

К. М. ОВСЯННИКОВ

ОСНОВЫ РАСЧЕТА  
ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ  
В ЛИТЕЙНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ



К. М. ОВСЯННИКОВ

ОСНОВЫ РАСЧЕТА  
ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ  
В ЛИТЕЙНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО „МАШИНОСТРОЕНИЕ“  
ЛЕНИНГРАД 1971

**Основы расчета вакуумных систем, применяемых в литейном производстве.** Овсянников К. М., Л., «Машиностроение», 1971 г. 80 стр., табл. 32, илл. 29, библи. 18 назв.

В книге изложены основные понятия о вакууме, важнейших свойствах разреженного газа, а также теоретические положения, связанные с процессом откачки газов из разрежаемых сосудов. Описаны важнейшие факторы, определяющие выбор типа вакуумных насосов и конструктивных элементов вакуумных систем, применяемых в металлургическом и литейном производствах.

Для облегчения и упрощения расчета вакуумных систем приводятся таблицы, графики и номограммы, а также даны примеры практического расчета этих систем.

Книга предназначена для инженерно-технических работников мартеновских и литейных цехов, заводских лабораторий, проектных и научно-исследовательских организаций, конструкторов, занимающихся разработкой литейного оборудования, а также может быть использована студентами машиностроительных вузов.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В решениях XXIII съезда КПСС большое внимание уделено повышению качества продукции машиностроения, увеличению надежности и долговечности машин, приборов и оборудования.

Большое влияние на повышение качества продукции машиностроения оказывает технический уровень заготовительного, особенно сталеплавильного и литейного производств.

Качество металла и отливок может быть значительно повышено за счет широкого применения вакуумирования в сталеплавильном и литейном производствах. Вакуумирование металла способствует уменьшению содержания вредных газов, металлических включений, значительному улучшению структуры и физико-механических свойств слитков и фасонных отливок.

Необходимость широкого применения вакуумирования в сталеплавильном и литейном производствах особенно важна вследствие все возрастающего масштаба применения в современном машиностроении высокопрочных, жаростойких, кислотоупорных и коррозионностойких материалов, тугоплавких, редких металлов и их сплавов. Получение подобных материалов обеспечивается лишь при использовании вакуума.

Изменением действующих на жидкий металл давлений в сторону как низких, так и высоких значений можно не только повышать степень чистоты металла, но и оказывать воздействие на химические реакции, влиять на протекание процессов обезуглероживания и раскисления металлов, регулировать скорости протекания процессов кристаллизации отливок.

Исследованиями советских ученых установлено, что качество вакуумированного металла зависит от величины и стабильности разрежения, времени его создания и снятия, периода нахождения частиц жидкого металла под воздействием разрежения и от ряда других факторов. В свою очередь, все эти факторы определяются конструкцией вакуумных установок, систем и их конструктивных элементов. Поэтому знание широким кругом металлургов и литейщиков основ вакуумной техники и расчета вакуумных систем будет содействовать более эффективному применению вакуума в сталеплавильном и литейном производствах, позволит получать высококачественный металл, более надежные и долговечные литые заготовки деталей современных машин и приборов.

## ПОНЯТИЕ О ВАКУУМЕ И ВАЖНЕЙШИХ СВОЙСТВАХ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

В науке и технике под вакуумом принято понимать разреженность газа, т. е. состояние газа, имеющего плотность меньшую, чем его плотность при давлении в одну физическую атмосферу и температуре  $0^{\circ}\text{C}$  [15].

За единицу давления в вакуумной технике принимается один миллиметр ртутного столба (*мм рт. ст.*; *тор*). Нормальное атмосферное давление —  $760\text{ мм рт. ст.}$  В табл. 1 дан перевод различных единиц давления.

Сосуд, в котором создается вакуум, называется разрежаемым сосудом. Полное давление в любом сосуде складывается из суммы парциальных давлений находящихся в нем газов и паров (под парциальным давлением газа понимают давление, которое оказал бы газ, входящий в газовую смесь, если бы из нее были удалены все

Перевод единиц

Единицы измерения	<i>тор</i>	<i>дин/см<sup>2</sup></i>	<i>мбар</i>	<i>бар</i>
1 <i>мм рт. ст.</i>	1	$1,33 \cdot 10^3$	1,33	$1,33 \cdot 10^{-3}$
1 <i>дин/см<sup>2</sup></i> , 1 <i>мкбар</i>	$0,75 \cdot 10^{-3}$	1	$10^{-3}$	$10^{-6}$
1 <i>мбар</i> , $10^3$ <i>дин/см<sup>2</sup></i>	0,75	$10^3$	1	$10^{-3}$
1 <i>бар</i> , $10^6$ <i>дин/см<sup>2</sup></i>	750	$10^6$	$10^3$	1
1 <i>кг/м<sup>2</sup></i> , 1 <i>мм вод. ст.</i>	$0,73 \cdot 10^{-1}$	$0,98 \cdot 10^2$	$0,98 \cdot 10^{-1}$	$0,98 \cdot 10^{-4}$
1 <i>кг/см<sup>2</sup></i> , 1 <i>атм</i>	735	$0,98 \cdot 10^6$	$0,98 \cdot 10^3$	0
1 <i>атм</i> , 760 <i>мм рт. ст.</i>	760	$1,01 \cdot 10^6$	$1,01 \cdot 10^3$	
1 <i>фунт/дюйм<sup>2</sup></i>	5,17 · 10	$0,68 \cdot 10^5$	$0,68 \cdot 10^2$	
1 <i>мк</i> , $1 \cdot 10^{-3}$ <i>мм рт. ст.</i>	$10^{-3}$	1,33	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$
1 <i>дюйм рт. ст.</i>	25,4	$0,33 \cdot 10^5$	$0,33 \cdot 10^2$	$0,33 \cdot 10^{-1}$

остальные газы, при условии сохранения первоначальных объема и температуры).

Если выразить количество каждого входящего в смесь газа в единицах  $PV$ , то

$$P_{см}V_{см} = P_1V_{см} + P_2V_{см} + \dots + P_nV_{см},$$

где

$V_{см}$  — объем смеси газов;  
 $P_{см}$  — полное давление смеси газов;  
 $P_1, P_2, \dots, P_n$  — парциальные давления газов, составляющих смесь.

После сокращения  $V_{см}$  получим

$$P_{см} = P_1 + P_2 + \dots + P_n. \quad (1)$$

Выражение (1) известно как закон Дальтона.

В табл. 2 приведен состав атмосферного воздуха и величины парциальных давлений составляющих его газов.

Под газом в вакуумной технике понимают как химически индивидуальный газ, так и смесь газов.

Плотность газа  $\rho$  равна произведению плотности частиц на массу частиц

$$\rho = nt, \text{ Г/см}^3, \quad (2)$$

где  $n$  — плотность частиц (число молекул в единице объема газа),  $\text{см}^{-3}$ ;

$t$  — масса частиц (молекул), Г.

Таблица 1

давления

$\frac{\text{кг}}{\text{м}^2},$ $\frac{\text{мм вод. ст.}}{\text{мм вод. ст.}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}, \text{ атм}$	$\frac{\text{атм.}}{760 \text{ мм рт. ст.}}$	$\frac{\text{фунт}}{\text{дюйм}^2}$	$\text{мк}$	$\frac{\text{дюйм рт. ст.}}{\text{дюйм рт. ст.}}$
13,5	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$10^9$	$3,93 \cdot 10^{-2}$
$1,01 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	0,75	$2,95 \cdot 10^{-6}$
10,1	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$0,98 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$0,75 \cdot 10^3$	$2,95 \cdot 10^{-2}$
$1,01 \cdot 10^4$	1,01	0,98	$1,45 \cdot 10^2$	$0,75 \cdot 10^6$	$2,95 \cdot 10$
1	$10^{-4}$	$0,96 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$0,73 \cdot 10^2$	$2,89 \cdot 10^{-3}$
$10^4$	1	0,96	$1,42 \cdot 10$	$0,73 \cdot 10^6$	$2,89 \cdot 10$
$1,03 \cdot 10^4$	1,03	1	$1,46 \cdot 10$	$0,76 \cdot 10^6$	$2,99 \cdot 10$
$0,70 \cdot 10^3$	$0,70 \cdot 10^{-1}$	$0,68 \cdot 10^{-1}$	1	$5,17 \cdot 10^4$	2,03
$1,35 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^{-6}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$	$1,93 \cdot 10^{-5}$	1	$3,93 \cdot 10^{-5}$
$1,34 \cdot 10^3$	$1,34 \cdot 10^{-1}$	$0,33 \cdot 10^{-1}$	0,49	$2,54 \cdot 10^4$	1

## Состав атмосферного воздуха

Газы	Объем газов, %	Парциальное давление, мм рт. ст.
N <sub>2</sub>	78,08	5,95 · 10 <sup>2</sup>
O <sub>2</sub>	20,95	1,59 · 10 <sup>2</sup>
Ar	0,93	7,05
CO <sub>2</sub>	0,033	2,5 · 10 <sup>-1</sup>
Ne	1,8 · 10 <sup>-3</sup>	1,4 · 10 <sup>-2</sup>
He	5,24 · 10 <sup>-4</sup>	4,0 · 10 <sup>-3</sup>
Kr	1,1 · 10 <sup>-4</sup>	8,4 · 10 <sup>-4</sup>
H <sub>2</sub>	5,0 · 10 <sup>-5</sup>	3,8 · 10 <sup>-4</sup>
Xe	8,7 · 10 <sup>-6</sup>	6,6 · 10 <sup>-5</sup>
H <sub>2</sub> O	1,57	1,19 · 10 <sup>1</sup>
{ 50% RH }	—	—
{ 25% C }	—	—
CH <sub>4</sub>	2 · 10 <sup>-4</sup>	1,5 · 10 <sup>-3</sup>
O <sub>3</sub>	7 · 10 <sup>-6</sup>	5,3 · 10 <sup>-5</sup>
N <sub>2</sub> O	5 · 10 <sup>-5</sup>	3,8 · 10 <sup>-4</sup>

Из законов идеального газа [4] следует, что давление газа пропорционально его абсолютной температуре

$$P = nkT, \quad (3)$$

где  $T$  — абсолютная температура;

$k$  — общая для всех газов постоянная Больцмана;

$$k = \frac{R}{N}, \text{ эрг/моль} \cdot \text{град}; \quad (4)$$

$R = 8,315 \cdot 10^7$  — газовая постоянная, эрг/моль · град;

$N$  — число молекул в 1 грамм-молекуле.

$$N = \frac{M}{m}, \quad (5)$$

где  $M$  — молекулярный вес, Г/моль.

