

над ртутью в трубке K_2 , т. е. в вакууме, можно пренебречь в сравнении с давлением газа над ртутью в трубке K_1 . По закону Бойля

$$pV = hv,$$

откуда

$$p = h \frac{v}{V}.$$

Таким образом, измерив давление h в трубке K_1 и зная объемы V и v , вычисляют давление в вакууме.

Посредством манометра Мак-Леода можно измерять давления порядка одной миллионной миллиметра ртутного столба.

Манометр Пирани — Галле градуируют, пользуясь манометром Мак-Леода; им пользуются для измерений давлений до 10^{-8} — $\div 10^{-9}$ мм рт. ст. При самом высоком вакууме применяют *ионизационные манометры*. В этих приборах используют трехэлектродные лампы, аналогичные триодам радиоаппаратуры, но высокое напряжение (200 в) подводят не к аноду, а к сетке; на анод же подается небольшое отрицательное напряжение (—30 в). Электроны, испускаемые катодом, притягиваются не к аноду, а к сетке; но раньше чем они попадают на сетку, многие из них пролетают сквозь ее отверстия, отталкиваются отрицательным зарядом, сообщенным аноду, а затем, двигаясь по инерции, вновь проходят сквозь сетку, отбрасываются полем катода и при этом колебательном движении ионизируют молекулы остатков газа в лампе. Число положительных газовых ионов, движущихся к аноду, пропорционально давлению в баллоне манометра, что и позволяет определять давление, измеряя ток в цепи анода.

§ 97. Вакуумные насосы

При откачке воздуха, как и другого газа, в атмосферу получается небольшая степень разрежения. Чтобы получить большую степень разрежения, вакуумные насосы соединяют последовательно через резервуары с промежуточными степенями разрежения, которые называют *форвакуумом*; в форвакуум производят откачку газа из баллонов, где создается более высокое разрежение.

Форвакуум получают, применяя «масляные насосы» — поршневые и ротационные. Для использования поршневого насоса в качестве форвакуумного полость цилиндра должна быть тщательно изолирована от атмосферного воздуха. С этой целью применяют густое масло, которое толстым слоем наливают на выхлопной клапан. Как ясно из рис. 199, при движении поршня вверх слой масла поверх поршня закрывает отверстие B ; этим предотвращается выталкивание газа обратно в откачиваемый резервуар, и газ, находящийся в цилиндре, сжимается поршнем. Когда поршень приблизится к крайнему верхнему положению, масло, налитое поверх поршня, поднимает выхлопной клапан G , и сжатый воздух через верхний слой масла

устремляется пузырьками наружу; вместе с ним частично выдавливается и масло. При последующем движении поршня вниз над поршнем создается разреженное пространство, которое через трубки *B* и *M* наполняется новой порцией газа из откачиваемого резервуара. Нижняя трубка, оканчивающаяся под поршнем, сделана для того, чтобы поршень не прилипал ко дну цилиндра.

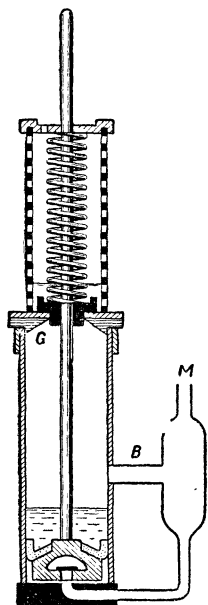


Рис. 199. Схема поршневого масляного насоса.

Поршневой насос был впервые применен для откачки воздуха Герике (в XVII в.). Поэтому и современные масляные поршневые форвакуумные насосы часто называют *насосами Герике*. Обычно два таких насоса соединяют последовательно, что позволяет довести давление воздуха до 0,05 мм рт. ст.

Более совершенными являются *ротационные масляные насосы* (рис. 200).

Сплошной цилиндр *D* вращается вокруг своей оси, оставаясь все время прижатым к верхней стенке цилиндрической полости. По одному из диаметров цилиндра *D* в прорезь вставлены две лопаточки *a* и *b*, между которыми помещена пружина, прижимающая лопаточки к стенкам цилиндрической полости так, что эта полость оказывается разьединенной на три изолированные друг от друга камеры A_1 , A_2 и A_3 . Полная изолированность трех камер друг от друга достигается плотным прилеганием лопаточек *a* и *b* и цилиндра *D* к стенкам, на которых все время находится слой масла. При положении лопаточек, которое показано на рис. 200, камера A_1 через трубку *B* соединена с откачиваемым сосудом. Вращение цилиндра *D* против часовой стрелки увеличивает объем этой камеры A_1 , и в нее засасывается газ из откачиваемого сосуда. В камерах A_2 и A_3 уже находится газ, который был засосан туда раньше, когда каждая из этих камер находилась в сообщении с трубкой *B*. Вращение цилиндра против часовой стрелки уменьшает объем камеры A_3 , газ в ней сжимается, приподнимает легкий шариковый клапан и выбрасывается через слой масла в атмосферу или в форвакуум по трубке *C*.

