

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ТЕОРИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ *)

Существующие высоковакуумные насосы — диффузионные насосы — основаны, по общепринятым воззрениям, на «диффузионном принципе» Геде. Этот принцип, следуя самому Геде, коротко говоря, состоит в следующем: ртутный пар, текущий вдоль градиента убывающего давления, при давлениях около 1 мм, отделён от эвакуируемого пространства диафрагмой с апертурой, ширина которой не превышает средней длины свободного пробега молекул пара в окрестности апертуры. Если ширина апертуры больше указанной, то плотность пара, проходящего через апертуру, так велика, что молекулы откачиваемого газа будут отбрасываться назад в эвакуируемое пространство. При нормальной ширине апертуры газовые молекулы диффундируют в струю пара и уносятся ею. Автор реферируемой статьи обращает внимание на то, что, если откачное действие насосов описывается этим принципом, то их скорость откачки при допустимых размерах весьма ограничена. Он так обосновывает это: форвакуумное давление по Геде равно 0,1 мм ртутного столба. Это значит, что давление газа в любом месте между апертурой и форвакуумным патрубком по крайней мере равно 0,1 мм. Давление пара в струе должно быть значительно выше, чтобы не допустить утекания газа назад к апертуре. Оно должно быть практически не меньше 1 мм. При этой плотности пара средняя длина свободного пробега молекулы пара должна быть порядка 0,1 мм и ширина апертуры не может поэтому превышать этой величины. Объём воздуха, диффундирующего в вакуум при нормальных температурах, равен приблизительно 12 л/сек·см². В насосе может быть достигнуто не больше половины этого теоретического максимума. Чтобы получить скорость откачки хотя бы в 200 л/сек, апертура должна быть равна 33 см² и, таким образом, её длина (даже, если ширина равна 0,5 мм) должна быть равна 6,6 м, т. е. пар должен течь по трубе диаметром больше 2 м. Это явная нелепость!

Геде утверждал (Zeits. techn. Phys., 1923), что все парортутные насосы, способные создавать высокий вакуум, основаны на его принципе. Если это так, то у высоковакуумных насосов нет будущего, ибо их скорость принципиально ограничена. Однако Ленгмюр считает, что его насос работает, базирясь на другом принципе. В насосе Ленгмюра поток пара, текущий с большей скоростью в направлении откачки, увлекает газовые молекулы в направлении стенок и вдоль стенок к форвакуумному патрубку. Стенки насоса должны при этом охлаждаться, иначе молекулы пара, достигая их, адсорбируются, а затем разлетаются равномерно во все стороны, в том числе и в сторону, противоположную направлению откачки. Это уменьшает или вовсе прекращает откачное действие. Ленгмюр придавал особое значение высокой скорости потока пара. Кроуфорд для увеличения этой скорости применял расходящееся сопло, направленное в сторону от

*) P. Alexander, Journal of Scientific Instruments 23, № 1, January 1946 г.

качки, через которое пар выпускался из кипятильника. Если учесть, что насос Кроуфорда не охлаждался и, тем не менее, работал вполне эффективно, можно констатировать, что он исчерпывающе доказал влияние скорости потока пара на откачное действие.

Однако Геде утверждал, что насосы этого типа тоже являются диффузионными насосами и апертурой диафрагмы является здесь наименьшее расстояние между краем сопла и стенкой насоса—горловина насоса. Применяя Максвелловский закон распределения скоростей молекул, Геде заключил, что в этом случае существенная часть молекул пара будет всегда выходить из потока пара вверх, против направления откачки и функцией диафрагмы будет уменьшение количества этих молекул. Если ширина горловины больше, чем средняя длина свободного пробега молекул пара, то насос не может работать при низких давлениях. Автор реферируемой статьи сам подсчитал количество молекул, устремляющихся в сторону, противоположную направлению откачки, и пришёл к иному выводу.

