

Б. С. ДАНИЛИН

КОНСТРУИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Б. С. ДАНИЛИН

КОНСТРУИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Под редакцией
профессора Р. А. НИЛЕНДЕРА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

Настоящая книга представляет собой практическое руководство по конструированию вакуумных систем. В ней изложены общие принципы конструирования вакуумной аппаратуры и описаны свойства материалов, используемых при ее изготовлении. Показаны устройство различных конструктивных элементов и узлов, способы их вакуумно-плотного сочленения и приведены примеры конструктивного выполнения различной вакуумной аппаратуры, используемой в производственной и лабораторной практике.

В книге дано описание выпускаемых отечественной промышленностью вакуумных насосов, приборов для измерения вакуума и для отыскания течей в вакуумных системах. Кроме того, кратко изложены основные физические понятия вакуумной техники, знание которых необходимо для грамотного обращения с вакуумной аппаратурой.

Книга рассчитана на лиц, занимающихся конструированием, монтажом и эксплуатацией вакуумной аппаратуры; она может служить также учебным пособием для студентов высших технических учебных заведений, специализирующихся в области электровакуумной техники, при проектировании ими различных установок.

Редактор С. А. Акалович

Техн. редактор Н. И. Борунов

Сдано в набор 24/II 1959 г.

Подписано к печати 25/V 1959 г.

T-06423 Бумага 84×108¹/₃₂.

13,94 печ. л.+2 вклейки

Уч. изд. л. 17,8

Тираж 9 000 экз.

Цена 9 р. 90 к.

Заказ 129

Типография Госэнергоиздата, Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вакуумная техника является одной из новых, молодых областей прикладной науки, имеющей большое значение для технического прогресса ряда отраслей промышленности.

Если до сравнительно недавнего времени вакуумная техника находила довольно ограниченное применение и использовалась главным образом в лабораторной практике и в производстве электровакуумных приборов, то послевоенные годы характеризуются чрезвычайно интенсивным внедрением вакуумной техники в самые различные области промышленного производства и экспериментальных исследований.

В настоящее время вакуум широко используется в радиотехнической, электротехнической, металлургической, химической, фармацевтической и пищевой промышленности, а также в ряде экспериментальных установок, предназначенных для исследования газодинамики разреженных сред и ядерных процессов.

С каждым годом увеличивается количество вакуумных печей, предназначенных для выплавки предизонных сплавов, для рафинирования чистых металлов, для вакуумной пайки, вакуумного отжига и т. п. Все шире используются вакуумное распыление металлов, получение различных покрытий под вакуумом, пропитка материалов под вакуумом, вакуумная сушка и т. д.

Вакуум необходим для производства ряда лечебных средств, в том числе, например, пенициллина. Вакуумные

насосы предварительного разрежения, имеющие сравнительно невысокий предельный вакуум, но достаточно большую быстроту действия, применяются для производства консервов и витаминов, упаривания растворов, натуральных соков, обезвоживания бетона и т. д.

Широкое применение вакуума в различных отраслях народного хозяйства неразрывно связано со значительными успехами в области получения и измерения вакуума, конструирования вакуумных систем, разработки эффективных методов отыскания течей и разрешением других важных вопросов вакуумной техники.

Объемы современных вакуумных установок очень разнообразны и могут быть от нескольких литров до нескольких десятков кубических метров. Если для индивидуальной откачки электровакуумных приборов сравнительно небольшого объема, а также для лабораторных целей могут использоваться установки, изготовленные в основном из стекла, то для высокоскоростной откачки вакуумных печей, разборных ртутных выпрямителей, электронных микроскопов, масс-спектрометров и других установок значительного объема применяют трубопроводы, вентили, затворы и другие конструктивные элементы, изготовленные из металла. Целнометаллическая конструкция вакуумных систем наиболее полно отвечает требованиям термостойкости, надежности и удобства в эксплуатации, которые предъявляются к вакуумным установкам промышленного типа, обеспечивая, кроме того, максимальное использование быстроты действия высокопроизводительных насосов.