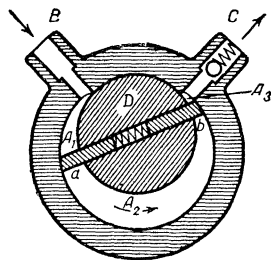


Рис. 200. Схема ротационного масляного насоса.

Новейшие ротационные масляные насосы позволяют довести откачку до давления в тысячные доли миллиметра ртутного столба.

Два насоса, соединенных последовательно, доводят откачку до $1,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Для получения более высокого вакуума применяют насосы особого устройства. Широкое распространение имеют так называемые *молекулярные насосы*. Рис. 201 поясняет принцип действия молекулярного насоса (молекулярный насос был изобретен в 1912 г. Геде; позже стали применять усовершенствованные молекулярные насосы Гольвека; принцип их действия тот же). Барабан *A* вращается внутри полого цилиндра *B*. Молекулы газа, ударяющиеся о поверхность барабана *A* в расширенной части зазора *nm*, получают добавочную скорость в направлении вращения барабана. Кроме участка *nm*, в остальных местах зазор между барабаном *A* и цилиндром *B* так узок, что там обратное просачивание газа затруднено. В связи с этим газ выбрасывается в трубку *m*, а в трубке *n* создается разрежение. Чем ближе будет окружная скорость вращения барабана *A* к средней скорости движений молекул газа, тем большее разрежение газа дает насос.

В насосах Гольвека зазор между барабаном и цилиндром составляет 0,03 мм; барабан диаметром в 15 см делает 4000 об/мин, скорость откачки (при начальном давлении 0,1 мм Hg и конечном давлении 0,001 мм Hg) равна $2300 \text{ см}^3/\text{сек}$; эта скорость откачки почти в 20 раз превышает скорость откачки, даваемую при тех же начальном и конечном давлениях ротационным масляным насосом.

Для достижения высокого вакуума вся вращающаяся часть молекулярного насоса вместе с неподвижным цилиндром и ротором электромотора заключена в металлическую коробку, которая сообщается с форвакуумом. Если давление в форвакууме сравнительно высокое, то скорость откачки невелика. По мере уменьшения давления в форвакууме скорость откачки возрастает и достигает максимума, когда свободный пробег молекул становится равным по порядку величины размерам всасывающих зазоров; наибольшее разрежение, которое может быть получено молекулярным насосом, — это примерно 10^{-7} мм Hg.

Для получения еще более высокого вакуума служат *диффузионные насосы* Ленгмюра. На рис. 202 схематически показано устройство такого насоса (в его первоначальном виде). Ртуть, налитая в колбу *A*, нагревается электрической печкой до кипения; пары ртути, поднимаясь по трубке *B* (эту трубку покрывают асбестом, чтобы пары ртути не охлаждались), выходят через сопло *C* в сосуд *D*, стенки которого снаружи омываются холодной водой (для подвода и удаления холодной воды служат трубки K_1 и K_2); на холодных

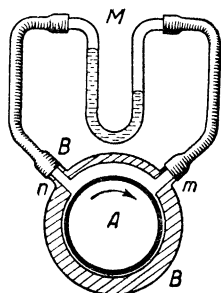


Рис. 201. Схема, поясняющая действие молекулярного насоса.

стенках сосуда D пары ртути конденсируются, и ртуть каплями стекает в нижнюю часть сосуда, которая сообщается трубкой с колбой A . Сосуд, в котором происходит конденсация паров ртути, имеет две отводные трубки: верхнюю F , через которую сосуд D сообщается с откачиваемым пространством (где требуется образовать высокий вакуум), и нижнюю G , через которую сосуд D сообщается с форвакуумом. Если динамическое давление струи паров ртути больше давления газа в форвакууме, то пары ртути, выходя из сопла C , веерообразной струей распространяются вниз по сосуду D и, как было уже сказано, конденсируются на холодных стенках этого сосуда; важно, что в этом случае пары ртути почти не попадают в верхнюю часть сосуда D , находящуюся под соплом C , и поэтому почти не проникают в трубку F , ведущую к откачиваемому сосуду.

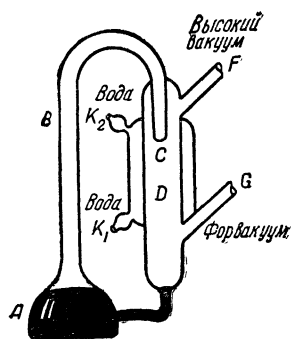


Рис. 202. Схема насоса Ленгмюра.

Небольшое количество паров, все же проникающее в трубку F , конденсируют интенсивным охлаждением трубки F .