Если число молекул, движущихся со скоростью от c до $c + dc$

$$N_{dc} = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} x^2 e^{-x^2} dx,$$

где $x = c/\alpha$, а α — наиболее вероятная скорость, и если все эти молекулы представить векторами, исходящими из одной точки, то все эти векторы будут кончатся в точках, равномерно распределённых на поверхности шара радиуса c . На это молекулярное движение будет наложено движение потока пара со скоростью s , направленной прямо вниз (рис. 1).

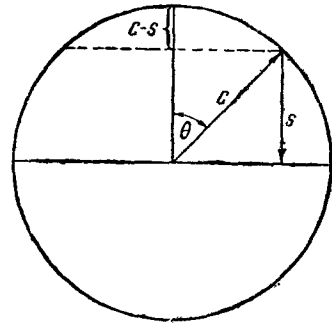


Рис. 1.

Все молекулы, результирующие векторы которых оканчиваются в пределах верхнего полушария (черт. 1), могут рассматриваться как движущиеся назад. Векторы таких молекул оканчиваются на поверхности сегмента высотой $c - s$. Число их

$$N_- = N_{dc} \frac{2c(c-s)}{4c^2} = N_{dc} \frac{c-s}{2c}$$

Выразив s через α : $s = a\alpha$, получим:

$$N_- = \frac{N_{dc}}{2} \left(1 - \frac{a}{x} \right).$$

Подставив в правую часть максвелловское значение N_{dc} , получим окончательно, что

$$N_- = \frac{2N}{\sqrt{\pi}} (x^2 - ax) e^{-x^2} dx.$$

Интегрирование от a до ∞ даёт общее число молекул, которые уходят назад из потока пара, обладающего скоростью a . Грубая оценка показывает, что

- $N_- = 80$ из 1000 ($N = 1000$), если $a = 1$,
- $N_- = 17$ „ 1000 ($N = 1000$), „ $a = 1,5$,
- $N_- = 2.3$ „ 1000 ($N = 1000$), „ $a = 2$.

Итак, если скорость потока пара приблизится к скорости, равной 1,5 от наиболее вероятной молекулярной скорости, то струя пара, идущая в направлении, противоположном направлению откачки, станет так мала, что не будет сказываться на скорости откачки насоса.

Остаётся выяснить — достигает ли поток пара таких скоростей и, если достигает, то при каких обстоятельствах. Ответ на этот вопрос даёт эксперимент. Для производства опыта был построен насос, являющийся, по существу, насосом Ленгюра с расходящимся кольцеобразным соплом. Этот насос послужил прототипом нового высокоскоростного насоса. Естественно, что скорость движения пара в нём прямо замерять нельзя, но её можно вычислить по массе ртути, проходящей через щели сопла в единицу времени. В указанном опыте этот замер и был произведён. При этом давление пара в щели сопла было принято равным $\frac{3}{4}$ давления в кипятильнике.

Рассмотрение результатов опыта (приведённых в статье) показывает, что величина a меняется от 1,2 до 3,4 и делается меньше 1,5 лишь в случае очень большой щели сопла (2,33 мм).

Такой же результат был получен и в опытах по выпариванию кадмия и последующему осаждению его на стеклянных пластинках, поставленных под разными углами к направлению движения потока: на пластинках, расположенных в стороне, противоположной направлению откачки, осадок был исчезающе малым.

Все эти данные дают отрицательный ответ на вопрос о справедливости принципа Геде. Одновременно, исходя из ленгюровского объяснения откачного действия, эти результаты дают возможность создать следующую картину процесса откачки. Обусловленные высокими, направленными вниз, скоростями ртутных молекул, скорости газовых молекул, входящих в поток пара у устья насоса, достигают более высоких значений, чем те, которые соответствуют температуре газа. Поэтому скорость течения газа ниже сопла будет выше, чем над ним, и плотность газа в этом районе будет ниже. Дальше, ещё ниже сопла, пар становится менее плотным и его увлекающее действие на газ уменьшается и, наконец, пропадает (уменьшение плотности пара объясняется расширением его в районе сопла и адсорбцией на холодных стенках). Соответственно этому скорость течения газа уменьшается, а плотность его увеличивается, достигая максимума внизу, ближе к форвакуумному патрубку. Ртутный пар должен быть всё время достаточно плотным, чтобы предотвратить утеkanie пара назад, от районов большой плотности к районам малой плотности. Наименее плотным пар будет к периферии — вдоль стенок насоса. Расширение горловины приводит к большему уменьшению плотности. При некоторой ширине её поток пара вдоль стенок перестанет быть достаточно плотным, чтобы запереть сжатый газ, и он прорвётся назад, в область низких давлений.

