расочие фракции, точки кипения которых лежат в рабочей зоне — выше начальной рабочей температуры и ниже температуры начала разложения масла, и Z — тяжёлые фракции с точ-

ками кипения выше температурного предела разложения, смолы и полимеризованные продукты.

Так как предельное достижимое давление определяется упругостью пара рабочей жидкости в насосе высокого вакуума, то, очевидно, что желательно найти способ пользоваться на стороне высокого вакуума тяжёлыми фракциями масла с наиминишей возможной упругостью пара, отделив их в насосе от лёгких фракций. Такое

разделение фракций может непрерывно осуществляться в фракционирующем насосе двумя способами: фракционированием в газообразной и жидкой фазах, к разбору которых мы и перейдём.

Пусть внизу откачиваемой трубы расположен кипятильник, из которого, вверх по трубе, поднимаются пары смешанных фракций, представляющих собой масло. После нагрева трубы до некоторых равновесных температур, наиболее высоких в нижней её части и наиболее низких в верхней, температурный режим её установится. Самые лёгкие фракции масла, конденсирующиеся при наиминиших температурах, поднимутся по трубе на наибольшую высоту. Са-

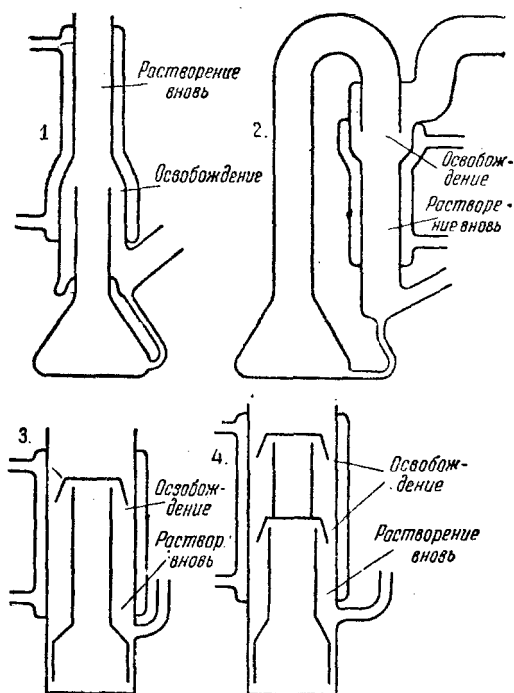


Рис. 1.

мые тяжёлые, имеющие наивысшую температуру конденсации, поднимутся только на минимальную высоту и здесь будут конденсироваться на стенках трубы. Таким образом, в нижней части трубы всё время будут присутствовать пары всех фракций. По мере поднятия паров вверх по трубе число фракций в них будет уменьшаться, пока останутся только самые лёгкие. Такое разделение фракций масла в парообразном состоянии представляет собой простейший вид фракционирования и называется фракционированием в газообразной фазе. Этот вид фракционирования широко применяется на практике.

Для уяснения роли фракционирования в газообразной фазе на практике рассмотрим критически работу различных типов паромас-

ляных насосов. При этом учётом лёгкую растворимость в масле при конденсации откачиваемых насосом газов и паров и лёгкое их освобождение при последующем нагреве конденсата.

На рис. 1 изображены четыре наиболее распространённых типа промасляных конденсационных насосов. Стрелками с надписями обозначены места освобождения и обратного растворения газообразных продуктов и лёгких фракций *A* и *B*, увлекаемых вместе с парами рабочих фракций. Желательно, очевидно, чтобы количество освобождаемых фракций *A* и *B* было всегда больше количества растворяемых вновь, и масло очищалось бы этим путём от летучих составляющих. Повторное растворение наиболее сильно выражено в насосах обращённого типа (рис. 1—2, 3, 4), где компоненты *A* и *B* выделяются вверху и поглощаются в нижней части насоса. Наилучший в смысле повторного растворения — простой прямотрубный насос (рис. 1—1). Вертикальная труба его конденсатора образует своего рода миниатюрную фракционирующую колонку, у вершины которой накаплиются нежелательные летучие фракции

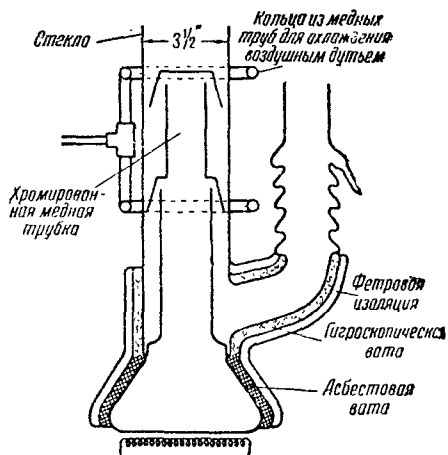


Рис. 2.

A и *B*, откачиваемые постепенно форвакуумным насосом. Конденсирующиеся и растворяющиеся в конденсате летучие фракции в этом насосе, стекая вниз по трубе конденсатора, вновь испаряются благодаря нагреву встречными горячими выходящими парами и держатся вдали от области высокого вакуума. Двухступенный насос обращённого типа (рис. 1—4) — самый худший из всех четырёх в смысле правильности использования рабочих фракций и повторного растворения.

Для того чтобы создать в насосе любой конструкции условия для фракционирования в газообразной фазе, достаточно, очевидно, поддерживать форвакуумную трубу этого насоса горячей или, по крайней мере, не подвергать её сильному охлаждению. На рис. 2 изображён усовершенствованный таким образом двухступенный насос обращённого типа с горячей трубой⁴. Кроме того, что форвакуумная труба утеплена, она снабжена в этом насосе пятью ярусами входящих друг в друга колбочек для задержания стекающих вниз лёгких фракций. Применение таких колбочек значительно улучшает работу насоса.

Фракционирование в газообразной фазе представляет собой значительное преимущество, так как позволяет удалять из откачиваемой системы не только газы, но и сравнительно легко конденсирующиеся пары. Исходя из этого, следует различать нормальную скорость действия и скорость удаления насоса⁴.

Нормальная скорость действия конденсационного насоса относится к нормальной его работе при откачке перманентных газов, способных лишь временно адсорбироваться поверхностью конденсата. На неё не влияет умеренное охлаждение пара рабочей жидкости в холодильнике насоса, так как откачиваемые газы при таком охлаждении не конденсируются. Понятие же скорости удаления относится к парам жидкостей, легко конденсирующимся в холодильниках распространенных насосов. Для увеличения скорости удаления нужно создать такие условия в холодильнике насоса, чтобы в нём конденсировались лишь пары рабочей жидкости (масла) и оставались в газообразном состоянии пары веществ, которые надо удалить. Таким образом, скорость удаления можно определить как количество литров пара конденсирующейся жидкости, удаляемое насосом в 1 сек при давлении пара, определяемом температурой самого холодного участка системы, от откачиваемого объема до холодильника насоса. Из этого определения следует, что увеличение скорости удаления может быть достигнуто повышением температуры холодильника и форвакуумной трубы насоса, т. е. условиями фракционирования в газообразной фазе.