Подставляя в уравнение (3) значение  $k$  из уравнения (4), заменяя значение  $N$  из уравнения (5) и принимая во внимание уравнение (2), получим важное уравнение, показывающее зависимость между давлением  $P$  и плотностью газа  $\rho$

$$P = \rho \frac{RT}{M}, \quad (6)$$

где  $T$  — абсолютная температура (по шкале Кельвина), определяемая уравнением

$$T = 273,162 + t \quad (t — температура по шкале Цельсия, °C).$$

Задача вакуумной техники заключается в том, чтобы в заданном объеме газа  $V$  уменьшить его плотность  $\rho$ . Однако все старания физиков, конструкторов, литейщиков и металлургов сконцентрированы на том, чтобы понизить давление  $P$ . Это вполне естественно, так как, согласно уравнению (6), более низким плотностям газов соответствуют и более низкие давления. При чтении уравнения (6) нетрудно заметить, что снижения давления  $P$  (при  $V = \text{const}$ ) можно добиться не только путем уменьшения плотности газа  $\rho$  (при  $T = \text{const}$ ), но также и в результате понижения температуры  $T$  (при  $\rho = \text{const}$ ). При проектировании и эксплуатации вакуумных установок необходимо учитывать это важное обстоятельство, так как в объеме газа  $V$  не всегда поддерживается одинаковая температура  $T$ .

Объем газа  $V$  играет в вакуумной технике очень большую роль. Обычно под объемом газа понимают:

а) чисто геометрический, зачастую заданный объем разрежаемого сосуда или всей вакуумной установки;

б) откачиваемый насосом объем газа, отнесенный к определенному давлению.

Взаимосвязь объема газа  $V$ , давления  $P$  и температуры  $T$  видна из приводимого ниже уравнения состояния идеального газа, от которого разреженный газ отличается незначительно

$$PV = n_m RT, \quad (7)$$

где  $n_m$  — число молей в объеме  $V$  при данных температуре и давлении.

Среднее арифметическое значение длин свободного пробега молекул газа, определяемое за достаточно большой промежуток времени, называется средним свободным пробегом  $\lambda$ .

Средняя длина свободного пробега молекул однородного газа определяется достаточно точно как функция плотности газа и диаметра молекулы  $2a$  [13].

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi (2a)^2 \rho}, \quad \text{см}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  — средняя длина свободного пробега молекул, см;

$\rho$  — плотность газа,  $\Gamma/\text{см}^3$ ;

$a$  — радиус молекулы, см;

$\pi = 3,1416$  — постоянное число.

При неизменной температуре средняя длина свободного пробега молекул  $\lambda$  обратно пропорциональна давлению газа  $P$ , т. е.

$$\lambda = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{P}, \quad \text{см}, \quad (9)$$

где  $P$  — давление, мм рт. ст.



Число молекул и средние длины свободного пробега молекул при различных давлениях и температуре воздуха 20° С

Давление, мм рт. ст.	Число молекул в 1 см <sup>3</sup>	Средняя длина свободного пробега молекул, см
760	$2,5 \cdot 10^{19}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$
1	$3,3 \cdot 10^{16}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{15}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$
$1 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{14}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$
$1 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{13}$	4,7
$1 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{12}$	4,7 · 10
$1 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{11}$	$4,7 \cdot 10^2$
$1 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{10}$	$4,7 \cdot 10^3$
$1 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^9$	$4,7 \cdot 10^4$
$1 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^8$	$4,7 \cdot 10^5$
$1 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^7$	$4,7 \cdot 10^6$

В табл. 3 приведены число молекул в 1 см<sup>3</sup> и средние длины свободного пробега молекул при различных давлениях и температуре 20° С (для воздуха).

Данные табл. 3 показывают относительность распространенного представления о вакууме, как о безвоздушном пространстве, поскольку даже при давлении  $10^{-7}$  мм рт. ст., которое может быть получено только при применении наиболее совершенных конструкций современных высоковакуумных насосов, в каждом 1 см<sup>3</sup> газа остается более трех миллиардов молекул газа [2]. Проведенный анализ остаточных газов в вакуумной системе металлургической печи показал, что при давлении  $10^{-3}$  мм рт. ст. в остаточном газе содержится <0,5% первоначального воздуха и около 70% воды. Остальное составляют органические пары таких веществ, как вакуумные уплотнения, вакуумная смазка, масло вакуумных насосов и т. д. [3].

На рис. 1-приведен график величин средней длины свободного пробега молекул различных газов в зависимости от величины давления. График построен на основе выражений (8) и (3), а также принятого из выражения (9) условия, что  $\lambda P = \text{const}$ .

Важнейшие свойства газов (их теплопроводность, вязкость, характер движения по трубопроводу в процессе откачки и т. п.) и явления, происходящие в среде разреженного газа (диффузия, испарение и т. п.), изменяются в зависимости от того, преобладают ли при тепловом движении молекул удары их о стенки сосуда или взаимные столкновения. Показателем этого является соотношение

между средней длиной свободного пробега молекул  $\lambda$  и линейным размером диаметра  $d$  того сосуда, в котором находится газ.

Разреженность газа в сосуде (или в трубопроводе), при которой средняя длина свободного пробега молекул значительно превышает линейные размеры этого сосуда, существенные для происходящего в нем процесса, т. е. когда  $\lambda \gg d$  или  $\frac{\lambda}{d} > 1$ , называется высоким вакуумом. Разреженность газа в сосуде (или в трубопроводе), при которой средняя длина свободного пробега молекул представляет собой величину того же порядка, что и линейные размеры сосуда, существенные для происходящего в нем процесса, т. е. когда  $\lambda \approx d$  или  $\frac{\lambda}{d} \approx 1$ , называется средним вакуумом.

Разреженность газов в сосуде (или в трубопроводе), при которой средняя длина свободного пробега молекул значительно меньше линейных размеров сосуда, существенных для происходящих в нем процессов, т. е. когда  $\lambda < d$  или  $\frac{\lambda}{d} < 1$ , называется низким вакуумом.

На рис. 2 приведена диаграмма, позволяющая выразить степени вакуума в определенных числовых значениях. Диаграмма построена на основе использования предельных значений размеров (максимальный диаметр  $d = 65$  см и минимальный  $d = 0,65$  см), применяемых на практике вакуумных приборов [14]. Таким образом, высокому вакууму соответствует давление примерно  $10^{-4}$  мм рт. ст. и ниже; среднему вакууму — давление от  $10^{-2}$  до  $10^{-4}$  мм рт. ст. и низкому — давление выше  $10^{-2}$  мм рт. ст.

Установки для вакуумирования металлов и их сплавов, вакуумные плавильные печи, автоклавы для заливки литейных форм

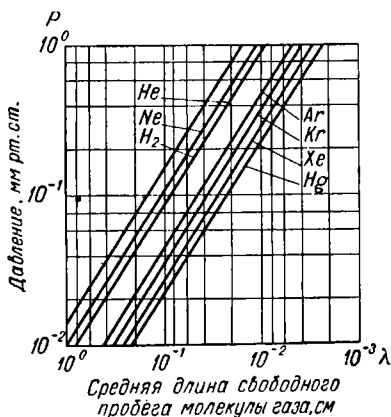


Рис. 1. График величин средней длины свободного пробега молекул различных газов

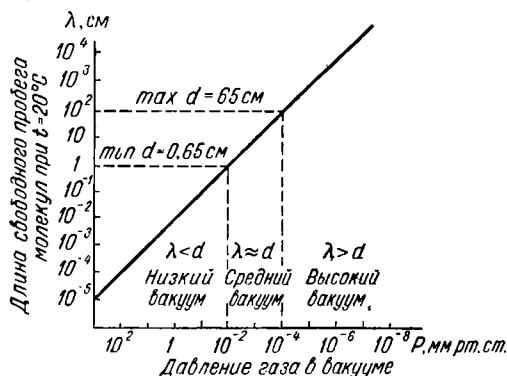


Рис. 2. График зависимости глубины вакуума от длины свободного пробега молекул

в вакууме, литейные машины для заливки литейных форм методом вакуумного всасывания, установки для вакуумной сушки литейных форм и стержней, внутренние диаметры рабочего пространства которых исчисляются метрами, работают при давлении около 1 мм рт. ст., т. е. при низком вакууме. Вакуумные индукционные и дуговые электрические установки для плавки и центробежной заливки легкоокисляющихся и тугоплавких сплавов, внутренние диаметры рабочего пространства которых (установок) немногим превышают 1 м, чаще всего работают при давлении  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  мм рт. ст. — средний вакуум. Исключение составляют отдельные вакуумные установки для плавки тугоплавких сплавов, работающие при давлении  $10^{-6}$ . Отсюда следует, что в литейном и металлургическом производствах находит применение главным образом низкий и средний вакуум.

## II

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ОТКАЧКИ ГАЗОВ ИЗ РАЗРЕЖАЕМОГО СОСУДА

Комплекс взаимосвязанных вакуумных насосов, трубопроводов и приборов для создания и измерения разреженности газа называется вакуумной системой.

Каждый самостоятельный насос, манометр, прибор, каждая деталь вакуумной системы, выполняющие определенные функции в процессе создания разреженности газа, именуется конструктивными элементами вакуумной системы.

Установка, состоящая из вакуумной системы, машин и устройств, обеспечивающих ее действие, и вспомогательных приспособлений носит название вакуумной установки.

К машинам и устройствам, обеспечивающим действие вакуумной установки, относятся редуктор, электродвигатель, механизм закрывания и т. п. К вспомогательным приспособлениям относятся печь для нагревания сосуда, площадки обслуживания и др.

Совокупность труб, по которым перемещается газ из разрежаемого сосуда, именуется вакуумным трубопроводом, или точнее, вакуумной системой.

Уменьшение плотности газа до значения, меньшего чем его плотность, при давлении в одну физическую атмосферу при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  называется разрежением газа.

Разрежение, осуществляемое путем удаления газа механическим и бустерным насосом, носит название «откачка».

В связи с тем, что в литейном и металлургическом производствах преимущественно применяются механические насосы, в дальнейшем изложении вместо термина «быстрота разрежения» принят термин «быстрота откачки».

Процесс, обратный разрежению газа, например при создании в сосуде избыточного воздушного давления, называется уплотнением газа.

При откачке газа из сосуда газ перемещается через трубопровод в насос. Перемещение газа в трубопроводе под действием разности давлений (или температур) на его концах носит название «течение газа».

Течение газа зависит от степени вакуума. При высоком вакууме течение газа имеет молекулярный характер, при среднем вакууме — вязкостно-молекулярный характер и при низком вакууме — вязкостный характер.

Количество газа, протекающее в одну секунду через сечение трубопровода, принято называть потоком газа. При этом количество газа выражается либо в единицах массы, либо в единицах  $PV$ , где  $P$  — давление газа, а  $V$  — его объем. Если давление в данном месте трубопровода равно  $P$ , а быстрота действия вакуумной системы в том же месте равна  $S$ , то произведение  $PS$  выражает собой поток газа в рассматриваемом месте трубопровода [5].

Величина потока газа обозначается буквой  $Q$ , следовательно,

$$Q = PS. \quad (10)$$

Поток газа в данном месте трубопровода иногда называют производительностью вакуумной системы, относящейся к данному, конкретному месту трубопровода.

Например, если  $P_1$  — давление в разрежаемом сосуде, а  $S$  — быстрота откачки этого сосуда, то произведение  $P_1S$ , характеризующее поток газа у входа в трубопровод, в то же время является и производительностью вакуумной системы в этом месте.

Точно так же, если  $P_2$  — давление у впускного патрубка насоса, а  $S_n$  — быстрота действия насоса, то произведение  $P_2S_n$  выражает собой поток газа, а также и производительность вакуумной системы у впускного патрубка насоса.