Проектирование различных вакуумных установок требует решения комплекса вопросов; большинство из которых связано с конкретным назначением и спецификой работы каждой вакуумной установки, что прежде всего определяет требования к предельному вакууму и скорости откачки системы, а следовательно, вносит существенное различие в конструктивное оформление вакуумных установок. Так, например, масс-спектрометрические установки,

имеющие небольшие размеры откачных объемов порядка нескольких литров, требуют создания высокого вакуума, порядка $5 \cdot 10^{-7}$ — $5 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. при сравнительно небольших скоростях откачки систем (10 — 15 л/сек), в то время как установки для исследования ядерных процессов требуют создания вакуума порядка 10^{-8} мм рт. ст. в очень больших объемах при скоростях откачки, достигающих нескольких десятков тысяч литров в секунду.

Установки для вакуумной плавки металлов требуют сравнительно невысокий вакуум, порядка 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст., однако характерным для их работы является интенсивное выделение газов из расплавленных металлов, для удаления которых приходится использовать так называемые «бустерные» насосы, имеющие максимальную быстроту действия в указанном диапазоне давлений.

Установки для вакуумной сушки пищевых продуктов требуют использования вращательных насосов, снабженных специальными газобалластными устройствами, позволяющими производить откачку при значительном содержании паров воды, выделяющихся из высушиваемых продуктов.

Несмотря на широкое применение вакуумной аппаратуры в самых различных областях промышленного производства, элементы конструкции вакуумных систем и их размеры до сего времени не подвергались стандартизации и даже не были в достаточной мере описаны в отечественной литературе.

Недостаточная осведомленность о тех принципах, которые кладутся в основу проектирования любой вакуумной системы, о выборе материалов и способах их вакуумноплотного соединения, а также отсутствие технических данных об устройстве отдельных конструктивных элементов вызывают излишнюю затрату времени на проектирование, изготовление и отладку вакуумных систем. Неудачно сконструированные системы зачастую бывают громоздки и неудобны в эксплуатации, в их рабочем объеме подчас бывает очень трудно получить требуемое разрежение.

Поэтому автор поставил перед собой задачу собрать, обобщить и по возможности систематизировать отдельные разрозненные сведения об элементах конструкций вакуумных систем с тем, чтобы облегчить проектирование различного рода вакуумных установок.

Поскольку подобного рода руководство создается впервые, то, естественно, не исключена возможность наличия в нем неточностей, требующих исправления и введения каких-либо дополнений, за указание которых автор будет признателен.

В заключение автор благодарит академика С. А. Векшинского за проявленное им внимание к изданию настоящей книги, а также товарищей М. И. Меншикова, Н. И. Соколова, К. А. Савинского, А. Б. Цейтлина, А. В. Балицкого и А. Э. Берлина за ряд ценных замечаний и советов по отдельным разделам книги.

Кроме того, автор благодарит профессора Р. А. Нилендера за большую помощь, оказанную им при написании книги, и проделанную им работу по ее редактированию.

Автор считает своим долгом выразить особую благодарность инж. А. В. Балицкому за сообщенные им сведения о способах вакуумноплотной сварки и пайки металлов, применяемых при изготовлении вакуумных систем.

Более подробно с этим вопросом читатель может ознакомиться в книге А. В. Балицкого «Технология изготовления вакуумной аппаратуры», подготовленной им к печати.

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ И ВАКУУМНЫХ МАТЕРИАЛАХ

1. ПОНЯТИЕ О ВАКУУМЕ И ВАЖНЕЙШИХ СВОЙСТВАХ РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ

Газ представляет собой совокупность молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении.

Если при атмосферном давлении молекулы газа испытывают столкновения как между собой, так и со стенками сосуда, то по мере понижения давления взаимодействие между молекулами постепенно исчезает и в условиях высокой разреженности они приобретают возможность двигаться прямолинейно от одной стенки сосуда к другой, не испытывая практически взаимных соударений.

Среднее расстояние, проходимое молекулами между двумя столкновениями, называется средней длиной свободного пробега.

Средняя длина свободного пробега молекул λ обратно пропорциональна давлению газа p , т. е.

$$\lambda = \frac{k}{p}, \quad (1)$$

где k — постоянный коэффициент, зависящий только от рода газа и температуры.

В табл. 1 приведены длины свободного пробега молекул воздуха и их количество, находящееся в 1 см^3 объема при различных давлениях и температуре 20°C .