Хикмен⁴ произвёл такой опыт. Были взяты два насоса. Один из них — насос прямого действия с фракционированием в газообразной фазе (рис. 1—1) и другой — обычный, обращенного типа без фракционирования (рис. 1—3). Первый имел скорость действия для воздуха 3 л/сек и второй — 10 л/сек. Когда эти насосы были использованы для откачки системы, выделяющей конденсирующиеся пары вместо воздуха, их относительные скорости обратились, так как только насос прямого действия с фракционированием в газообразной фазе мог удалять пары.

Без учёта различия между нормальной скоростью действия и скоростью удаления при конструировании конденсационных насосов иногда делаются грубые ошибки, когда на форвакуумной трубе насоса также ставят холодильник для воспрепятствования удалению паров самой рабочей жидкости. Насосы с таким холодильником накапливают в себе в виде жидкости легко конденсирующиеся пары и масло в них при этом быстро перестаёт быть пригодным для работы. Скорость удаления имеет первостепенное значение в химических работах при откачке паров. В физических работах она играет также громадную роль, так как конденсирующиеся пары, например, пары воды, выделяемые стеклом, присутствуют во всех установках. Поэтому насосу с большой скоростью удаления всегда следует отдать предпочтение.

Следует отметить и ещё одно преимущество насосов с фракционированием в газообразной фазе и большой скоростью удаления. Масло в них в процессе работы не загрязняется конденсирующимися летучими жидкостями, как в обычных насосах, и поэтому не требует такой частой замены, как в последних.

Пусть в кипятильники 1, 2, 3, 4 и т. д. (рис. 3), соединённые между собой узкими теплоизолированными трубками, налито смешанное масло. Если производить его нагревание одновременно во всех кипятильниках, то оно будет испаряться и пары его будут подниматься по вертикальным трубкам и выходить через сопла в наклонную трубу А, откачиваемую через В ротационным насосом. Конденсируясь на стенках трубы А, масло будет благодаря её наклону стекать в направлении, показанном стрелками, и по трубке а попадёт в кипятильник 1. Так как в него попадает конденсат паров, вышедших из всех сопел, а в остальных кипятильниках масло только убывает благодаря испарению, через некоторое время в кипятильниках 1 и 2, а затем и во всех остальных установится некоторая разность уровней, и масло будет непрерывно течь по соединительным трубкам из кипятильника 1 в кипятильники 2, 3, 4 и т. д. Таким образом, установится непрерывное движение паров масла по трубе А слева направо и конденсата из одного кипятильника в другой — справа налево.

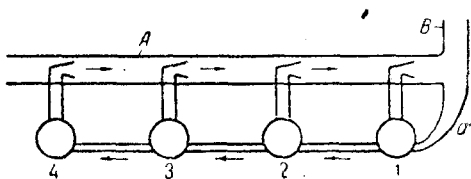


Рис. 3.

Попав в кипятильник 1, смешанный конденсат нагреется и из него в первую очередь испарятся лёгкие фракции с наивысшей упругостью пара и наименьшей температурой кипения. В кипятильник 2 попадут после этого только оставшиеся фракции в уже нагретом состоянии и в нём из них испарится ещё одна или несколько фракций с меньшей упругостью пара и более высокой температурой кипения и т. д.

В последний кипятильник попадут, таким образом, только самые тяжёлые фракции с наименьшей упругостью пара и наивысшей температурой кипения. Благодаря непрерывности течения масла и последовательному испарению фракций в каждый кипятильник будут проходить всё время одни и те же фракции и из него будут выходить также одни и те же фракции, за вычетом испарившихся в кипятильнике. Такое разделение фракций в жидком состоянии представляет собой фракционирование в жидкой фазе.

Так как предельное достижимое давление в откачиваемой установке определяется упругостью пара рабочей жидкости, то в многоступенном насосе с применением масла выгодно, чтобы в ступени высокого вакуума рабочая жидкость имела бы наименьшую упругость пара.

Тогда предельное достижимое давление также будет наиболее низким. Фракции с более высокой упругостью пара не смогут проникнуть путём диффузии в откачиваемую систему ввиду того, что этому препятствует струя пара, выходящая из сопла последней ступени высокого вакуума.

Рассмотрим теперь практическое применение фракционирования в жидкой фазе.

Сумму членов ряда, предложенного Хикменом, можно представить как сумму всего трёх членов $(A+B)+(C+D+\dots+W+X+Y)+Z$, различающихся между собой основными свойствами. Количество вещества, входящего в состав первого и последнего членов, в пригодном для работы масле обычно невелико. Основная масса вещества составляется фракциями второго члена — рабочими фракциями.

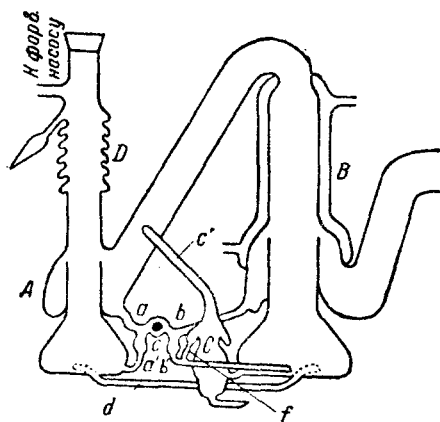


Рис. 4.

агрегата. Третья — небольшого объема для сохранения тяжелых нерабочих фракций масла и смол — должна быть расположена где-либо вблизи части насосного агрегата, использующей для работы наиболее тяжелые фракции.

На рис. 4 изображен построенный Хикменом для исследования и усовершенствования условий непрерывного фракционирования такой насосный агрегат. Он состоит из двух последовательно соединенных насосов прямого действия A и B, малого объема C для сбора фракций Z и малого объема D для сбора легких фракций $(A+B)$, представляющего собой систему уже упомянутых входящих друг в друга колбочек в виде гармоник. Для удаления самых легких фракций из состава масла к верхней колбочке припаян отросток с пробиркой. Скопляющиеся в этой пробирке легкие фракции можно либо вылить, отломив оттянутый стеклянный кончик в нижней ее части, либо удалить, отпаяв целиком всю пробирку с этими фракциями.