По ГОСТу 5197—50 под производительностью насоса принято понимать количество газа (выраженное в единицах  $PV$ ), удаляемое насосом в единицу времени из разрежаемого сосуда.

При неизменной температуре произведение давления газа на его объем прямо пропорционально массе газа. Отсюда следует, что величина  $PV$  вполне определяет количество газа, если его температура остается неизменной. При решении многих практических задач вакуумной техники бывает удобно количество газа выражать именно через произведение  $PV$  [5].

Производительность насоса в этом случае определяется формулой

$$\Pi_n = P_2 \frac{dV}{dt}, \quad (11)$$

где  $P_2$  — давление у впускного патрубка насоса, *мм рт. ст.*

Зачастую производительность насоса бывает постоянной во времени. В таких случаях для ее вычисления оказывается достаточно простой формулы

$$\Pi_n = P_2 V. \quad (12)$$

Единицы производительности насоса  $P_n$  в зависимости от единиц, в которых выражены давление  $P_2$ , объем газа  $V$  и время  $t$ , приведены в табл. 4.

Таблица 4

Единицы производительности насоса

Давление	<i>мм рт. ст.</i> <i>л/сек</i>	<i>кг/ч</i> (воздух)	<i>атм·см³/ч</i>	<i>мк·фут³/мин</i>
<i>мм рт. ст. л/сек</i>	1	$6,12 \cdot 10^{-3}$	4738	2120
<i>кг/ч (воздух 20° С)</i>	163	1	$7,73 \cdot 10^6$	$3,46 \cdot 10^6$
<i>атм·см³/ч</i>	$2,11 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-6}$	1	0,447
<i>мк·фут³/мин</i>	$4,719 \cdot 10^{-4}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	2,236	1

При откачке газа из разрежаемого сосуда давление у впускного патрубка насоса падает быстрее, чем в разрежаемом сосуде, что является следствием сопротивления потоку газа в трубопроводе. Следовательно, при откачке газа из разрежаемого сосуда на концах трубопровода создается разность давлений

$$P_1 - P_2,$$

где  $P_1$  — давление в разрежаемом сосуде в данный момент времени, *мм рт. ст.*;

$P_2$  — давление у впускного патрубка насоса, *мм рт. ст.*, причем всегда  $P_1 > P_2$ .

В связи с различием в скорости снижения давления в разрежаемом сосуде и у впускного патрубка насоса следует различать понятия о скорости откачки разрежаемого сосуда и о скорости действия насоса.

Под скоростью откачки разрежаемого сосуда понимается отнесенное к единице времени уменьшение плотности газа в сосуде или объем газа, поступающий в единицу времени из сосуда в трубопровод при давлении  $P_1$  в данный момент времени. Так как скорость откачки сосуда изменяется с изменением давления, то ее значение обычно относится к определенному моменту времени. Поэтому скорость откачки разрежаемого сосуда характеризуется производной во времени от объема удаляемого газа при давлении, имеющем место в данный момент времени,

$$S = \left( \frac{dV}{dt} \right) P_1, \quad (13)$$

где  $P_1$  — давление в разрежаемом сосуде в данный момент времени, *мм рт. ст.*,

Быстрота откачки газа из разрежаемого сосуда часто остается постоянной во времени. В таких случаях для ее обозначения оказывается достаточно простой формулы

$$S = \frac{V}{t}. \quad (14)$$

За единицу быстроты откачки газа из разрежаемого сосуда принимаются *л/сек* или *м³/ч*.

Единицы быстроты откачки газа приведены в табл. 5.

Таблица 5

Единицы быстроты откачки газа

Единица измерения	<i>см³/сек</i>	<i>л/сек</i>	<i>л/мин</i>	<i>м³/ч</i>	<i>м³/мин</i>
<i>см³/сек</i>	1	0,001	0,060	0,0036	0,00006
<i>л/сек</i>	1000	1	60	3,6	0,06
<i>л/мин</i>	16,67	0,0167	1	0,060	0,001
<i>м³ч</i>	277,8	0,2778	16,67	1	60,0
<i>м³/мин</i>	16 670	16,67	1000,0	0,0167	1

Быстротой действия насоса называется объем газа, удаляемый насосом в единицу времени из присоединенной к нему системы трубопроводов и разрежаемого сосуда. Объем удаляемого газа в этом случае измеряется при давлении у впускного патрубка насоса в данный момент времени.

Быстрота действия насоса  $S_n$ , также характеризуется производной во времени от объема удаляемого газа при давлении в данный момент времени:

$$S_n = \left( \frac{dV}{dt} \right) P_2, \quad (15)$$

где  $P_2$  — давление у впускного патрубка насоса в данный момент времени, *мм рт. ст.*

Как и в предыдущем случае, быстрота действия насоса может определяться по формуле

$$S_n = \frac{V}{t} \quad (16)$$

при давлении, равном  $P_2$ .

За единицу быстроты действия насоса также принимаются *л/сек* или *м³/ч*.

Единицы быстроты откачки газа, приведенные в табл. 4, применимы и в данном случае.

По аналогии с величинами  $S$  и  $S_n$  можно предполагать, что быстрота действия вакуумной системы в любом данном сечении трубопровода равна

$$S_r = \left( \frac{dV}{dt} \right) P_r, \quad (17)$$

где  $P_r$  — давление в данном сечении трубопровода, в конкретный момент времени;

$dV$  — объем газа, проходящий через сечение трубопровода за промежуток времени  $dt$ .

Величины  $S$ ,  $S_n$  и  $S_r$  выражаются в одних единицах.

Количество газа, протекающее через поперечное сечение трубопровода в единицу времени при единичной разнице давления на концах трубопровода  $P_1 - P_2$ , или отношение потока газа  $Q$  к разности на концах трубопровода  $P_1 - P_2$  называется пропускной способностью трубопровода.

Пропускная способность трубопровода  $U$  определяется формулой

$$U = \frac{Q}{P_1 - P_2}, \quad (18)$$

где  $Q$  — поток газа;

$P_1$  — давление в разрежаемом сосуде в данный момент времени, *мм рт. ст.*;

$P_2$  — давление у впускного патрубка насоса, *мм рт. ст.*

Размерностью величины  $U$  является объем газа в единицу времени: *л/сек*, *м<sup>3</sup>/мин*.

Из выражения (18) поток газа может быть записан как

$$Q = U(P_1 - P_2). \quad (19)$$

Величина, обратная пропускной способности трубопровода, называется сопротивлением трубопровода потоку газа.

Сопротивление  $W$  трубопровода потоку газа определяется формулой

$$W = \frac{P_1 - P_2}{Q}. \quad (20)$$

Из выражения (20) поток газа может быть определен как

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{W}. \quad (21)$$

Сопротивление в вакуумном трубопроводе  $P_1 - P_2$  можно уподобить сопротивлению электрического тока в проводнике; тогда соотношения (19) и (21) будут аналогичны закону Ома в электротехнике. Сопротивления трубопровода потоку газа в вакуумной технике складываются таким же образом, как и сопротивления в электротехнике, согласно закону Кирхгофа:



при последовательном включении

$$W_{\text{сумм}} = W_1 + W_2 + W_3; \quad (22)$$

при параллельном включении

$$\frac{1}{W_{\text{сумм}}} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} + \frac{1}{W_3}. \quad (23)$$

Однако аналогия с законом Ома справедлива лишь при условии, что, подобно электрическому току в проводнике, поток газа  $Q$  в трубопроводе имеет постоянное значение для любого сечения трубопровода, включая его концы, т. е. если

$$P_1 S = U (P_1 - P_2) = P_2 S_n = Q. \quad (24)$$

Из выражения (24) следует, что если известен поток газа  $Q$ , то всегда можно определить быстроту разрежения на любом участке вакуумной системы. Например, быстрота откачки газа из разрежаемого сосуда (начало трубопровода) равна

$$S = \frac{Q}{P_1}; \quad (25)$$

быстрота действия насоса (у впускного патрубка)

$$S_n = \frac{Q}{P_2}. \quad (26)$$

Вообще быстрота разрежения в любом сечении неразветвленного трубопровода между разрежаемым сосудом и насосом равна

$$S_r = \frac{Q}{P_r}. \quad (27)$$

Из выражения (24) также следует, что при наличии сопротивления трубопровода, т. е. при  $P_1 > P_2$  быстрота откачки газа  $S$  из разрежаемого сосуда всегда меньше быстроты действия насоса  $S_n$ . Равенство  $S = S_n$  может осуществляться при условии  $P_1 = P_2$ , т. е. когда разрежаемый сосуд присоединен к насосу непосредственно, без трубопровода и, следовательно, давление в разрежаемом сосуде совпадает с впускным давлением насоса. В данном случае быстрота откачки определяется быстротой действия насоса. Практически это бывает очень редко. Почти всегда в вакуумной системе требуется промежуточный трубопровод, который содержит клапаны, отстойники, ловушки и т. д. Это создает сопротивление потоку газа, которое приводит к тому, что всегда  $S > S_n$ .

Из выражения (24) можно вывести [5] одно очень важное для вакуумной техники уравнение, связывающее быстроту откачки газа  $S$  из разрежаемого сосуда с быстротой действия насоса  $S_n$  и пропускной способностью трубопровода  $U$ .

Представим выражение (24) в виде уравнений

$$S = U \frac{P_1 - P_2}{P_1}; \quad S = U \frac{P_1 - P_2}{P_2}.$$

Далее

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{U} \cdot \frac{P_1}{P_1 - P_2}; \quad \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U} \cdot \frac{P_2}{P_1 - P_2}.$$

Вычитая из первого уравнения второе, получим

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U},$$

откуда

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}, \quad (28)$$

или

$$S = \frac{S_n U}{S_n + U}, \quad \text{или} \quad S_n = \frac{S U}{U - S}. \quad (29)$$

Уравнения (28) и (29) позволяют правильно ориентироваться при конструировании и расчете вакуумных систем.

В свою очередь, суммарная проводимость или пропускная способность трубопровода, согласно упомянутому выше закону Кирхгофа, при последовательном включении элементов выражается

$$U_{\text{сумм}} = U_1 + U_2 + U_3 \quad (30)$$

и при параллельном включении

$$\frac{1}{U_{\text{сумм}}} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}. \quad (31)$$

### III

## ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА

Для того чтобы в определенном объеме разрежаемого сосуда уменьшить плотность газа и вместе с этим уменьшить давление газа, необходимо удалить из этого сосуда газовые молекулы, что осуществляется с помощью вакуумных насосов.

При проектировании и расчете вакуумных установок нужно знать следующие основные факторы, определяющие выбор оборудования для получения вакуума: необходимую быстроту откачки газов из разрежаемого сосуда; пропускную способность трубопровода; быстроту действия насоса; количество газа или пара, возникающих при протекании процесса; газовыделение внутренними поверхностями разрежаемого сосуда и натекание газа; время откачки газов из разрежаемого сосуда.

Если пропускная способность трубопровода  $U \gg S_n$ , то, как и в случае непосредственного присоединения насоса к разрежаемому сосуду,  $S = S_n$ .

При таком присоединении к насосу можно определить скорость действия насоса  $S_n$ , зная объем сосуда  $V$  и наблюдая за падением давления во времени.