Из рассмотрения этой таблицы видно, что для воздуха при комнатной температуре и при любом давлении, выраженном в мм рт. ст.:

$$\lambda \approx \frac{5 \cdot 10^{-3}}{p} \text{ см}, \quad (2)$$

Таблица 1

Зависимость средней длины свободного пробега и концентрации молекул от давления

Давление воздуха, мм. рт. ст.	Средняя длина свободного про- бега молекул воздуха при 20° С, см	Количество моле- кул, находящихся в 1 см ³ при 20° С
7,6 · 10 ²	6,2 · 10 ⁻⁶	2,5 · 10 ¹⁹
1	4,7 · 10 ⁻²	3,3 · 10 ¹⁶
1 · 10 ⁻¹	4,7 · 10 ⁻²	3,3 · 10 ¹⁶
1 · 10 ⁻²	4,7 · 10 ⁻¹	3,3 · 10 ¹⁶
1 · 10 ⁻³	4,7	3,3 · 10 ¹⁶
1 · 10 ⁻⁴	4,7 · 10 ¹	3,3 · 10 ¹⁶
1 · 10 ⁻⁵	4,7 · 10 ²	3,3 · 10 ¹⁶
1 · 10 ⁻⁶	4,7 · 10 ³	3,3 · 10 ¹⁶
1 · 10 ⁻⁷	4,7 · 10 ⁴	3,3 · 10 ¹⁶
1 · 10 ⁻⁸	4,7 · 10 ⁵	3,3 · 10 ¹⁶
1 · 10 ⁻⁹	4,7 · 10 ⁶	3,3 · 10 ¹⁶

а если давление выражено в микронах ртутного столба, то

$$\lambda \approx \frac{5}{p} \text{ см.} \quad (3)$$

Средняя длина свободного пробега молекул для температур, отличных от табличной, может быть найдена из простого соотношения

$$\lambda_{T_2} = \frac{T_2}{T_1} \lambda_{T_1} \quad (4)$$

Так, например:

$$\lambda_{-187} = \frac{86}{293} \lambda_{20} = 0,29 \lambda_{20},$$

$$\lambda_{-76} = \frac{197}{293} \lambda_{20} = 0,67 \lambda_{20},$$

$$\lambda_0 = \frac{273}{293} \lambda_{20} = 0,94 \lambda_{20},$$

$$\lambda_{100} = \frac{373}{293} \lambda_{20} = 1,3 \lambda_{20},$$

$$\lambda_{1000} = \frac{1273}{293} \lambda_{20} = 4,5 \lambda_{20}.$$

Табл. 1 также показывает относительность обычно принятого представления о вакууме как о безвоздушном пространстве, поскольку даже при давлении 10^{-7} мм рт. ст., которое может быть получено только при использовании наиболее совершенных конструкций современных высоковакуумных пароструйных насосов, в каждом кубическом сантиметре еще остается более трех миллиардов молекул газа.

Важнейшие свойства газа и явления, происходящие в газовой среде, изменяются в зависимости от соотношения между средней длиной свободного пробега λ и характерным линейным размером сосуда d , в котором находится газ.

Состояние газа, при котором $\lambda \gg d$, принято называть «высоким вакуумом»; если $\lambda \ll d$, то применяют термин «низкий вакуум». Промежуточное состояние газа, когда $\lambda \approx d$, иногда называют «средним вакуумом».

Рассмотрим диффузию, теплопроводность, вязкость газа и характер его движения по трубопроводу в процессе откачки при различных соотношениях между λ и d .

а) Диффузия газов

Представим себе замкнутый объем, разделенный на две части непроницаемой перегородкой. Пусть в обеих частях этого объема под одним и тем же давлением находятся два различных газа. Если перегородку убрать, то вследствие теплового движения молекул оба газа будут проникать друг в друга, так что в конце концов образуется смесь газов с одинаковой молекулярной концентрацией обоих газов во всем объеме.

В случае низкого вакуума ($\lambda \ll d$) скорость диффузии вследствие взаимного столкновения молекул значительно меньше, чем при высоком вакууме ($\lambda \gg d$), и зависит от давления и температуры, при которой находится газ, а также от градиента парциального давления (парциальным давлением газа, входящего в смесь, называется то давление, которое этот газ имел бы, если бы в объеме смеси он был только один). В условиях низкого вакуума — при малом градиенте давления — установление однородной смеси за счет взаимной диффузии требует довольно значительного времени.

Чем ниже температура газа и больше его давление, тем, следовательно, меньше скорости теплового движения

молекул и меньше длина их свободного пробега и тем медленнее протекают процессы взаимной диффузии.