Фракционирующий насос, разделяющий эти три фракции друг от друга и использующий для работы фракции второго члена, должен, таким образом, очевидно, состоять из трех частей. Первая — небольшого объема для сохранения легких фракций $(A+B)$ — должна быть расположена в форвакуумной части насосного агрегата, состоящего из последовательно соединенных насосов. Вторая — рабочая часть большого объема для рабочих фракций $(C+D+\dots+W+X+Y)$ — должна представлять собой рабочую часть

Оба насоса *A* и *B* прямого действия с фракционированием в газообразной фазе. Лёгкие фракции из насоса *B* частично попадают по наклонной трубе в насос *A*. Конденсаты из насосов *A* и *B* идут по трубкам *a* и *b* к месту их соединения, содержащему стальной шарик, передвигаемый с помощью постоянного магнита извне в один из двух «карманов» *a'* и *b'* или в углубление *c* между ними. Кипятильники обоих насосов соединены трубкой *d*, а карманы — с кипятыльниками соответствующих насосов. Третья трубка, не обозначенная на рисунке буквой, соединяет нижнюю часть кипятыльника насоса *B* с малым кипятыльником *C*, из которого нет непосредственного выхода для жидкости, а только для пара (трубка *C*) и конденсата (трубка *f*). Кипятыльники имеют электрический подогрев, не показанный на рисунке.

Благодаря устройству со стальным шариком возможны три случая работы насоса-агрегата:

1. Наихудшее последовательное соединение. Шарик задвинут в левый карман *a'* и масло из конденсатора форвакуумного насоса *A* попадает сначала в кипятыльник насоса высокого вакуума *B* и только после этого по трубке *a* обратно в насос *A*.

2. Нормальное последовательное соединение. Шарик находится в углублении *C* и каждый из насосов использует свой собственный конденсат.

3. Наилучшее последовательное соединение. Шарик задвинут в правый карман *b'* и масло из конденсатора насоса *B* попадает сначала в кипятыльник форвакуумного насоса *A* и уже затем по трубке *d* возвращается обратно в кипятыльник насоса *B*.

В табл. 1 приведены величины предельных давлений, полученных с различными последовательностями прохождения масла для разных рабочих жидкостей и температур конденсатора. Давления указаны в мм ртутного столба.

Таблица 1

Последовательность прохождения масла	Бутилфталат		Апиэзон А 1934 г.		Апиэзон А 1932 г.		Апиэзон В 1934 г.	
	25° С	0° С	25° С	0° С	25° С	0° С	25° С	0° С
Наихудшая	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	—	$4 \cdot 10^{-4}$	—	$9 \cdot 10^{-5}$	—
Нормальная	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—	—	—
Наилучшая	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$

Данные таблицы ясно показывают преимущество наилучшей последовательности, соответствующей осуществлению дополнительного непрерывного фракционирования в жидкой фазе.

В наиболее современных насосах применяют оба вида непрерывного фракционирования и в газообразной и в жидкой фазах. Схематическое

устройство такого насоса с комбинированным фракционированием получилось бы, если бы в виде продолжения трубки В (рис. 3) добавить вертикальную фракционирующую трубу насоса А экспериментального агрегата (рис. 4 — объём D для сбора лёгких фракций).

Одноступенные насосы могут быть фракционирующими только в газообразной фазе, так как фракционирование в жидкой фазе принципиально требует применения нескольких ступеней. Успешное фракционирование в газообразной фазе возможно только в насосе прямого действия.

КОНСТРУИРОВАНИЕ НАСОСОВ

Вопрос о выборе расположения сопел весьма важен. Из-за громадных конструктивных трудностей до настоящего времени нет многоступенных фракционирующих насосов прямого действия как металлических, так и стеклянных с вертикальным расположением сопел. Все такие насосы делаются обращённого типа и имеют поэтому всегда относительно малую скорость удаления. В них невозможно успешно осуществить фракционирование в газообразной фазе, в то время как горизонтальное расположение даёт возможность иметь и комбинированное фракционирование.

Преимущество вертикальной конструкции — это лёгкость её изготовления из металла. Материалом служат обычные цельнотянутые трубы, обрабатываемые целиком на токарном станке. Крутые её недостатки:

1. Форвакуумное сопло с наиболее узким ззором между ним и конденсатором имеет небольшой диаметр. Это требует большой точности в изготовлении и тщательной разработки конструкции.

2. Ширина концентрических кипятыльников мала по сравнению с их длиной. Это ведёт к нежелательному перемешиванию масла в соседних кипятыльниках, облегчает переход тепла от одного кипятыльника к другому, делая работу их зависящей друг от друга.

3. Площади кипятыльников ограничиваются размерами сопел. Эти площади не могут быть увеличены без расширения трубы у основания насоса, а это уничтожает простоту конструкции.

Достоинства горизонтальных металлических насосов:

1. Площади кипятыльников не зависят от диаметров сопел.

2. Подвод тепла к кипятыльнику каждой из ступеней независимый и его можно регулировать.

3. Высоковакуумный конец насоса можно сделать из трубы большого диаметра, а низковакуумный — из трубы малого диаметра, без усложнения конструкции.

4. Сам насос может служить прямой соединительной трубой между ротационным насосом и откачиваемым объёмом или другими частями вакуумного устройства чаще, чем вертикальный насос.

Несмотря на все соображения в пользу горизонтальной металлической конструкции, наиболее распространена вертикальная. Это можно

объяснить лишь консерватизмом и бедностью оборудования мастерских, изготавливающих насосы. Стекланные насосы, требующие только газовую горелку для своего изготовления, делаются часто комбинированными — с горизонтальным расположением высоковакуумных сопел и вертикальным — форвакуумного сопла с фракционированием в газообразной фазе.

Скорость действия насоса определяется по известной формуле $S = \frac{V dP}{P dt}$ в л/сек, причём указывается давление P , при котором она измерена. Для паромасляных фракционирующих насосов S остаётся практически постоянной лишь в интервале давлений от 10^{-4} до 10^{-6} мм. При расчёте насосного агрегата, состоящего из нескольких последовательно соединённых насосов, должны быть обеспечены требования: 1. Создания каждым предыдущим насосом достаточно малого предельного давления P_{np} в качестве форвакуумного для последующего насоса. 2. Достаточно большой производительности каждого из насосов (произведения $S \cdot P_{np}$), обеспечивающей удаление предыдущим насосом всего газа, выброшенного при откачке последующим насосом. Это можно сформулировать, перенумеровав насосы по порядку от низкого вакуума к высокому, в виде неравенства

$$S_1 P_1 \geq S_2 P_2 \geq S_3 P_3 \geq \dots \geq S_n P_n.$$

Скорость действия агрегата, для которого выполнено указанное требование, будет определяться скоростью действия S_n его последней ступени высокого вакуума, так что $S_{agr} = S_n$. Можно было бы подумать, что, стремясь увеличить S_n , мы столкнёмся с лимитированием со стороны S_1 ротационного насоса. Следующий пример показывает, что это неверно.