Если первоначальное давление в сосуде  $P$ , то за время  $dt$  в насос поступит количество газа  $PS \cdot dt$  (давление во впускном отверстии насоса все время остается равным давлению в сосуде). За тот же промежуток времени в сосуде произойдет убыль газа, равная  $V dp$ .

Эти количества газа равны, но противоположны по знаку, т. е.

$$PS dt = -V dp;$$

$$S dt = -V \frac{dp}{P}.$$

Для определения  $S$  интегрируем полученное давление в небольших пределах времени от 0 до  $t$ , чему соответствует малый перепад давления на впуске от  $P_1$  до  $P_2$ , при котором скорость действия насоса изменяется мало. Ее можно на данном промежутке считать постоянной.

Тогда

$$S \int_0^t dt = -V \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P}, \quad (32)$$

или

$$St = V \ln \frac{P_1}{P_2}.$$

Окончательно можно записать выражение для определения быстроты откачки

$$S = 2,3 \frac{V}{t} \lg \frac{P_1}{P_2}, \quad (33)$$

где  $V$  — объем разрежаемого сосуда,  $м^3$ ;

$t$  — время откачки,  $мин$ ;

$P_1$  и  $P_2$  — давления в сосуде в начале и в конце промежутка времени.

**Пример.** В сосуде объемом  $0,5 м^3$  необходимо снизить давление с  $760$  до  $1 мм рт. ст.$  за  $10$  минут. Найти быстроту откачки насоса, если он подсоединен к сосуду непосредственно.

Применяя уравнение (33), получим:

$$S_n = S = \frac{2,3 \cdot 0,5}{10} 60 \cdot 2,88 = 20,0 м^3/ч.$$

Вычисление  $S$  облегчается использованием графика для упрощенного расчета быстроты откачки (рис. 3), построенного согласно формуле

$$t = \tau \frac{V}{S}, \quad (34)$$

где  $\tau$  — безразмерная единица времени.

Для рассмотренного выше примера при понижении давления с  $760$  до  $1 мм рт. ст.$  от точки  $10^0$  оси ординаты проводится прямая линия до пересечения с наклонной прямой. Опущенный из точки пересечения с наклонной прямой перпендикуляр на ось абсцисс покажет цифру  $6,7$ , тогда из формулы (34) величина

$$S = \tau \frac{V}{t} = 6,7 \frac{0,5 \cdot 60}{10} = 20,1 м^3/ч.$$

Пропускная способность трубопровода определяется в зависимости от режима течения газа. При вязкостном режиме течения

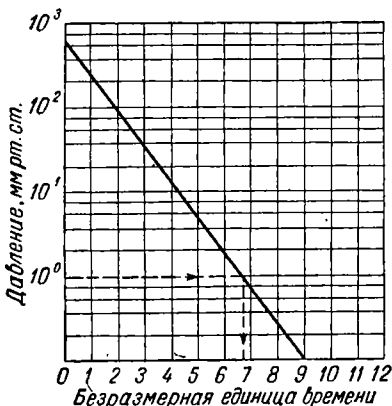


Рис. 3. График для упрощенного расчета быстроты откачки по формуле  $t = \tau \frac{V}{S}$

газа ( $\bar{P}d \geq 500$  см·мм рт. ст.) для воздуха при температуре  $20^\circ \text{C}$  пропускная способность круглого трубопровода может быть определена по формуле

$$U_{\text{г}} = 0,182 \frac{d^4}{L} \bar{P}, \text{ л/сек}, \quad (35)$$

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

$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2}$  — среднее давление в трубопроводе, мм рт. ст.

При молекулярном режиме течения газа ( $\bar{P}d < 15$  см·мм рт. ст.) для воздуха при температуре  $20^\circ \text{C}$  формула пропускной способности круглого трубопровода имеет вид

$$U_{\text{м}} = 12,1 \frac{d^3}{L}, \text{ л/сек}. \quad (36)$$

При молекулярно-вязкостном режиме течения газа пропускную способность круглого трубопровода можно определять по формуле (36), при этом ко второй ее части добавляется поправочный множитель  $y$ , значение которого принимается в зависимости от величины  $dP$  по нижеследующим данным:

см·мм рт. ст. . . . .	20, 40, 60, 80, 100, 200, 400
$y$ . . . . .	1,1; 1,4; 1,7; 2,0; 2,3; 3,8; 6,9

При расчетах вакуумных систем с большими объемами разрежаемых сосудов пропускная способность трубопроводов исчисляется в  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Если трубопровод имеет изгибы, то за расчетную длину трубопровода принимают величину, определяемую по формуле

$$L_{\text{расч}} = L + (1 + 1,33) nd, \quad (37)$$

где  $n$  — число изгибов (колен).

На рис. 4 и 5 приведены номограммы для определения пропускной способности трубопроводов в зависимости от их диаметра в свету и длины при давлении 1 мм рт. ст. и при давлении  $10^{-4}$  мм рт. ст.<sup>1</sup>

Кроме труб с постоянным сечением отверстий, в вакуумной системе обычно имеются маслоуловители, вакуумные затворы, задвижки, компенсаторы, клапаны, фильтры, пылеуловители, краны и другие конструктивные элементы с меньшими проходными отверстиями, чем у труб. В этих случаях пропускная способность уменьшенных отверстий оценивается отдельно.

При вязкостном режиме

$$U_{\text{ос}} = 15,7 \cdot d^2, \text{ л/сек}; \quad (38)$$

<sup>1</sup> Перевод  $\text{м}^3/\text{ч}$  в другие единицы производится по табл. 5.

при молекулярном режиме

$$U_{ом} = 9,1d^2, \text{ л/сек}, \quad (39)$$

где  $U_{ов}$  и  $U_{ом}$  — пропускная способность отверстия соответственно при вязкостном и молекулярном режимах.

При промежуточном режиме течения воздуха пропускная способность отверстия находится в пределах между  $15,7d^2$  и  $9,1d^2$ .

При пользовании формулами (38) и (39) нужно учитывать

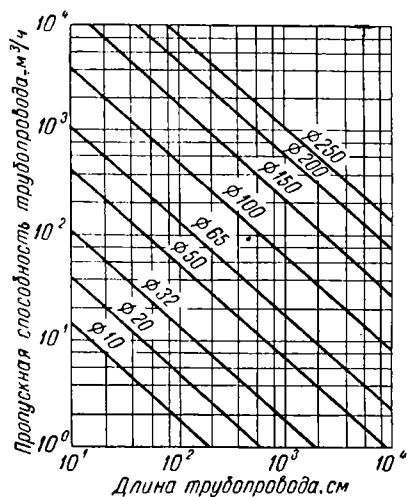


Рис. 4. Номограмма для определения пропускной способности трубопровода для различной его длины при давлении 1 мм рт. ст.

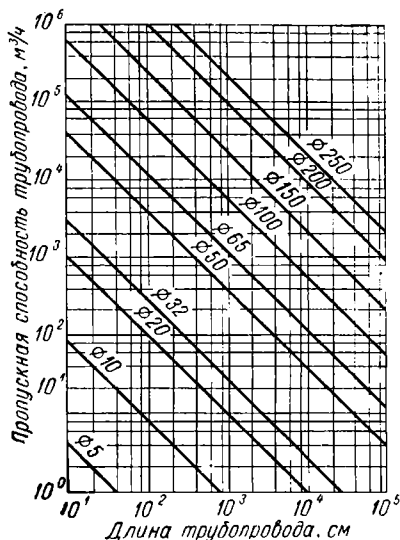


Рис. 5. Номограмма для определения пропускной способности трубопроводов различной номинальной длины при давлении 10<sup>-4</sup> мм рт. ст.

отношение  $\left(\frac{d}{d_1}\right)^2$  — диаметра уменьшенного отверстия к диаметру элемента, предшествующего отверстию.

При  $\left(\frac{d}{d_1}\right)^2 < 1$  в главные части формул (38) и (39) вводится поправочный множитель  $\frac{1}{1 - \left(\frac{d}{d_1}\right)^2}$ .

Если  $\left(\frac{d}{d_1}\right) \ll 1$ , т. е. значительно меньше единицы (например, в 10 раз), то указанная выше поправка не вводится.

На рис. 6 и 7 приведены номограммы для определения пропускной способности пылеуловителей и угловых клапанов в зависимости от давления.

При проектировании вакуумных систем необходимо принимать длины трубопроводов по возможности наиболее короткими, а их диаметры — равными диаметру впускного патрубка в системе насоса.

После определения необходимой быстроты откачки газов  $S$  из разрежаемого сосуда и пропускной способности трубопровода  $U$  по формулам (28) и (29) находят быстроту действия насоса  $S_n$ .

Чтобы правильно выбрать насос для вакуумирования стали, плавки металла, или для сушки литейных форм и стержней, необходимо знать максимальное количество выделяющихся газов

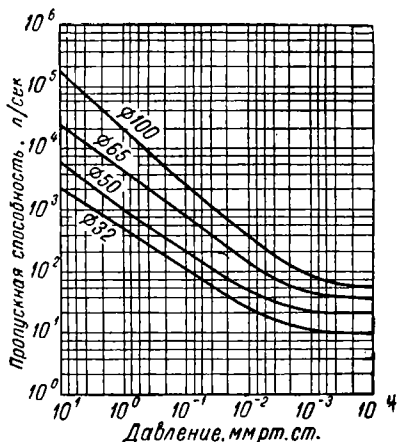


Рис. 6. Номограмма для определения пропускной способности пылеуловителей в зависимости от давления

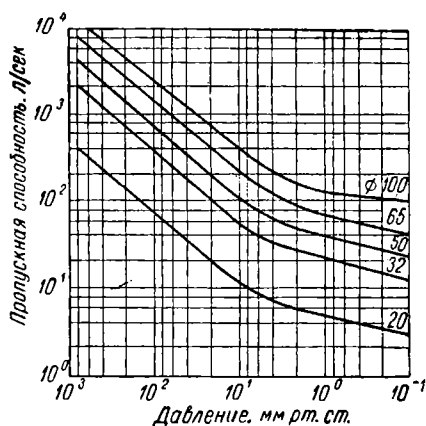


Рис. 7. Номограмма для определения пропускной способности угловых клапанов в зависимости от давления

и паров. Для этого нужно знать общее содержание газа или влаги в обрабатываемом материале. В вакуумных камерах и плавильных печах количество выделяющихся газов и паров в единицу времени определяется сравнительно легко экспериментальным путем. При расчете же сушильных установок условия значительно сложнее. Можно с достаточной точностью определить верхнее граничное значение для количества выделяющихся паров  $q_n$ , но нельзя сказать достаточно точно, насколько это значение может быть превышено. Такое граничное значение  $q_n$  определяется по формуле Лангмюра [17]

$$q_n \leq 55,0 K F P_s \sqrt{\frac{M}{T}}, \text{ мм рт. ст. л/сек}, \quad (40)$$

где  $F$  — поверхность высушиваемого материала,  $см^2$ ;  
 $T$  — температура ( $^{\circ}K$ );  
 $P_s$  — давление насыщенного пара,  $мм рт. ст.$ ;

$M$  — молекулярный вес вещества;

$K$  — поправочный коэффициент (чаще всего лежит между 0,5—0,8; для воды — 0,02—0,03, для льда — около 1).