Эти рассуждения полностью подтверждаются таким опытом: в ряде точек между горловиной и форвакуумным патрубком были промерены давления. Точки, давление в которых оказалось одинаковым, были соединены линиями, образующими серию изобар (см. рис. 2).

На диаграммах I и II распределение плотностей газа может быть сравнено со стоячей волной, имеющей узел в точке, лежащей непосредственно под соплом, и пучность ниже к форвакуумному патрубку. Пар должен быть достаточно плотен, чтобы ударами своих молекул перегонять молекулы газа в район пучности из района узла и тем самым осуществлять запирающее действие. Если вдоль некоторой вертикальной линии пар недостаточно плотен, то волны нет, а есть постоянный градиент увеличивающейся вниз плотности газовых молекул — запирания нет и газ прорвётся. Такая ситуация показана на диаграммах III и IV. Скорость откачки падает со 130 л/сек в случае I и II, до 83 и 34 л/сек в случаях III и IV. Замечено, что на увлекающее действие пара и запираение газа при низких давлениях решающее влияние оказывает скорость потока пара. При высоких дав-

лениях более важным оказывается количество циркулирующей ртути (количество потребляемого тепла, ширина горловины),

Таким образом выяснено, что условием эффективной работы насоса является наличие максимума и минимума плотности газа вдоль некоторой вертикальной линии. При соблюдении этого условия скорость откачки насоса прямо пропорциональна площади горловины.

На базе этой теории был создан новый высокоскоростной насос с большим рабочим диапазоном — от самых низких давлений до 0,1 мм ртутного столба. Конструкция его опирается на следующие выводы теории: 1) площадь горловины должна быть так велика, как только возможно; 2) сопло должно быть направлено прямо вниз; 3) плотность пара вдоль внешней стенки

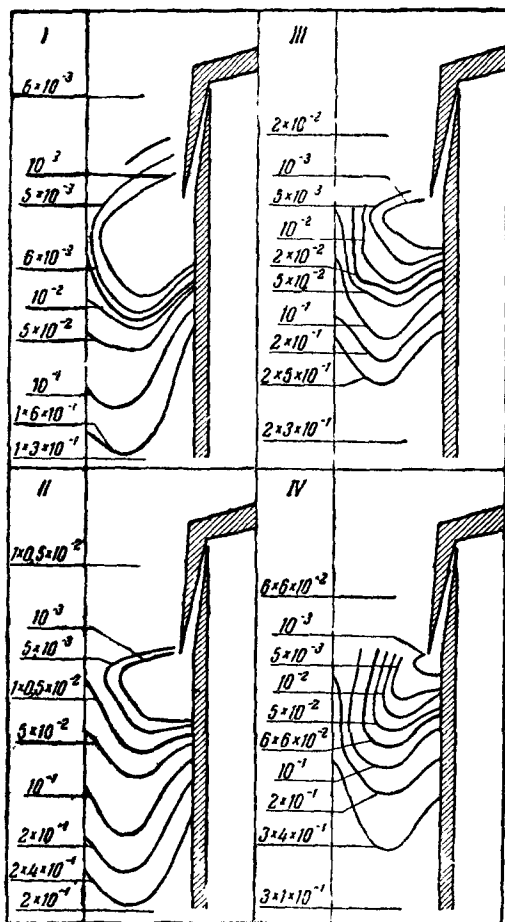


Рис. 2.