Пусть $S_1 = 0,2$ л/сек, $P_1 = 0,5$ мм. Спрашивается, какая S_n могла бы быть обеспечена работой такого ротационного насоса при $P_n = 10^{-6}$ мм. Из равенства $S_1 P_1 = S_n P_n$ имеем $S_n = 100\,000$ л/сек.

Вопрос, следовательно, заключается не в лимитировании форвакуумным насосом, а в неумении обеспечить $S_n = 100\,000$ л/сек.

Работа по получению таких больших S_n шла до настоящего времени по следующим направлениям: 1. Увеличение размеров насоса, дающее увеличение S_n , пропорциональное квадрату увеличения «масштаба» насоса, но снижающее максимальное допустимое P_{n-1} (P_1 для современных ротационных насосов равно $5 - 10 \cdot 10^{-4}$). 2. Увеличение площади сечения зазора между краями сопла и конденсатором, дающее линейное увеличение S_n согласно упрощённой формуле Геде¹⁰: $S_n = 11,7 A_n$ л/сек, где A_n — площадь сечения n -го зазора в см², но ещё быстрее снижающее максимальное допустимое P_{n-1} . 3. Увеличение диффузного доступа газов из откачиваемого пространства в увлекающую газовые молекулы струю пара при одновременном уменьшении доступа пара из сопла на сторону высокого вакуума.

В последнем направлении работали многие исследователи, разрешая поставленную задачу соответствующим подбором формы сопел. Так, Крауфорд⁵, Хо⁶, Лауритсен⁶, Цабель⁷, Амдур⁸ предложили вместо одного сопла использовать в каждой ступени несколько сопел конической формы.

На рис. 5 показан многосопельный насос Хо. В качестве критерия качества работы сопла Хо⁹ установил понятие коэффициента скорости сопла как отношение экспериментально найденной S_n к подсчитанной по формуле Геде¹⁰ (от $11,7 \text{ A/сек}$), исходя из геометрических размеров зазора сопла. Этот коэффициент оказался, для большинства паротурбинных и паромасляных насосов, лежащим в пределах всего от 2 до $10^0/0$. Коплей, Симпсон, Тенней и Фиппс¹¹ нашли, что односопельные насосы с конической струёй пара, рассчитан-

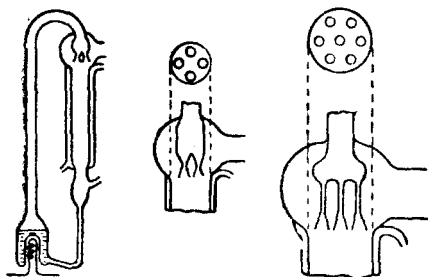


Рис. 5.

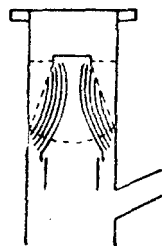


Рис. 6.

ные, исходя из теории турбинных сопел Лавалья, имеют более высокий коэффициент скорости (до $56^0/0$), чем многосопельные насосы. Хольстмарк, Рамм и Уэстин¹² для грибовидного сопла в виде усечённого конуса нашли наиболее выгодный угол при вершине конуса в $70-75^0$, дающий коническую, направленную вниз струю пара. Эмбри предложил многообещающее сопло, показанное на рис. 6, грибовидного типа, с внутренним расширением струи пара, дающее коэффициент скорости в $30^0/0$.

Достаточно основательного исследования работы сопел никто ещё не произвёл.

ТИПЫ НАСОСОВ

История паромасляных насосов начинается с Бэрча^{13,14}, в 1928 г. первым применившего масло и одним из первых высказавшего основные идеи фракционирования в газообразной фазе¹⁵. За ним идут работы Хикмена и Санфорда¹⁶, Беккера и Жайкокса¹⁷, Эстермана и Бика¹⁸, Бранденштейна и Клуба¹⁹, Гендерсона²⁰, Птицына²¹, Бердена²², Стожарова²³ и др. Паромасляные насосы начали строить фирмы «Метрополитен-Виккерс» в Англии, Гэфф, Галло и Пилон во Франции и т. д. У нас паромасляные насосы серийно выпускались заводом «Светлана».

Первые модели фракционирующих насосов современного типа были построены Хикменом⁴ в 1935 г. Одна из таких моделей показана на рис. 7. Она представляет простейший горизонтальный стеклянно-металлический фракционирующий насос в виде стеклянной трубы, содержащей металлические сопла и частично заполненной подогреваемым при работе снизу маслом. Такой насос давал давление в 10^{-7} мм, хотя и требовал низкого форвакуумного давления меньше 0,05 мм.

Дальнейшая работа Хикмена в лаборатории фирмы «Дистиллэйшен Продакт» оказалась весьма плодотворной. На рис. 8 показаны стеклянные насосы с комбинированным фракционированием: 1 — вертикальное сопло высокого давления, 2 — отросток, предотвращающий возвращение основной массы лёгких загрязнений обратно в кипятильник, 3 — промежуточное горизонтальное сопло, 4 — сопло высокого вакуума и 5 — сборник тяжёлых фракций, смол и полимеризованных продуктов, не принимающих участие в работе. Подогреватели сделаны из голой проволоки, погружённой непосредственно в масло.

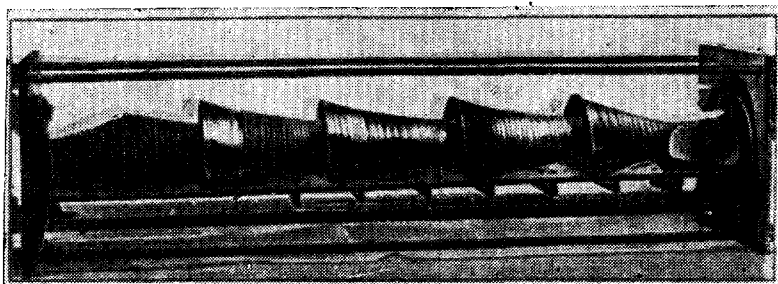


Рис. 7.