Время откачки, необходимое для достижения определенного вакуума, в значительной степени зависит от газовой выделенности обрабатываемым металлом, внутренними поверхностями разрезаемого сосуда и его футеровкой.

Газовыделение может определяться периодически экспериментальным путем по так называемому методу повышения давления: вакуумная система по возможности хорошо вакуумируется, после чего измеряется время  $t$ , в течение которого давление в рабочем объеме сосуда возрастает до определенного значения. Затем за единицу времени вычисляется выделившееся количество газа  $q$

$$q = \frac{\Delta P V}{t}, \quad (41)$$

где  $\Delta P$  — измеренное повышение давления;

$V$  — рабочий объем разрезаемого сосуда.

Величина газовой выделенности может быть определена и расчетом. При этом учитываются следующие категории газов:

а) газ, выделяющийся из обрабатываемого жидкого металла или сплава;

б) газ, десорбирующийся со стенок разрезаемого сосуда;

в) газ, выделяющийся из керамической футеровки печи или тигля;

г) натекание газа через неплотности соединений разрезаемого сосуда.

Из обрабатываемого жидкого металла или сплава газы могут выделяться: вследствие уменьшения растворимости газа в металле при изменении температуры; по причине уменьшения внешнего давления; в результате диссоциации гидридов, нитридов, окислов и других подобных включений; вследствие химической реакции, одним из продуктов которой является газообразное соединение, например окись углерода, образующаяся в результате взаимодействия окислов с углеродом или карбидом [7].

Величины газовой выделенности из молибдена, вольфрама, железа и стали при различных температурах в вакууме 0,01—0,03 *мк рт. ст.* приведены в табл. 6—8.

Содержание газов в некоторых металлах и сплавах приведено в табл. 9—11.

При понижении давления в разрезаемом сосуде происходит десорбция газов (паров воды, углеводородов и др.) с его стенок. Количество газов, выделяющихся со стенок разрезаемого сосуда, зависит от состояния поверхности его стенок. Чем лучше качество поверхности стенок разрезаемого сосуда, тем меньше и количество выделяющихся с них газов. В табл. 12—14 приведены значения газовой выделенности с поверхности различных металлов [7].



Газовыделения из молибдена при различных температурах  
в вакууме 0,01—0,03 *мм рт. ст.* [7] (величины газовыделения  
приведены к нормальным условиям)

Температура °С	Количество выделив- шихся газов см <sup>3</sup> /100 г	Состав газа. см <sup>3</sup> /100 г			
		N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
790	0,081	0,003	0,061	0,017	—
1010	0,033	0,005	0,014	0,005	0,009
1210	0,198	0,160	0,030	—	0,008
1440	0,106	0,082	0,010	0,006	0,008
1760	0,023	0,011	0,005	0,002	0,005
<b>Итого</b>	<b>0,441</b>	<b>0,261</b>	<b>0,120</b>	<b>0,030</b>	<b>0,030</b>
1760	0,505	0,295	0,150	0,030	0,030
790	0,103	0,005	0,068	0,021	0,009
1050	0,069	0,045	0,021	0,003	—
1210	0,170	0,161	0,009	—	—
1450	0,178	0,160	0,018	—	—
1650	0,022	0,020	0,002	—	—
1760	0,004	0,004	—	—	—
<b>Итого</b>	<b>0,546</b>	<b>0,395</b>	<b>0,118</b>	<b>0,024</b>	<b>0,009</b>
1760	0,38	0,35	—	0,03	—

Таблица 7

Газовыделения из вольфрама при различных температурах  
в вакууме 0,01—0,03 *мм рт. ст.* [7] (величины газовыделения  
приведены к нормальным условиям)

Температура дегазации °С	Время нагрева образца весом 14,5 г; мин	Количество выделившихся газов, см <sup>3</sup> /100 г
1410	15	0,007
1740	50	0,019
2140	35	0,011
2490	25	0,004
<b>Итого</b>	—	<b>0,041</b>

Температура дегазации °С	Время нагрева образца весом 14,5 г. мин	Количество выделившихся газов, см <sup>3</sup> /100 г
1440	20	0,007
1740	50	0,010
2130	25	0,005
2430	20	0,001
2610	15	0,0
<b>Итого</b>	—	0,023

Таблица 8

Газовыделения из железа и стали при различных температурах в вакууме 0,01—0,03 мм рт. ст. [7] (величины газовыделения приведены к нормальным условиям)

Материал	Температура дегазации, °С	Количество выделившихся газов см <sup>3</sup> /100 г
Малоуглеродистая сталь	1060	52
	1100	11
	1200	7
<b>Итого</b>	—	70
Литая марганцово-молибденовая сталь	950	7,0
	1000	3,8
	1200	6,6
<b>Итого</b>	—	17,4
Литая хромо-молибденовая сталь	1115	10,6
	1175	1,8
	1220	2,2
	1430	0,9
<b>Итого</b>	—	15,5
Шведское железо	880	23
	1030	2,1
	1210	3,7
<b>Итого</b>	—	28,8

Количество газов, содержащееся в углеродистых и малолегированных сталях [7]

Марка стали	Содержание газов						Общее см <sup>3</sup> /100 г
	Кислород		Азот		Водород		
	%	см <sup>3</sup> /100 г	%	см <sup>3</sup> /100 г	%	см <sup>3</sup> /100 г	
08	0,012	8,4	0,0041	3,28	—	2	13,7
20	0,003	2,1	0,0043	3,44	—	2	7,5
Электролитическое железо (С=0,02%)	0,010	7,0	0,0037	2,96	0,001	11,2	21,16
25	—	—	—	—	—	4—5	—
Углеродистая сталь У-7	—	—	—	—	—	3—4	—
Шарикоподшипниковая сталь исходная	0,0054	3,8	—	—	—	—	—
Шарикоподшипниковая сталь после переплава в дуговой вакуумной печи	0,002	1,4	—	—	—	—	—
30ХГСА	0,004	2,8	0,004	3,2	—	1,2	7,2
Трансформаторная сталь обычная	0,017	12	—	—	0,0003	3,4	—
Трансформаторная сталь после плавки в вакууме	0,0022	1,54	—	—	0,00005	0,56	—

Таблица 10

Количество газов, содержащееся в нержавеющих и жаропрочных сплавах [7]

Марка стали	Содержание газов						Общее см <sup>3</sup> /100 г
	Кислород		Азот		Водород		
	%	см <sup>3</sup> /100 г	%	см <sup>3</sup> /100 г	%	см <sup>3</sup> /100 г	
ЭЯ-1Т	0,003	2,1	0,0059	4,72	—	6	12,82
ЭЯ-1Т	—	—	—	—	—	10,4	—
ЭХН-80	—	—	—	—	—	13,0	—
Жаропрочный сплав до переплава	0,0045	3,15	0,014	11,2	—	—	—
То же, после вакуумной переплавки	0,0013	0,91	0,011	8,8	—	—	—

Количество газов, содержащихся в цветных металлах [7]

Металл	Содержание газов								общее см <sup>3</sup> /100 г
	Кислород		Азот		Водород		%	см <sup>3</sup> /100 г	
	%	см <sup>3</sup> /100 г	%	см <sup>3</sup> /100 г	%	см <sup>3</sup> /100 г			
Никель: обычный электролитический карбонильный	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	100	—
Медь: бескислородная то же, после плавки в вакууме	—	—	—	—	—	—	—	164	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	113
Алюминий	0,00045	0,315	—	—	—	—	0,00012	1,34	7,97
	0,00004	0,028	—	—	—	—	0,00001	0,112	—
Титан	—	—	—	—	—	—	—	—	4—17
	0,01—0,4	7—280	—	—	—	—	0,02—0,71	224—8230	—
Молибден: исходный вакуумированный 0,3—0,4 мм рт. ст. при плавке	0,006—0,009	4,2—6,3	0,001—0,003	0,8—2,4	—	—	До 0,001	11,2	0,1—1
	0,004—0,005	2,8—3,5	—	—	—	—	—	—	16,2—19,9
вакуумированный 5·10 <sup>-3</sup> мм рт. ст. вакуумированный 1·10 <sup>-4</sup> мм рт. ст. при плавке	0,002—	1,4—2,45	0,0001	0,08	—	—	—	—	1,48—2,53
	0,0035	0,7	—	—	—	—	—	—	0,7

Газоотделение при комнатной температуре  
с поверхности различных металлов [7]

Металл	Скорость газовыделения после откочки в течение 2 ч, $см^3/см^2 \cdot ч$
Медь	$5,67 \cdot 10^{-5}$
Никель	$2,36—2,84 \cdot 10^{-5}$
Железо	$0,944 \cdot 10^{-5}$
Алюминий	$1,42—3,3 \cdot 10^{-5}$
Молибден	$1,65—3,08 \cdot 10^{-5}$
Тантал	$2,13 \cdot 10^{-5}$
Вольфрам	$0,472 \cdot 10^{-5}$

Таблица 13

Газоотделение при комнатной температуре  
с поверхности малоуглеродистой и нержавеющей сталей [7]

Сталь	Скорость газоотделения $см^3/см^2 \cdot ч$ после откочки в течение					
	1 ч	2 ч	4 ч	6 ч	8 ч	10 ч
Малоуглеродистая	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Нержавеющая	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$

Для сравнения в табл. 15 приведены аналогичные данные для синтетических веществ.

Газовыделение из керамической футеровки печи или тигля зависит от их материала, технологии изготовления, времени работы в вакууме, объема футеровки печи или тигля, предварительно достигнутых температур, состава обрабатываемого металла или сплава и т. п. Для установления количества газа, выделяющегося из керамической футеровки печи или тигля, необходимо знать величину их удельной проводимости.

Под величиной удельной проводимости подразумевается количество газа в кубических сантиметрах, приведенных к нормальным условиям, которое проходит через  $1 см^2$  поверхности при толщине слоя  $1 см$  и разности давления  $1 мк рт. ст.$  за время  $1 сек.$

**Газоотделение при комнатной температуре  
с поверхности некоторых цветных металлов и сплавов [7]**

Наименование материала и предварительная обработка	Скорость газовой выделенности после откачки в течение 1 ч $\text{см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{ч}$	Скорость газовой выделенности после откачки в течение 5 ч $\text{см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{ч}$
Медь протравленная, промытая бензолом и ацетоном	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$
Медь, промытая бензолом и ацетоном	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Медь необработанная	$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Сварной шов на медной трубе	$1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Латунь протравленная, промытая бензолом и ацетоном	$7 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$
Латунь, промытая бензолом и ацетоном	$8 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Сварной шов на латунной трубе	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Дюралюминий протравленный, промытый бензолом и ацетоном	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Дюралюминий, промытый бензолом и ацетоном	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Дюралюминий необработанный	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Нержавеющая сталь необработанная	$6 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$

Таблица 15

**Газоотделение при комнатной температуре  
с поверхности синтетических веществ [7]**

Вещество	Скорость газовой выделенности после откачки в течение 3 ч, $\text{см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{ч} \cdot 10^{-3}$
Полиамид	13,2
Ультрамид	4,72
Полиуретан	1,42
Полиэтилен	,615
Полистирол	1,65
Тефлон	1,42
Плексиглас М-222	5,7
Целлулоид	23,6
Пербунан	5,7
Пербунан после нагрева	0,94

Численное значение удельной проводимости зависит от материала футеровки, ее физического строения (размер зерен, пористость, метод изготовления), природы диффундирующего газа и т. п.