В случае высокого вакуума, когда столкновения между молекулами газа практически отсутствуют, взаимная диффузия происходит фактически мгновенно, так как молекулы обоих газов сразу же попадают в самые отдаленные части объема.

Эта особенность диффузии в условиях высокого вакуума находит широкое практическое применение в вакуумной технике.

На принципе диффузии откачиваемого газа в струю пара рабочей жидкости основано устройство пароструйных насосов, с помощью которых производится откачка большинства высоковакуумных систем.

Наиболее легкие газы водород и гелий имеют максимальную скорость диффузии в воздух. Если коэффициент диффузии водорода в воздух принять за единицу, то у гелия он будет равен 0,89, а у неона 0,42. Высокий коэффициент диффузии гелия широко используется в современных методах отыскания течей вакуумных систем. Коэффициент диффузии в воздух у подавляющего большинства остальных газов лежит в пределах от 0,18 до 0,29.

6) Теплопроводность газов

Если при давлениях порядка атмосферного и выше передача тепла от нагретого тела через газ прежде всего происходит за счет конвекции, то по мере понижения давления роль конвекции в теплопередаче постепенно уменьшается, а на первый план выступают молекулярные процессы. В разреженном газе передача тепла от нагретого тела к более холодному происходит за счет того, что молекулы, находящиеся вблизи нагретого тела, приобретают при столкновении с ним более высокую кинетическую энергию.

При этом в зависимости от соотношения между λ и d механизм передачи тепла осуществляется либо путем ряда последовательных столкновений молекул между собой, при каждом из которых избыток кинетической энергии передается следующей молекуле до тех пор, пока не будет достигнут контакт с поверхностью холодного тела, либо путем непосредственных соударений молекул, обладающих избытком кинетической энергии с самой поверхностью холодного тела.

В случае низкого вакуума ($\lambda \ll d$), когда определяющим является молекулярный процесс передачи тепла, теплопроводность газа практически не зависит от давления. Этот, на первый взгляд неожиданный вывод объясняется тем, что хотя с понижением давления количество переносчиков тепла уменьшается, однако одновременно уменьшаются потери тепла при столкновении молекул, поскольку сами столкновения становятся реже.

При дальнейшем понижении давления, когда средняя длина пробега молекул становится соизмеримой с размерами объема, в котором содержится разреженный газ, молекулы, имеющие более высокую кинетическую энергию, смогут достигать более холодного тела непосредственно, без столкновения с другими молекулами.

Таким образом, в случае высокого вакуума ($\lambda \gg d$) теплопроводность газа будет находиться в прямой зависимости от количества переносчиков тепла, т. е. от давления газа. Кроме того, она пропорциональна разности температур между нагретым и холодным телами и зависит также от состояния их поверхностей. Так, например, шероховатая поверхность, о которую молекулы многократно ударяются, прежде чем уйти от нее, более эффективна в части передачи своей температуры молекулам газа, чем гладкая полированная поверхность.

Зависимость теплопроводности газа от давления положена в основу устройства тепловых манометров, измеряющих давление разреженного газа в диапазоне от нескольких миллиметров до тысячных долей миллиметра ртутного столба.

Малая теплопроводность газа в условиях высокого вакуума используется для изготовления сосудов Дьюара. Эти сосуды имеют двойные стенки, между которыми создан высокий вакуум, вследствие чего в них длительное время могут храниться сжиженные газы.

в) Внутреннее трение и молекулярная вязкость

В том случае, когда поток газа движется через массу покоящегося газа, он увлекает за собой покоящийся газ, заставляя его перемещаться в направлении потока. Вследствие внутреннего трения или вязкости газа поток при этом замедляется. Поскольку механизм передачи количества движения и механизм передачи тепла во многом аналогичны, то внутреннее трение газа или его вязкость

должны в основном зависеть от тех же величин, что и теплопроводность.

В случае низкого вакуума ($\lambda \ll d$), когда главную роль играют межмолекулярные столкновения, вязкость подобно теплопроводности не зависит от давления.

В условиях высокого вакуума ($\lambda \gg d$), когда исчезают межмолекулярные столкновения, не может иметь места увлечение одного слоя газа другим, и молекулы движущегося газа будут непосредственно ударяться о стенки того сосуда, в котором они находятся. Понятие внутреннего трения газа здесь уже теряет смысл и приходится говорить об его молекулярной вязкости.