Охлаждение горизонтальной трубы насоса С может быть водяное или продуваемым воздухом. Скорость действия при 10^{-5} — 10^{-6} мм — 5 л/сек. Форвакуумное давление 0,01 мм. Эти величины зависят от выбранных размеров. Предельное давление зависит от сорта масла и с ловушкой при 25°C может быть получено в $5 \cdot 10^{-8}$ мм. На рис. 9 показан разрез металлического фракционирующего насоса, изготавливаемого серийно фирмой «Дистиллэйшен Продакт» с диаметрами рабочих труб 4,8 и 21 дюйм. Три сопла насоса расположены внутри наклонной под углом 5—10° трубы. Первое форвакуумное сопло входит внутрь охлаждаемого водой патрубка конденсатора, соединённого фланцем с рабочей трубой. Наиболее лёгкие фракции через этот патрубок попадают во фракционирующую коробку с щитками и кольцевыми перегородками, где и собираются. Только самые тяжёлые из этих лёгких фракций по трубке попадают в сборник конденсата. В него же поступает и конденсат второго и третьего сопел и собираются нелетучие вещества. Сборник конденсата соеди-

нён отверстием с паровой камерой первого сопла, она — с камерой второго сопла и последняя — с камерой третьего. Внутри каждой из

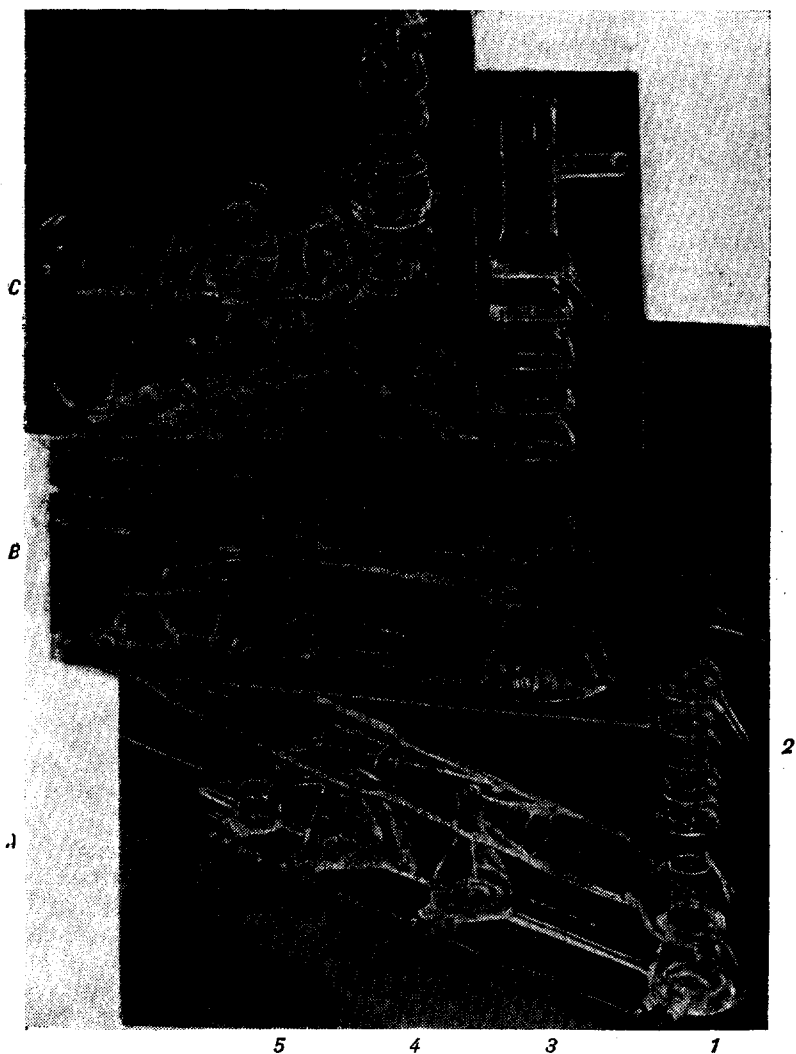


Рис. 8.

камер устроены перегородки, образующие лабиринт, так что работающее масло должно пройти длинный путь, прежде чем оно дойдёт до ступени высокого вакуума. Скорость действия насоса диамет-

ром 4 дюйма равна 250 л/сек и диаметром 21 дюйм — 7000 л/сек, при давлении 10^{-4} — 10^{-6} мм. На рис. 10 показан внешний вид 4- и 8-дюймовых насосов, а на рис. 11 — насоса диаметром 21 дюйм. Интересно отметить, что увеличение скорости здесь получено всецело за счёт увеличения масштаба.

Действительно $\frac{7000}{250} = \frac{21^2}{4^2} = 28$, т. е. скорости действия относятся как квадраты диаметров.

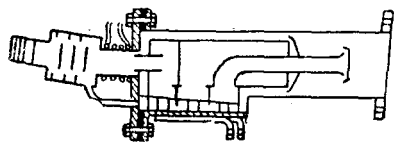


Рис. 9.

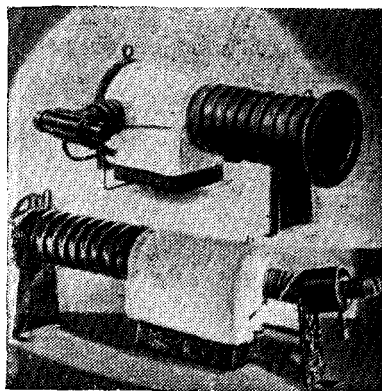


Рис. 10.

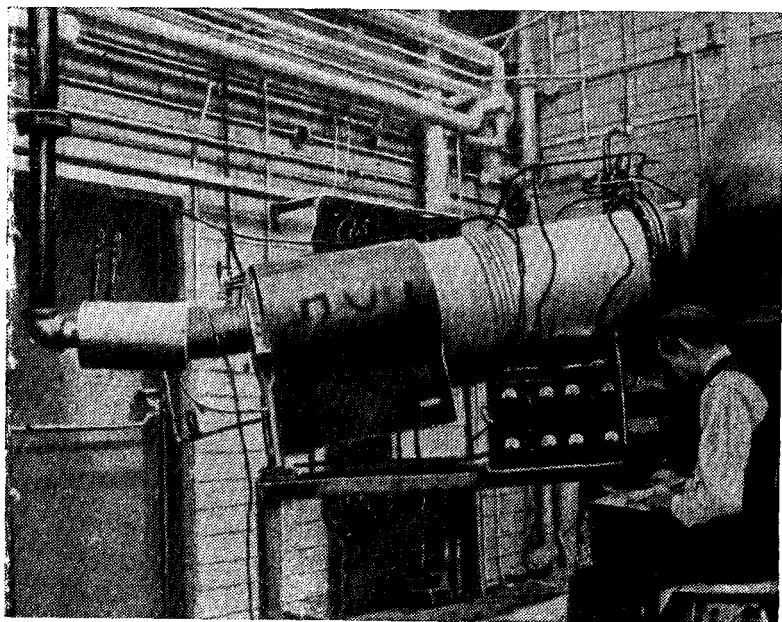


Рис. 11.