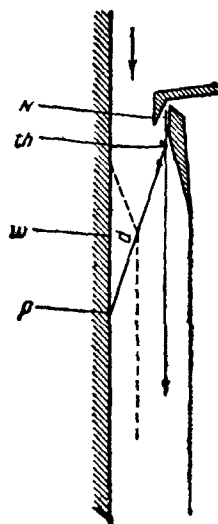


Рис. 3.

так велика, как только возможно; 4) обе стенки сосуда, ограничивающего откачное пространство, охлаждаются. Условия 1) и 2), казалось бы, противоречат условию 3), так как большая площадь горловины и направленное вниз сопло определяют меньшую плотность пара вдоль стенки насоса. Эта трудность ликвидируется тем, что внешняя стенка делается не параллельной направлению откачки — она идет вдоль осевой пунктирной линии, показанной на рис. 3 (*N* — сопло, *th* — горловина, *W* — стенка).

Новый насос имеет диаметр $D = 27,5$ см. Ширина горловины изменяется от 1,5 до 5 см, площадь её — от 86 до 353 см², щель сопла — от 1 до 3 мм. Ртуть нагревается электрической печкой. Наибольшая скорость откачки при рабочем давлении $5 \cdot 10^{-2}$ мм Hg равна 1000 л/сек. При этом потребляется 12 кВт тепла, и горловина должна быть наименьшей. При наиболее низких давлениях горловина должна быть максимальной, а потребление тепла равно лишь 2,7 кВт. На рис. 4 показаны сравнительные кривые зависимости скорости откачки от рабочего давления как данного нового насоса, так и исходного насоса прототипа.

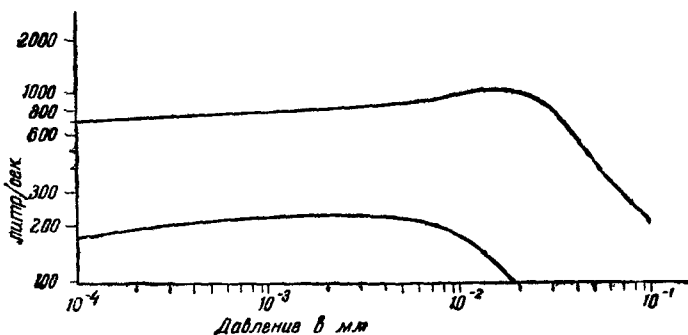


Рис. 4.

Как видно, новый насос имеет преимущества как в величине рабочего диапазона, так и в величине скорости откачки. При 10^{-2} мм Hg на каждый квадратный сантиметр площади горловины скорость откачки насоса-прототипа равна 1,2 л/сек, а нового насоса — 2,8 л/сек. Форвакуумные давления при этом одинаковы. Вообще было найдено, что скорость откачки в широких пределах не зависит от форвакуумного давления, особенно при низких рабочих давлениях. Так, при давлениях ниже $1,5 \cdot 10^{-2}$ мм скорость откачки постоянна при форвакуумном давлении 2,5 мм.

Вслед за этим был создан второй насос, в котором, благодаря некоторым изменениям внутренних размеров, были значительно улучшены его характеристики, а именно: максимальная скорость была доведена до 1500 л/сек; рабочий диапазон со скоростью 1400 л/сек простирается от 10^{-2} до 10^{-4} мм Hg; максимальная скорость откачки на 1 см² ширины горловины — 4 л/сек; максимальная скорость откачки на 1 кВт затраченной энергии равна 470 л/сек; тогда как для первого насоса — 280, а для насоса-прототипа всего лишь 85 л/сек.

Приведённая конструкция насоса тем более интересна, что существующие насосы имеют малую скорость откачки при давлениях порядка 10^{-2} мм: высоковакуумные насосы дают большую скорость откачки при давлениях ниже 10^{-3} мм, масляные же ротационные насосы — при давлениях выше 10^{-1} мм.

В. В. Фёдоров