Молекулярная вязкость газа (которую можно отождествлять с трением газа о стенки трубопровода) в условиях высокого вакуума имеет свойства, полностью совпадающие со свойствами теплопроводности, т. е. она пропорциональна давлению и зависит от состояния поверхности. Величина молекулярной вязкости газа имеет большое значение для определения характера течения газа по трубопроводу в процессе его откачки.

г) Движение газа по трубопроводу при откачке

Количество газа, проходящее через поперечное сечение трубопровода в единицу времени, принято называть потоком газа.

В зависимости от степени разрежения течение газа по трубопроводу подчиняется различным режимам.

В самый начальный момент откачки, когда давление газа и его скорость достаточно велики, течение газа будет турбулентным. Характерной особенностью турбулентного режима является наличие завихрений в потоке, связанных с большими скоростями течения и инерцией газовой среды.

Когда скорость течения газа снижается, завихрения исчезают и поток газа принимает более упорядоченный характер. Основными силами, определяющими в этом случае режим течения газа, являются силы инерции газовой среды, вследствие чего сам режим носит название инерционного.

Поскольку с расчетом пропускной способности трубопровода в условиях турбулентного и инерционного режимов в вакуумной технике практически приходится встре-

чаться очень редко, то перейдем к рассмотрению так называемого вязкостного режима, который имеет место при еще меньших скоростях потока и еще более низком давлении.

Характерным для вязкостного режима течения является то, что средняя длина свободного пробега молекул все еще очень мала по сравнению с диаметром трубопровода.

Как уже указывалось ранее, в случае низкого вакуума вязкость газа, оказывающая существенное влияние на характер его движения по трубопроводу, не зависит от давления. У стенок трубопровода движение газа почти отсутствует, а по мере удаления от стенок слои газа скользят друг относительно друга со все возрастающей скоростью, достигающей максимальной величины в центре трубопровода. Поскольку со стенками трубопровода сталкиваются только находящиеся около них молекулы газа, то на скорость потока решающее влияние оказывает не состояние поверхности стенок, а геометрические размеры и конструкция трубопровода.

В зоне вентилей, изгибов, диафрагм и иных преград, препятствующих прямолинейному потоку газа, наблюдается некоторое сжатие линий потока, возникающее из-за его стремления сохранить свою непрерывность. Поэтому сопротивление этих участков трубопровода вязкостному потоку будет даже несколько больше, чем можно было бы ожидать за счет изменения геометрических параметров.

При дальнейшем понижении давления, когда средняя длина свободного пробега молекул становится соизмеримой с диаметром трубопровода, возникает новый тип потока, соответствующий молекулярному режиму течения газа. Переход от вязкостного режима к молекулярному происходит постепенно, в интервале давлений, изменяющихся почти в 50 раз. При этом пропадает влияние внутреннего трения или вязкости, так как столкновения между молекулами становятся все реже и реже и главную роль начинают играть соударения молекул о стенки трубопровода. В условиях молекулярного потока молекулы перемещаются по трубопроводу независимо друг от друга, практически не испытывая между собой столкновений.

Поскольку переход от вязкостного режима к молекулярному происходит постепенно, то между ними имеет место промежуточный режим течения газа называемый молекулярно-вязкостным, при котором наряду с внутренним

трением газа сказывается и независимое (без столкновений) тепловое движение молекул.

Вязкостный режим имеет место в том случае, когда произведение среднего давления p мк. рт. ст. на диаметр трубопровода d см будет:

$$pd > 500 \text{ мк} \cdot \text{см} \left(\lambda_{\text{см}} < \frac{d_{\text{см}}}{100} \right).$$

Молекулярный режим имеет место при условии

$$pd < 15 \text{ мк} \cdot \text{см} \left(\lambda_{\text{см}} > \frac{d_{\text{см}}}{3} \right).$$

Молекулярно-вязкостный режим имеет место, когда

$$15 < pd < 500.$$

(В этом случае пропускную способность трубопровода можно считать равной сумме пропускных способностей для молекулярного и вязкостного режимов.)

Хотя приближенно считают, что верхняя граница вязкостного режима определена условием $\frac{\lambda}{d} = 0,1 \frac{d}{L}$ (где L — длина трубопровода), однако для простоты большинства практических расчетов можно вязкостный режим отнести ко всей области низкого вакуума, вплоть до атмосферного давления.

д) Расчеты трубопроводов

Одним из основных элементов любой вакуумной системы является вакуумный насос, обладающий определенной быстротой действия.