Вертикальные конструкции металлических фракционирующих насосов Локенвитца²⁴, Малтера и Маркувитца²⁵ и Харьковского Фи-13 УФН, т. XXIX, вып. 1—2

зико-Химического Института Украинской Академии Наук³ изображены на рис. 12, 13 и 14, соответственно.

Устройство их понятно из рисунков. Насос рис. 14 представляет большой интерес благодаря высокому коэффициенту скорости,

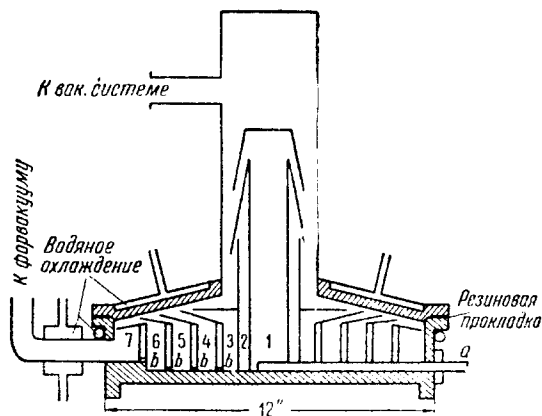


Рис. 12.

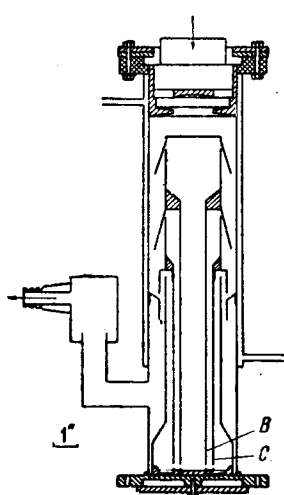


Рис. 13.

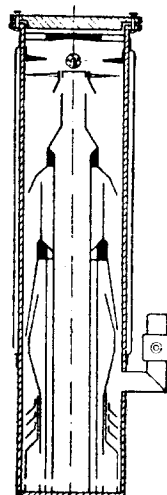


Рис. 14.

приближающемуся к единице (0,9). Скорость действия его с диаметром трубы в 129 мм равна 1200 л/сек при давлении в 10^{-6} мм. Легко видеть, что насос представляет собой шаг вперед в отношении конструкции высоковакуумного сопла даже по сравнению с

21-дюймовым насосом Хикмена. Кроме указанных, известны и другие вертикальные конструкции, например, Сикса и Банкрофта²⁶ и др., не представляющие принципиального интереса.

ЛОВУШКИ

Даже при использовании масел с наименьшей упругостью пара происходит постепенное проникновение масла в откачиваемую установку. Это явление диффузии заставило воспользоваться различного рода ловушками на пути проникновения пара. Задача ловушек двоякая. Они должны²⁷: 1. Предотвратить движение масляного пара в откачиваемую систему. 2. Уменьшить количество пара, двигающегося в этом направлении, до концентраций, лежащих значительно ниже насыщения. Задача эта может быть успешно разрешена, конечно, только при употреблении масел с низкой упругостью пара.

В наиболее широком смысле ловушка может быть не только препятствием, но может иметь и свою собственную производительность откачки. В соответствии с этим ловушки можно разделить на динамические, — активно ускоряющие откачку, и статические, — не обладающие собственной производительностью.

К первым можно отнести ловушки с адсорбентом²⁸, холодные ловушки²⁸ и электрические щитки²⁷. Ко вторым — механические щитки без охлаждения или с умеренным охлаждением²⁷ и горячие щитки²⁹.

Там, где применяются насосы с большой скоростью действия, желательно использовать ловушки, удовлетворяющие следующим общим требованиям:

1. Устранять целиком всё вредное проникновение масла в обратном направлении.
2. Быть простыми по конструкции и изготовлению.
3. Не требовать большого ухода и внимания при работе.
4. Вносить минимальные потери в скорость действия установки. Этим требованиям особенно хорошо удовлетворяют механические щитки, нашедшие себе за последнее время широкое распространение в соединении с умеренным охлаждением циркулирующей водой.

На рис. 15 изображено устройство одной из разновидностей механического щитка большой производительности. Действие его заключается в том, что ни одна молекула масла из насоса не может проникнуть в откачиваемое пространство, не ударившись о поверхность одного из колец щитка (на рис. 15 они изображены горизонтальными чёрточками) и временно не сконденсировавшись на ней. Это сильно замедляет диффузию масляного пара на сторону высокого вакуума. Изображённая конструкция, не снижающая заметно скорости действия, предложена Морзе²⁷ для горизонтального металлического насоса. Морзе наблюдал, при работе горизонтального фракционирующего насоса без щитка, распространение видимого масляного налёта на стенках трубки, соединяющей насос с ионизационным манометром

со скоростью, которую легко можно было зарегистрировать в течение нескольких часов. После же установки механического щитка, подобного изображённому на рис. 15, Морзе не удалось заметить под щитком никаких видимых следов масла даже после непрерывной работы насоса в течение двух месяцев.

Механический щиток может работать с водяным охлаждением трубы, в которой он помещён (см. рис. 15) или без него, или же

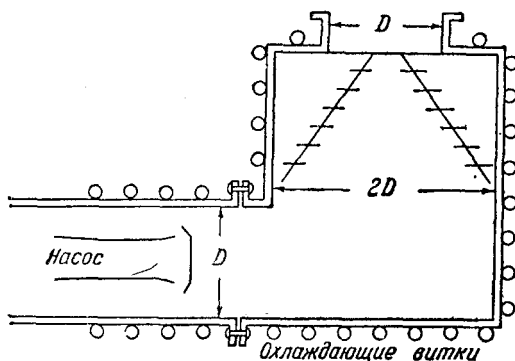


Рис. 15.