Значения удельной проводимости некоторых огнеупоров приведены в табл. 16

Таблица 16

**Зависимость удельной проводимости некоторых огнеупоров от температуры [7]**

Материал	Температура °С	Удельная проводимость $\frac{\text{см}^2 \cdot \text{см}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot 1 \text{ мк рт. ст.}} \cdot 10^{-6}$
Двуокись циркония	20	1,61
	200	1,74
	400	1,18
	600	1,25
	800	1,76
	1000	1,92
Окись алюминия	20	4,46
	200	4,32
	400	3,05
	600	3,16
	800	4,15
	1000	5,82
Шамот-легковес	20	1,0
	200	0,83
	400	0,765
	600	0,895
	800	1,03
	1000	0,915

На рис. 8 приведены значения газовой выделенности из шамота-легковеса и шамота-полновеса в зависимости от температуры при первоначальном нагреве [7].

Кривые на рис. 8 показывают:

с повышением температуры шамота количество выделяющихся из него газов увеличивается;

количество газов, отнесенных к единице объема, для шамота-легковеса меньше, чем для шамота-полновеса.

На рис. 9 приведена графическая зависимость количества газов, выделяющихся из шамота-легковеса при температуре 500° С от времени нахождения его на воздухе после первичного обезгаживания [7].

Количество газа, приведенного к нормальным условиям, вы-

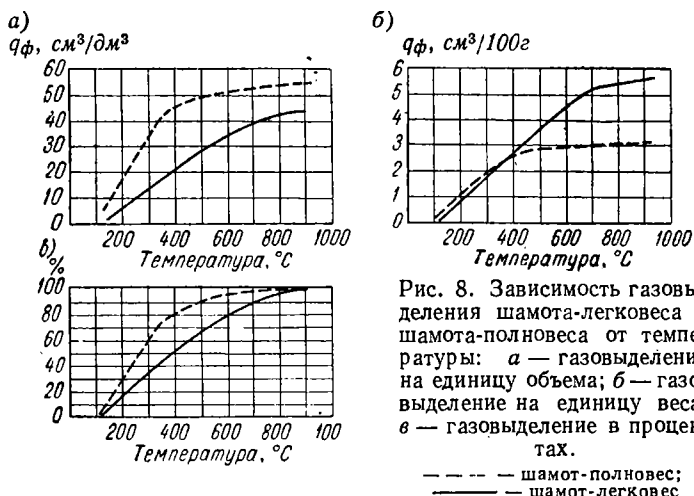


Рис. 8. Зависимость газовой выделенности шамота-легковеса и шамота-полновеса от температуры: а — газовой выделенности на единицу объема; б — газовой выделенности на единицу веса; в — газовой выделенности в процентах.

--- — шамот-полновес;  
 — — шамот-легковес

деляющегося из единицы объема футеровки, может быть подсчитано по формуле [7]

$$q_{\phi} = \frac{\Pi \Delta P \Delta t}{\delta^2}, \quad (42)$$

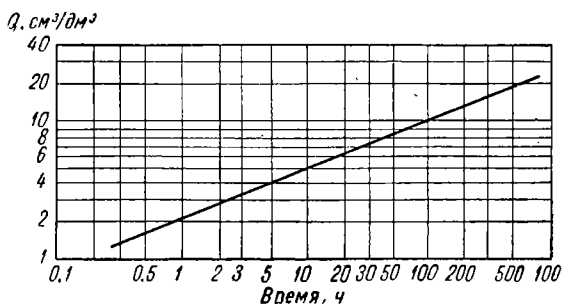


Рис. 9. Зависимость газовой выделенности из шамота-легковеса при температуре 500° С от времени выдержки его на воздухе после первичного обезгаживания

где  $\Pi$  — удельная проводимость;  
 $\Delta P$  — разность давлений между внутренними частями футеровки, где выделяется газ, и наружной поверхностью стенки, с которой газы откачиваются насосами;



$\Delta t$  — интервал времени;

$\delta$  — толщина стенки.

Натекание газа через неплотности соединений разрезаемого сосуда  $q_n$  определяется изменением давления  $\Delta P$  в объеме сосуда  $V$ , отнесенном к единице времени  $\Delta t$

$$q_n = \frac{V \cdot \Delta P}{\Delta t}, \text{ мкл/сек.} \quad (43)$$

Допустимой величиной натекания можно в большинстве случаев считать такую, которая при работе насоса (при данном трубопроводе) не мешает поддерживать в рабочем объеме разрезаемого сосуда необходимое давление.

Опыт показывает, что для вакуумных печей с объемом кожуха до  $12 \text{ м}^3$ , работающих при давлениях  $10^{-3}$ — $14^4 \text{ мм рт. ст.}$ , величина натекания пустого корпуса не должна превышать  $10 \text{ мкл/сек}$  [7].

При плавке молибдена в дуговых вакуумных электропечах с расходуемым электродом хорошее качество металла получается только в том случае, когда величина натекания не превышает  $1$ — $2 \text{ мкл/сек}$  [7]. Места натекания газа в разрезаемых сосудах определяют с помощью гелиевых и галоидных течеискателей. Галоидные течеискатели ГТИ-2 и ГТИ-3 более просты по конструкции и удобны в эксплуатации, чем гелиевые течеискатели ПТИ-4А. Их недостаток заключается в необходимости создавать в испытываемом объеме избыточное давление галогеносодержащих газов. Этому недостатку лишена новая конструкция вакуумно-атмосферного гелиевого течеискателя ВАГТИ-4.

Величина газовой выделений равна сумме всех газовой выделений, натеканий газа и может быть определена по формуле [7]

$$q = \frac{10q_m G}{t} K + \frac{q_\phi V_\phi}{t} + q_g F + q_n, \quad (44)$$

где  $q_m$  — количество газа, выделяющегося из обрабатываемого металла или сплава,  $\text{см}^3/100 \text{ г}$ ;

$G$  — вес обрабатываемого металла или сплава,  $\text{кг}$ ;

$q_\phi$  — количество газа, выделяющегося из единицы объема футеровки,  $\text{см}^3/\text{дм}^3$ ;

$V_\phi$  — объем футеровки,  $\text{дм}^3$ ;

$q_g$  — газовой выделение с единицы поверхности стенок металлоконструкции разрезаемого сосуда,  $\text{см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{ч}$ ;

$F$  — площадь стенок и внутренних металлоконструкций разрезаемого сосуда,  $\text{см}^2$ ;

$q_n$  — натекание газа,  $\text{мкл/сек}$ ;

$t$  — время цикла,  $\text{сек}$ ;

$K$  — коэффициент неравномерности газовой выделений (при равномерном выделении газов  $K = 1$ ).

Необходимая быстрота откачки газов из разрежаемого сосуда может быть подсчитана по уравнению

$$S = \frac{10q_m G}{tP} n + \frac{q_\phi V \phi}{tP} + \frac{q_z F}{P} + \frac{q_n}{P}, \quad (45)$$

где  $P$  — давление, при котором протекает процесс.

При расчете вакуумной системы для низкого и среднего вакуума необходимо проверить частное от деления величины газовой выделенности на быстроту откачки. Это частное должно быть меньше требуемого конечного давления, по крайней мере, на десять порядков. Если быстрота откачки, рассчитанная согласно уравнению (45) по объему разрежаемого сосуда, слишком мала, чтобы удовлетворять этим условиям, то выбирается другой насос, обеспечивающий более высокую быстроту откачки.

Существенное значение при расчете вакуумных систем имеет определение времени откачки системы до заданного давления. Для молекулярного течения газа, когда  $U$ , а следовательно,  $S_n$  не зависят от давления; можно воспользоваться выражением

$$t = \frac{V}{S_n} \ln \frac{P_1}{P_2} + \frac{V}{U} \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (46)$$

В этом случае также может быть использовано уравнение

$$t = 2,3 \frac{V}{U} \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (47)$$

Уравнения (46) и (47) справедливы для случаев применения высоковакуумных паромасляных насосов, у которых в широком диапазоне давлений быстрота откачки не зависит от давления.

В тех случаях, когда быстрота откачки  $S_n$  зависит от давления, график зависимости  $S_n = f(P)$  разбивается на  $n$  отдельных небольших участков, в каждом из которых  $S_n$  принимается приближенно в среднем постоянной (рис. 10).

В этом случае уравнения (46) и (47) применяются для каждого из участков, т. е.

$$t = V \left( \frac{1}{S_{n_1}} \ln \frac{P_1}{P_2} + \frac{1}{S_{n_2}} \ln \frac{P_2}{P_3} + \dots + \frac{1}{S_{n_n}} \ln \frac{P_n}{P_{n+1}} \right) + V \left( \frac{1}{U_1} \ln \frac{P_1}{P_2} + \dots + \frac{1}{U_n} \ln \frac{P_n}{P_{n+1}} \right). \quad (48)$$

При разбивке рабочего диапазона давлений на  $n$  частей быстрота откачки и проводимость для каждой части рассчитываются по среднему давлению в ней [11].

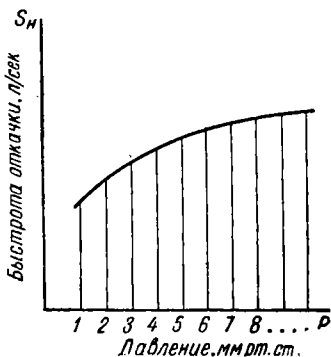


Рис. 10. График зависимости быстроты откачки насоса от давления

Расчет времени откачки для молекулярно-вязкостного и вязкостного режимов течения газов может быть осуществлен также по уравнению

$$t = V \left[ \left( \frac{1}{S_{n_1}} + \frac{1}{U_1} \right) \ln \frac{P_1}{P_2} + \left( \frac{1}{S_{n_2}} + \frac{1}{U_2} \right) \ln \frac{P_2}{P_3} + \dots \right. \\ \left. \dots + \left( \frac{1}{S_{n_n}} + \frac{1}{U_n} \right) \ln \frac{P_n}{P_{n+1}} \right], \quad (49)$$

где  $S_n$  — быстрота откачки насоса, л/сек;  
 $U$  — проводимость трубопровода, л/сек;  
 $V$  — объем системы, л;  
 $P_1$  — начальное давление, мм рт. ст.;  
 $P_2$  — конечное давление, мм рт. ст.