Быстрота действия насоса S_n (называемая иногда быстротой откачки или скоростью откачки) измеряется объемом газа, проходящим под давлением p через сечение впускного патрубка насоса за единицу времени и выражается формулой

$$S_n = \frac{Q}{p} \text{ л/сек}, \quad (5)$$

где Q — количество газа, удаляемого насосом из разрежаемого объема в единицу времени;

p — давление у впускного патрубка насоса.

Ввиду того, что откачиваемый объем, как правило, подключается к вакуумному насосу через соединительный трубопровод, который, как всякий канал, оказывает сопротив-

ление движущемуся через него потоку газа, на концах трубопровода возникает перепад давлений, вследствие чего эффективная быстрота откачки объема $S_{\text{эф}}$ оказывается меньше, чем быстрота действия насоса.

Для вычисления эффективной быстроты откачки разрежаемого объема необходимо знать сопротивление, которое оказывает трубопровод потоку газа. Это сопротивление W определяется как перепад давлений на концах трубопровода, отнесенный к единице потока:

$$W = \frac{p_1 - p_2}{Q} \quad (6)$$

Величина, обратная сопротивлению трубопровода, носит название его *пропускной способности*:

$$U = \frac{1}{W} = \frac{Q}{p_1 - p_2} \quad (7)$$

Пропускная способность показывает количество газа, протекающего через поперечное сечение трубопровода в единицу времени при перепаде давлений на нем, равном единице давления. Так же как и быстрота откачки, пропускная способность измеряется обычно в литрах в секунду. Пропускная способность трубопровода изменяется не только в зависимости от его геометрических размеров, но зависит также от степени разрежения, определяющей режим течения газа, а также от рода газа и его температуры.

Однако на практике чаще всего приходится иметь дело с откачкой воздуха, находящегося при комнатной температуре (20°C), через трубопроводы, имеющие круглое сечение.

В этом случае для вязкостного режима пропускная способность трубопровода может быть определена по формуле

$$U = 0,18 \frac{d^4}{L} p \text{ л/сек}, \quad (8)$$

где d и L — соответственно диаметр и длина трубопровода, см;

p — среднее давление в трубопроводе, мм (1 мм = 0,001 мм рт. ст.).

В приложении 1 приведена пропускная способность круглого трубопровода для вязкостного режима в зависимости от давления откачиваемого воздуха.

В том случае, если производится откачка не воздуха, а какого-либо другого газа, то, учитывая значение вязкости различных газов, можно, умножая (8) на соответствующее отношение $U_{\text{газ}}/U_{\text{возд}}$, получить значение пропускной способности трубопровода для данного газа:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{водорода}} &= 2,1 U_{\text{возд}} \\ U_{\text{паров воды}} &= 1,9 U_{\text{возд}} \\ U_{\text{азота}} &= 1,04 U_{\text{возд}} \\ U_{\text{гелия}} &= 0,93 U_{\text{возд}} \\ U_{\text{неона}} &= 0,58 U_{\text{возд}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Как видно из приведенных данных [Л. 9], вязкостный поток для азота и гелия практически мало отличается от воздуха, в то время как для неона (обладающего большей вязкостью, чем воздух) он значительно меньше, а для водорода и водяных паров (обладающих меньшей вязкостью по сравнению с воздухом) он значительно больше.

Поскольку размеры откачиваемого сосуда, как правило, бывают больше диаметра соединительного трубопровода, то следует учитывать также пропускную способность отверстия (входной диафрагмы). Для вязкостного потока воздуха через круглое отверстие диаметром d пропускная способность с допустимой в большинстве случаев погрешностью может быть определена по формуле

$$U_{\text{отв}} = 15,7 d^2 \text{ л/сек.} \quad (10)$$

В случае молекулярного режима течения газа пропускная способность трубопровода не зависит от давления и для воздуха при 20°C выражается формулой

$$U = 12,1 \frac{d^3}{L} \alpha \text{ л/сек,} \quad (11)$$

где α — коэффициент размера трубопровода, учитывающий сопротивление входной диафрагмы.

Изменение коэффициента размера трубопровода α для различных соотношений диаметра трубопровода d и его длины L приведены в табл. 2.

В большинстве практических расчетов пропускной способности трубопроводов для $L > 20d$ с точностью до 10% можно не учитывать сопротивление входной диафрагмы и брать $\alpha = 1$.