с непосредственным охлаждением составляющих его колец. Кольца охлаждаемого щитка обычно изготовляют из алюминия или другого материала с хорошей теплопроводностью. Щиток с водяным охлаждением, таким образом, становится своеобразным дополнительным конденсатором, к которому как бы «притягиваются» все проникшие на сторону высокого вакуума молекулы масла.

Благодаря этому щиток скоро «запотевает». Приходится прекращать работу насоса, вынимать щиток и удалять с его пластин масло. В этом заключается его недостаток.

На рис. 16 показана стеклянная ловушка — механический щиток с водяным охлаждением, предложенная Хикменом³⁰ для фталатов и апиезонов, не снижающая пропускной способности вакуумной системы. Принцип действия её тот же, что и охлаждаемого водой механического щитка.

На рис. 17 изображено устройство электрического щитка, не нашедшего себе, правда, ещё широкого применения. Внутрь откачной трубы на стороне высокого вакуума вставлена система, состоящая из накаливаемого катода в виде спирали из вольфрамовой проволоки и анода, сделанного из металлической сетки. В пространстве между этими электродами происходит ионизация молекул масла, двигающихся из насоса в сторону, обратную откачке. Ионизированные молекулы могут быть либо притянуты каким-либо специальным отрицательным электродом, расположенным вблизи сопла насоса, и затем постепенно откачены насосом, либо могут попадать на поверхность раскалённого катода и на ней подвергаться крекингу с образованием лёгких неконденсирующихся углеводородов, откачиваемых насосом.

Если установить на стороне высокого вакуума механический щиток и подогревать его пластины настолько, чтобы на них масло не

конденсировалось, то получится так называемый горячий щиток, снижающий благодаря обратному испарению молекул масла скорость их проникновения в откачиваемую установку. Однако, известная доля молекул масла, благодаря повторному испарению с обратных поверхностей колец щитка, всё же попадёт в откачиваемую установку и будет конденсироваться на холодных частях её. В этом заключается недостаток подобного горячего щитка.

Бэрч²⁹ предложил производить нагрев пластин щитка до гораздо более высокой температуры, достаточной, чтобы вызвать крекинг тяжёлых углеводородов с образованием более лёгких, как это происходит и в электрических щитках. Такие

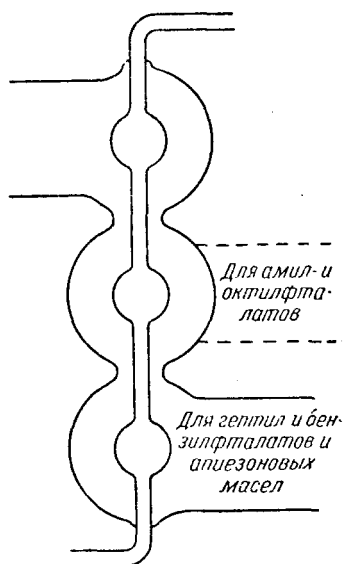


Рис. 16.

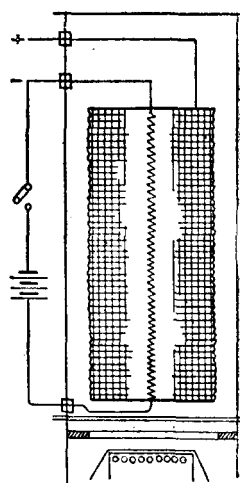


Рис. 17.

высокотемпературные горячие щитки особенно пригодны при продолжительной откачке высоковольтных рентгеновских трубок и генераторных ламп.

Металлические ловушки с жидким воздухом, стеклянные ловушки с водяным охлаждением и ловушки с углём общеизвестны.

Интересен новый метод уменьшения упругости паров масла над соплом высокого вакуума, упомянутый Хикменом¹. Он заключается в том, что к насосной жидкости специально добавляется нелетучая компонента. Эта компонента при работе насоса отделяется от масла и попадает в последнюю камеру сопла высокого вакуума, в которой при конденсации она совершенно как бы «осушает» остаточные пары масла, повидимому, растворяя их в себе.

МАСЛА

Основные положения, которыми следует руководствоваться при выборе масла для фракционирующих насосов, могут быть сформулированы на основании опыта работы в виде следующих требований:

1. Малая гигроскопичность и малая способность к растворению газов и паров. 2. Устойчивость при перегреве. 3. Широкая область рабочих температур. 4. Низкая упругость пара при комнатной температуре. 5. Химическая инертность по отношению к веществам, вводимым внутрь вакуумной системы, и газам.

Органические жидкости, применяемые в насосах, хуже ртути в двух тесно связанных между собой отношениях³⁰: при первой откачке они выделяют большое количество растворённых газов и портятся при соприкосновении, в горячем состоянии, с воздухом. Вред наносится маслу в два приёма: 1) При нагревании в присутствии воздуха в начале откачки. 2) После исчезновения вакуума, когда масло соприкасается с воздухом, будучи сильно нагретым.

В результате такого соприкосновения с воздухом в масле появляются летучие вещества, снижающие предельный вакуум, и продукты окисления, загрязняющие масло. Благодаря

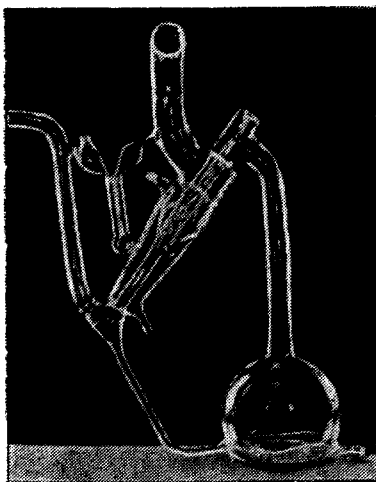


Рис. 18.

этому после попадания воздуха в горячий насос он надолго может перестать нормально работать. Хорошее масло должно выдерживать испытание на так называемую «степень дурного обращения», состоящее во впуске в горячий работающий с этим маслом насос воздуха при атмосферном давлении, например, на 2 минуты, и сейчас же после начала откачки опять давать тот же вакуум, что и до испытания.