На рис. 11 приведена номограмма, позволяющая быстро на-

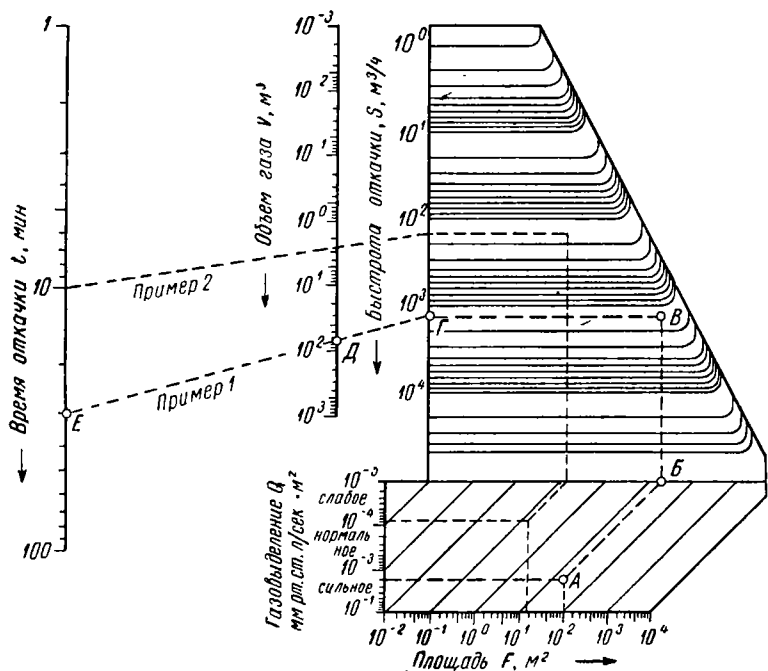


Рис. 11. Номограмма для расчета быстроты и времени откачки газа

ходить величины откачки  $S_n$  и время откачки  $t$  в зависимости от газовыделения внутренними стенками разрежаемого сосуда  $q$  и его рабочего объема  $V$  [17].

Примеры пользования номограммой приведены ниже.

Пр и м е р 1. Имеется сосуд объемом  $70 \text{ м}^3$  с площадью внутренней поверхности  $100 \text{ м}^2$ . Ожидается сильное газовыделение

порядка  $2 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. л/сек·м<sup>2</sup>. Быстрота откачки насоса  $S_n = 1300$  м<sup>3</sup>/ч. Линии с отметками 100 м<sup>2</sup> и  $2 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. л/сек·м<sup>2</sup> образуют точку пересечения, которую проектируем наискось вверх до точки *Б* и далее перпендикулярно до кривой, которая соответствует скорости откачки 1300 м<sup>3</sup>/ч. Быстрота откачки достаточна, так как проекция точки попадает на кривую в пределах очерченного кривой поля.

Далее, соединив точку на шкале быстроты откачки (1300 м<sup>3</sup>/ч) с точкой на шкале объема (70 м<sup>3</sup>) и продолжив ее, получим необходимое время откачки — 30 мин.

**Пример 2.** Определить быстроту откачки насоса, если необходимо вакуумировать сосуд объемом 2,6 м<sup>3</sup>, имеющий площадь внутренней поверхности 16 м<sup>2</sup> при газовыделении  $8 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. л/сек·м<sup>2</sup> за 10 мин до давления  $10^{-3}$  мм рт. ст.

Пользуясь номограммой, определяем, что насос с быстротой откачки  $S_n = 150$  м<sup>3</sup>/ч вполне пригоден для данной цели.

## IV

### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

В зависимости от конкретных условий вакуум в разрежаемом сосуде достигается с помощью вакуумного насоса того или иного типа.

Вакуумным насосом называется прибор, предназначенный для удаления газов из сосуда с целью получения разреженности газа, и приводимый в действие от постороннего источника энергии (обычно от электродвигателя).

В задачу вакуумного насоса входит не только получение заданной разреженности газа, но и поддержание ее в определенных пределах в рабочем объеме разрежаемого сосуда (в вакуумной камере для вакуумирования металлов и их сплавов, в вакуумной литейной машине, в пресс-форме машины литья под давлением, в индукционной или дуговой электропечи для плавки металла). Выбор вакуумных насосов соответствующих типов и характеристик, обеспечивающих достижение заданной степени разрежения и необходимой быстроты откачки, обусловлен характером металлургических и литейных процессов, объемом вакуумного агрегата, количеством подлежащих удалению газов, их составом и степенью чистоты.

В отечественной технической литературе достаточно полно освещены вопросы, связанные с выбором вакуумных насосов на заданную производительность при заданном рабочем давлении и нахождением времени откачки вакуумной установки до необходимого давления [11].

Описаны также подробно в специальной литературе конструкции и работа вакуумных насосов [2, 5, 6, 12]. Поэтому, не разбирая указанные выше пути выбора вакуумных насосов и не отвлекая внимания читателя на подробное описание конструкций и работы последних, отметим лишь некоторые основные особенности, характерные для каждого из перечисленных ниже типов вакуумных насосов. При этом главное внимание уделим практическому использованию вакуумных насосов с учетом их характеристик. В зависимости от конструкции, принципа действия, величин быстроты откачки и предельного давления, вакуумные

насосы подразделяются на несколько типов (серий). Области рабочих давлений вакуумных насосов разных типов приведены на рис. 12.

В литейном и металлургическом производствах находят применение механические и пароструйные вакуумные насосы.

Механическими вакуумными насосами называются такие насосы, в которых выталкивание газа осуществляется при вращательном движении их рабочих частей (роторов). Из механических вакуумных насосов широкое распространение в литейном и ме-

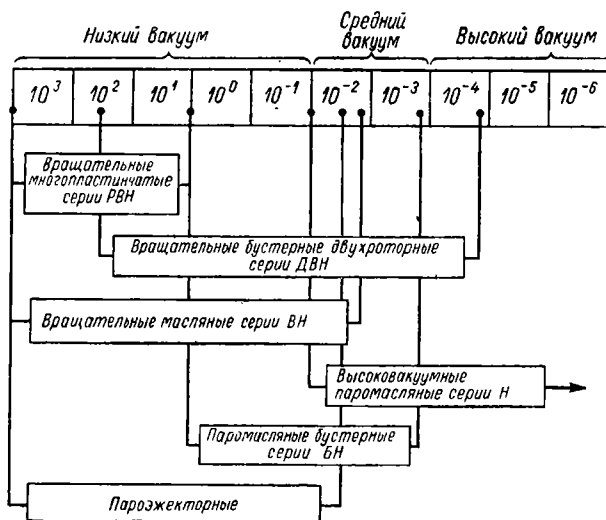


Рис. 12. Области рабочих давлений вакуумных насосов разных типов (величины давлений в мм рт. ст.)

таллургическом производствах получили вращательные многопластинчатые насосы, создающие разрежение до 15—25 мм рт. ст. Насосы этой группы составляют серию РВН. Они предназначены для откачки воздуха и инертных газов, предварительно очищенных в водоотделителях и фильтрах от капельной влаги и других механических примесей.

Принцип действия этих насосов основан на вращении в цилиндрическом корпусе эксцентрично расположенного ротора, в пазах которого свободно перемещаются стальные или текстолитовые пластины (рис. 13). При вращении ротора пластины, под действием центробежной силы, выбрасываются из пазов к внутренней поверхности цилиндрического корпуса, разделяя серповидное пространство на отдельные рабочие ячейки, объем которых изменяется в зависимости от угла поворота ротора. Через расположенный слева впускной патрубок корпус насоса заполняется откачиваемым газом. В крайнем верхнем положении каждая ячейка

отключается от впускного патрубка. При дальнейшем вращении объем ячейки уменьшается, газ в ней сжимается и выталкивается через правый выпускной патрубок [3].

Характеристики многопластинчатых вакуумных насосов приведены в табл. 17. Эти насосы могут применяться для самостоятельной откачки газа из больших объемов в том случае, когда не требуется получать высокий вакуум, а также для создания предварительного разрежения, необходимого для работы вращательных масляных и паромасляных насосов. В этом случае многопластинчатыми насосами создается предварительное разрежение до

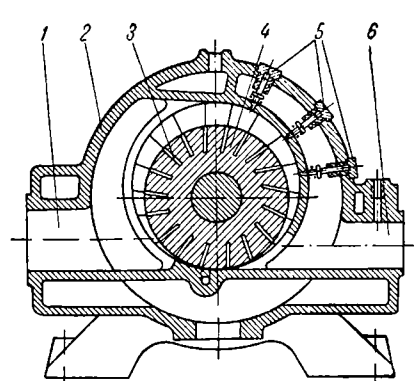


Рис. 13. Схема устройства вращательного многопластинчатого насоса:

1 — впускной патрубок; 2 — корпус; 3 — пластины; 4 — ротор; 5 — разгрузочные клапаны; 6 — выпускной патрубок

15—20 мм рт. ст., после чего подключаются вращательные масляные или паромасляные насосы, с помощью которых давление в системе доводится до заданного расчетом.

При двухступенчатом последовательном соединении двух многопластинчатых насосов, например РВН-60 и РВН-30 (РВН-60-30), остаточное давление может достигать менее 1 мм рт. ст. [6].

Следует отметить, что при выборе характеристики насоса для проектируемой вакуумной системы, кроме быстроты откачки, нужно знать еще и величину давления, которому соот-

ветствует эта величина быстроты откачки.

В табл. 17 быстрота откачки приводится как одно значение при таком давлении в выпускном патрубке насоса, при котором эта быстрота откачки является максимальной. Однако для полной характеристики насоса такого значения быстроты откачки недостаточно.

Наиболее полное представление об изменении быстроты откачки насоса  $S_n$  в зависимости от давления во впускном патрубке  $P_2$  может быть получено только из рассмотрения соответствующей этому насосу кривой  $S_n = f(P_2)$ .

Такие кривые для вакуумных насосов серии РВН приведены на рис. 14.

На рис. 14 приведены также кривые для спаренных насосов РВН-60 с РВН-30 (РВН-60-30) и др. [6].

Для получения остаточного давления менее 1 мм рт. ст. используются механические бустерные двухроторные вакуумные насосы серии ДВН, предназначенные для откачки воздуха, взрывобезопасных и других газов, не воздействующих на материалы кон-

**Характеристики вакуумных вращательных (ротационных)  
многопластинчатых насосов типа РВН**

Параметры	Типы насосов			
	РВН-8.5	РВН-30	РВН-60	РВН-75
Номинальная быстрота откачки, <i>м<sup>3</sup>/мин</i>	6	25	50	60
Рабочий вакуум, % от барометрического давления	60—90	60—90	60—90	60—90
Предельный вакуум, % от барометрического давления	98	98	98	98
Мощность электродвигателя, <i>квт</i>	14	55	75	100
Число оборотов в минуту	980	585	485	485
Расход охлаждающей воды, <i>л/ч</i>	850	850	1300	1800
Расход масла, <i>Г/ч</i>	150	250	300	350
Габаритные размеры, <i>мм</i> :				
длина	1610	2400	2955	3200
ширина	650	1030	1130	1295
высота	735	1050	1440	1500
Вес установки, <i>кг</i>	940	2520	4580	5710

Примечания: 1. Насос РВН-8,5 имеет пластины из пластмассы.  
2. Перевод *м<sup>3</sup>/мин* в другие единицы производится по табл. 5.

струкции насоса (конструкционная сталь, медь) и находящееся в нем масло.

Устройство такого насоса показано на рис. 15. В насосе имеются два фигурных ротора, выполненных по типу воздуходувок Рутса, синхронно вращающихся в корпусе навстречу один другому. Во время работы насоса роторы не соприкасаются благодаря специальной профилировке и регулировке зазоров при сборке, что дает возможность получить высокое число оборотов (до 3000 *об/мин*). Действие двухроторного насоса основано на чисто механическом перекачивании определенного газа. При этом рабочими являются оба ротора, образующие со стенками корпуса насоса две параллельно работающие камеры [3]. Насосы этой серии обеспечивают разрежение до  $3 \cdot 10^{-4}$  *мм рт. ст.* и обладают быстротой действия до 4500 *л/сек.* Благодаря оригинальной форме роторов и большим числам оборотов бустерные двухроторные насосы имеют сравнительно небольшие размеры. Однако такие насосы нуждаются в предварительном разрежении, которое обычно осуществляется масляными вращательными насосами.