Описанная циркуляция ртути имеет следующее назначение: газ, поступающий из откачиваемого сосуда через трубку F в верхнюю часть сосуда D , непрерывно диффундирует в струю паров ртути, увлекается этой струей паров ртути и подводится к трубке G , через которую газ идет в форвакуум, где с помощью какого-либо другого насоса все время поддерживают давление порядка $0,1$ мм Hg. Обратная диффузия газа из форвакуума в высокий вакуум затруднена струей ртутных паров: молекулы газа, ударяясь о движущиеся навстречу молекулы ртути, отбрасываются назад к нижней части сосуда D . По подсчету Ленгмюра, только одна молекула из 10^{20} молекул газа прорывается через струю ртутного пара из форвакуума в высокий вакуум. Таким образом, разрежение, которое может быть получено посредством насоса Ленгмюра, практически не зависит от давления в форвакууме (если только давление газа в форвакууме не превышает динамического давления струи паров ртути). Когда требуется применить насос Ленгмюра при плохом форвакууме, то сильно сужают зазор между стенками верхней части сосуда D и соплом C .

При диаметре сопла C в 1 см и ширине кольцеобразной щели вокруг сопла в $1/2$ см скорость откачки, даваемая насосом Ленгмюра, равна примерно $2000-3000$ см³/сек. Часто соединяют последовательно два-три ртутно-диффузионных насоса. В усовершенствованной конструкции такие вакуумные установки имеют производительность до 50 л/сек.

Насосы Ленгмюра чаще применяют в виде, показанном на рис. 203 (электрическая печь вставлена во вдавленное дно колбы

и место конденсации паров ртути более удалено от подогреваемой колбы).

Если при пользовании диффузионным насосом не приняты специальные меры для улавливания паров ртути, то наряду с откачкой газа до высокой степени разрежения будет постепенно происходить заполнение вакуума парами ртути, которые при комнатной температуре, находясь в равновесии с жидкой ртутью, имеют давление $1,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Чтобы не допустить проникновения паров ртути в откачиваемый сосуд, их конденсируют в ловушке (рис. 204), охлаждаемой жидким воздухом (-184°C) или же смесью ацетона и углекислоты в снегообразном состоянии (-79°C).

При использовании ловушек без змеевика на внутренних стенках баллона ловушки предварительно осаждают калий, с которым проникающие в ловушку пары ртути образуют амальгаму.

Неудобства, связанные с применением ртути в диффузионных насосах, удалось устранить, заменив ртуть специальными, особо очищенными и кипящими при высокой температуре маслами («октейль», продукты перегонки вазелинового масла и др.).

Паромасляные диффузионные насосы работают по тому же принципу, как и ртутные насосы Ленгмюра, но могут быть использованы и без усложняющей системы охлаждения ловушек. Такие насосы строятся на производительность до 15 тыс. л/сек.

При получении вакуума остатки газа в откачиваемом сосуде часто связывают химически; это называют *геттерированием*. Например, при производстве электроламп откачку производят только до 10^{-3} мм рт. ст., после чего, возбуждая в остаточном газе электрический разряд, осаждают на внутренней поверхности стеклянной колбы очень тонкий прозрачный слой красного фосфора, предварительно введенного в колбу. Остатки газа улавливаются этим слоем и после первых часов эксплуатации лампы вакуум повышается до 10^{-6} мм рт. ст. С той же целью при производстве радиоламп применяют барий, стронций и другие металлы (их наносят тонким слоем на небольшой кусочек жести, закрепленный в лампе, который неза-

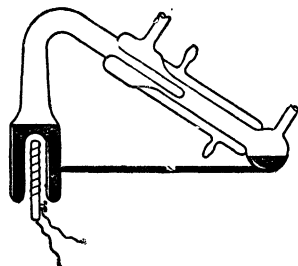


Рис. 203. Ртутно-диффузионный насос Ленгмюра.

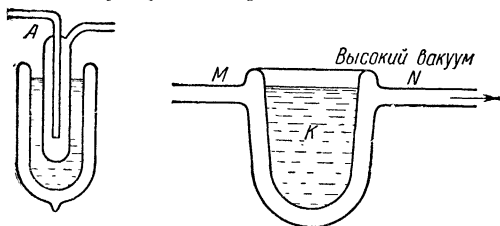


Рис. 204. Ловушки для паров ртути.

долго до запайки лампы разогревают током высокой частоты; геттер расплывается и образует на внутренней поверхности колбы лампы металлическое зеркало).

Для получения наиболее высокого вакуума применяют *ионизационные насосы*. Это увеличенный ионизационный манометр, описанный в конце предыдущего параграфа, снабженный взамен обычных вакуумных кранов особым мембранным вентилем. На электроды ионной лампы подают такое напряжение, чтобы ионизированные молекулы газа приобретали большую скорость и, попадая на отрицательно заряженный анод, проникали в структуру металла, который предварительным прокаливанием был полностью очищен от ранее проникших в него газов. Таким «электрическим поглощением» остатков газа (внедрением положительных ионов газа в кристаллическую решетку металла) повышают вакуум, полученный диффузионным насосом, до 10^{-10} мм рт. ст. (в объеме 1 л в течение часа).