Рабочая температурная зона хороших современных масел должна лежать в интервале не менее, чем в 50° . Допустимое форвакуумное давление для масла должно быть не ниже $0,1 \text{ мм}$, упругость пара, при комнатной температуре, не выше 10^{-6} мм . Этим требованиям удовлетворяют распространённые в Америке изобутиловый эфир себаценовой кислоты, изоамиловый эфир себаценовой кислоты (Амойль S), диэтилгексилфталат (Октойль), диэтилгексилсебакат (Октойль S) и наилучший из них — бутилфталат. С Октойлем S в фракционирующих насосах без применения ловушек были получены давления порядка 10^{-9} мм . Это — последнее достижение в области предельного давления, достигнутого простыми средствами. В области форвакуумного давления последнее достижение это — $0,6 \text{ мм}$ для бутилфталата и 1 мм

для некоторых обладающих большой плотностью хлорированных углеводородов, состав которых в фирменных каталогах их производителей не указан. Эти масла работали в бустерном насосе рис. 18, имеющем скорость действия в 4 л/сек при 10^{-2} мм вначале при повышенных ваттах подогрева и 10^{-3} мм в дальнейшем при пониженной мощности. У нас до последнего времени пользовались ещё сравнительно плохо выдерживающими испытание на степень дурного обращения апиезонами, а также отогнанными в вакууме фракциями вазелинового масла. Вместе с тем у нас имеются также многообещающие масла, как диизоамиловый эфир азелаиновой кислоты и другие, полученные кандидатом химических наук доцентом М. А. Закутской в лаборатории кафедры органической химии Среднеазиатского Государственного университета в Ташкенте, руководимой членом-корреспондентом Академии наук Уз. ССР профессором И. П. Цукерваник *).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всё более и более широкое распространение фракционирующих насосов, обусловленное их преимуществами перед простыми паромасляными и ртутными конденсационными насосами, повидимому, скоро приведёт к полному вытеснению ими всех других насосов высокого вакуума. Апиезоны и другие подобные им масла должны будут уступить место более совершенным эфирам с меньшей упругостью пара. Фракции в узком температурном интервале должны будут уступить место жидкостям, работающим в широком интервале рабочих температур, с большой рабочей температурной зоной. Для расширения рабочей зоны возможно применение специально составленных смесей с верхним пределом рабочей зоны одной компоненты, являющимся нижним пределом рабочей зоны другой. Таким образом сможет быть достигнуто наилучшее использование масла на различных ступенях фракционирования.

В электровакуумной промышленности фракционирующие насосы во многих случаях дадут возможность пользоваться почти необработанным «сырым» маслом, что удешевит затраты на получение вакуума. Громадные скорости действия, достигнутые фракционирующими насосами при дальнейшем их увеличении, совершенно изменят существующее откачное оборудование и позволят создать новое, в котором можно будет не обращать такого большого внимания на непроницаемость всех соединений и на натекание. Производительность будущих насосов позволит иметь в вакуумной системе даже небольшие отверстия, без ухудшения вакуума ниже требуемого.

Возможно, что большие скорости фракционирующих насосов позволят им найти применение и в будущей атомной энергетике.

*) Следует указать на разработанные ВЭИ³⁷ кремнеорганические соединения, известные под названием силиконов и, повидимому, далеко остающиеся за собой все известные насосные жидкости³⁸.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. C. D. Hickman, Journ. of Applied Physics, **11**, 303, 1940.
2. L. Maltera. N. Marcuvitz, Rev. Scient. Instr., **9**, 92, 1938.
3. К. Д. Синельников, А. К. Вальтер, Д. Н. Улезко и А. Н. Ямницкий, ЖТФ, т. XI, вып. 10, стр. 879, 1941.
4. K. C. D. Hickman, Journ. of Frankl. Inst., Febr., 215, 1936.
5. W. W. Crawford, Phys. Rev., **10**, 557, 1917.
6. T. L. Ho, Rev. Scient. Instr., **3**, 133, 1932.
7. R. M. Zabel, Rev. Scient. Instr., **5**, 54, 1935.
8. I. Amdur, Rev. Scient. Instr., **7**, 395, 1936.
9. T. L. Ho, Physics, **2**, 386, 1932.
10. W. Gaede, Zs. f. Phys., **4**, 350, 1923.
11. M. I. Copley, O. C. Simpson, H. M. Tenney a. T. E. Phipps, Rev. Scient. Instr., **6**, 265, 1935.
12. J. Holstmark, W. Ramm a. S. Westin. Rev. Scient. Instr., **8**, 90, 1937.
13. C. R. Burch, Nature, **122**, 729, 1928.
14. C. R. Burch, Proc. Roy. Soc., (A), **123**, 271, 1929.
15. C. R. Burch a. F. E. Bancroft, Brit. Pat. 346243, January, **30**, 1930.
16. K. C. D. Hickman a. C. R. Sanford, Rev. Scient. Instr., **1**, 140, 1930.
17. J. A. Becker a. E. R. Jaycox, Rev. Scient. Instr., **2**, 773, 1931.
18. I. Estermann a. H. T. Byck, Rev. Scient. Instr., **3**, 482, 1932.
19. M. v. Brandenstein u. H. K. Klumb, Phys., Zs., **33**, 81, 1932.
20. J. E. Henderson, Rev. Scient. Instr., **6**, 66, 1935.
21. С. В. Птицын, ЖТФ, т. II, вып. 7—8, стр. 660, 1932.
22. J. A. Bearden, Rev. Scient. Instr., **6**, 276, 1935.
23. А. И. Стожаров, ЖТФ, т. IV, вып. 9, стр. 1763, 1934.
24. A. E. Lockenwitz, Rev. Scient. Instr., **8**, 322, 1937.
25. L. Maltera a. N. Marcuvitz, Rev. Scient. Instr., **9**, 92, 1938.
26. Sykes a. Bancroft, Brit Pat. 477013, June, 20, 1936.
27. R. S. Morse, Rev. Scient. Instr., **11**, 277, 1940.
28. K. R. More, R. F. Humpreys a. W. W. Watson. Rev. Scient. Instr., **8**, 263, 1937.
29. C. R. Burch, Brit Pat. 396205.
30. K. C. D. Hickman, Journ. of Frankl. Inst., March, 383, 1936.
31. I. Langmuir, Phys. Rev., **8**, 48, 1916; Journ. of Frankl. Inst., **182**, 719, 1916.
32. M. Folmer, Ber. d. Phys. Ges., **52**, 804, 1919.
33. M. Folmer, Zs. f. angew. Chemie, **34**, 149, 1921.
34. Н. А. Капцов, Физические явления в вакууме и разреженных газах, ОНТИ НКТП СССР, стр. 68, 1937.
35. S. Dushman, Journ. of Frankl. Inst., **211**, 689, 1931.
36. Chem. and Metallurg. Eng., Febr. (1946).
37. К. А. Андрианов, О. И. Грибанова, Д. А. Гамбарова и А. Л. Карпова, Электричество, **4**, 39 (1946).
38. C. R. Brown. Rev. Sci. Instr. **16**, 316 (1945), № 11.