Характеристики механических бустерных двухроторных вакуумных насосов серии ДВН приведены в табл. 18.

Зависимость быстроты откачки от давления для насосов РВН-60, ДВН-500, ВН-4Г и ВН-6Г серий ДВН-1500 [6] показана на рис. 16.

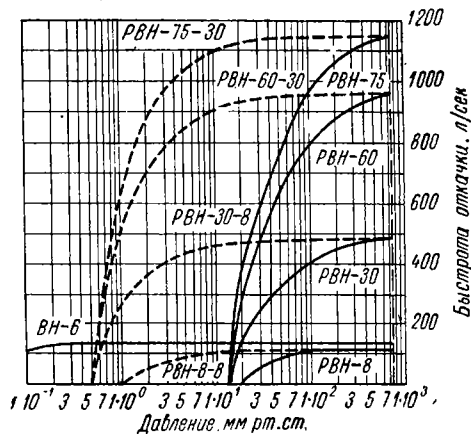


Рис. 14. Кривые изменения быстроты откачки многопластинчатых вакуумных насосов серии РВН в зависимости от давления

рис. 17 показано устройство золотникового (плунжерного) насоса, имеющего по сравнению с другими вращательными насосами значительно большую быстроту действия [3].

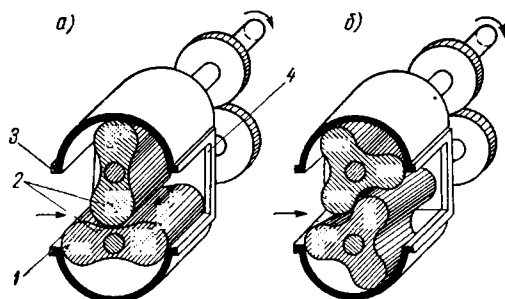


Рис. 15. Схема устройства двухроторного вакуумного насоса: а — с двухлопастными роторами; б — с трехлопастными роторами;

1 — корпус; 2 — роторы; 3 — впускной патрубок; 4 — выпускной патрубок

Как видно из рис. 17, в насосе имеется эксцентрично сидящий на валу ротор, на который надета цилиндрическая обойма (плунжер), от которой отходит открытая сверху направляющая в виде полого параллелепипеда с отверстием в нижней части. При враще-

нии ротора обойма катится с очень малым зазором по внутренней стенке корпуса, а направляющая совершает колебательное движение, скользя вверх и вниз в золотнике. Откачиваемый газ засасывается в корпус насоса через верхнее отверстие направляющей, проходит сквозь боковое отверстие в ее нижней части и после сжатия в корпусе насоса выбрасывается через выпускной патрубок с клапаном.

Для создания надежного уплотнения к местам соприкосновения подвижных и неподвижных деталей насоса непрерывно подводится масло, для чего обычно применяются устройства, обеспечивающие

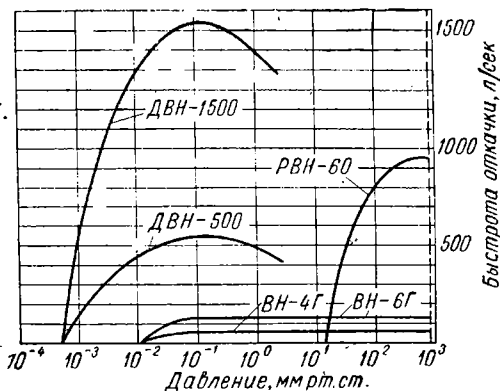


Рис. 16. Кривые изменения быстроты откачки двухроторных вакуумных насосов различных серий в зависимости от давления

Масло заполняет вредные пространства в корпусе насоса и

его принудительную циркуляцию.

исключает их влияние, ведущее к увеличению остаточного давления. Благодаря этому насосами с масляным уплотнением достигается более глубокий вакуум [3].

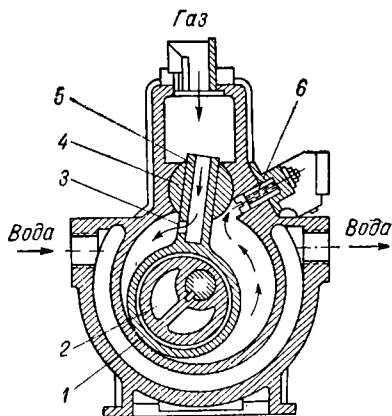


Рис. 17. Схема устройства вращательного золотникового (плунжерного) вакуумного масляного насоса:

1 — цилиндрическая обойма; 2 — ротор; 3 — отверстие; 4 — золотник; 5 — полый параллелепипед; 6 — выпускной патрубок. (Стрелками показан путь откачиваемого газа в насосе.)

газе насосы этого типа снабжены специальным газобалластным устройством. Такие насосы имеют в своем наименовании индекс «Г», например ВН-4Г, ВН-6Г и т. д.

С целью уменьшения концентрации паров воды в откачиваемом

**Характеристики вакуумных механических вращательных насосов  
серии ДВН**

Параметры		Типы насосов			
		ДВН-500	2ДВН-500	РВН-50	ДВН-1500М
Быстрота откачки воздуха в диапазоне давлений от $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., л/сек		500	500	830	1500
Предельный вакуум, мм рт. ст.		$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	15	$5 \cdot 10^{-3}$
Парциальное давление, мм рт. ст.		$5 \cdot 10^{-4}$	—	—	$5 \cdot 10^{-4}$
Рекомендуемое масло (по ГОСТу 7903—56)		ВМ-4	ВМ-4	Компрессорное М или Т	ВМ-4
Количество масла, заливаемого в насос, л		3,5	3,5	—	5,5
Расход охлаждающей воды, л/ч		500	—	—	500
Рекомендуемый насос предварительного разрежения		ВН-4Г	ВН-4Г	—	ВН-6Г
Электродвигатель	тип	А-51-2	А-51-2	А-103-12	А-52-2
	мощность, кат	7	7	75	10
	напряжение, в	220/380	220/380	220/380	220/380
Вес, кг		521,6	565	4646	880
Примечание. Перевод л/сек в другие единицы производится по табл. 5					

Масляные вращательные насосы применяются не только в качестве самостоятельных откачных устройств, но и в качестве насосов предварительного разрежения у вакуумных насосов, не способных работать непосредственно против атмосферного давления.

Характеристики вакуумных масляных вращательных насосов серии ВН-Г приведены в табл. 19.

## Характеристики вакуумных вращательных насосов серии ВН-Г

Параметры	Типы насосов									
	РВН-20	ВН-461М	ВН-2МГ	ВН-1МГ	ВН-4Г	ВН-6Г	ВН-300	ВН-500		
Обозначение новой конструкции насоса	—	—	ВН-10-2	ВН-20-1	ВН-75	ВН-150	—	—		
Предельный вакуум, мм рт. ст.	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$		
Быстроота откачки воздуха при 760 мм рт. ст., л/мин	200	50	430	18,3	59	155	300	500		
Марка масла (по ГОСТу 7903—56)	ВМ-4	ВМ-4	ВМ-4	ВМ-4	ВМ-4	ВМ-4	ВМ-4	ВМ-4		
Количество масла, заливаемого в насос, л	0,5	2,3	1,9—2	4	16	55	80	85		
Тип насоса	Ротационный	—	—	—	—	—	—	—		
Парциальное давление (по воздуху), мм рт. ст.	—	—	$3 \cdot 10^{-3}$	4	5	5	1,0	8,0		
Электродвигатель	тип	АЛ31/4	А41-4	А-42-4	А-61-6	А72-6	А82-6	А-91-6		
	напряжение, в	220/380	220/380	220/380	220/380	220/380	220/380	220/380		
мощность, кВт	0,6	0,6	1,7	2,8	7	18	40	55		
Вес, кг	75	65	187	282	590	1521	2604	4226		

Примечание. Перевод л/мин в другие единицы производится по табл. 5

Зависимость быстроты откачки от давления для насосов этой серии показана на рис. 18.

Для создания и поддержания в вакуумных системах еще более низких давлений ( $10^{-4}$ — $10^{-6}$  мм рт. ст.) применяют пароструйные вакуумные насосы.

Пароструйными вакуумными насосами называют такие насосы, действие которых основано на увеличении удаляемого газа струей пара. В насосах этого типа используются либо диффузия откачиваемого газа в паровую струю, либо явление вязкостного захвата

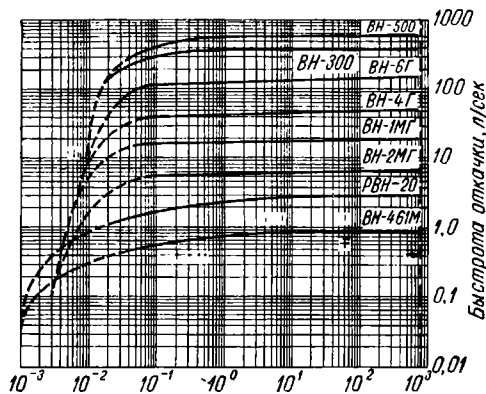


Рис. 18. Кривые изменения быстроты откачки вакуумных масляных вращательных насосов серии ВН в зависимости от давления

газа струей пара. В зависимости от области рабочих давлений, принципа действия и рабочей жидкости, пароструйные насосы делятся на диффузионные паромасляные и парозжекторные. В свою очередь, диффузионные паромасляные насосы делятся на высоковакуумные и бустерные. Для работы этих насосов необходимо предварительное разрежение, которое обычно обеспечивается механическими вакуумными насосами серий ВН или ДВН. Парозжекторные насосы могут работать, имея на выходе атмосферное давление. Несмотря на различие между указанными тремя типами пароструйных насосов, принципиальная схема их работы одинакова (рис. 19).

В нижней части насоса расположен кипятильник, в который заливается рабочая жидкость (специальное вакуумное масло). С помощью электронагревателя она превращается в пар, по паропроводу устремляющемуся к зонтичному соплу, и истекает из него в виде расходящейся с высокой скоростью струи, направленной под углом  $60$ — $80^\circ$  к стенке насоса [3].

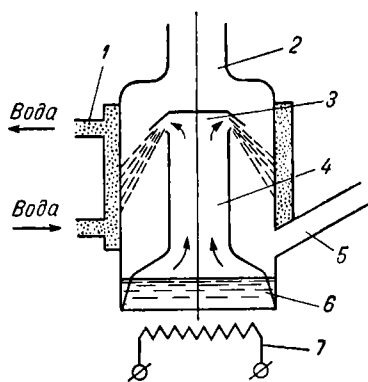


Рис. 19. Схема устройства пароструйного одноступенчатого вакуумного насоса:

- 1 — рубашка водяного охлаждения;
- 2 — впускной патрубок;
- 3 — зонтичное сопло;
- 4 — паропровод;
- 5 — выпускной патрубок;
- 6 — кипятильник;
- 7 — электронагреватель

Поступающий из вакуумной системы через впускной патрубок газ увлекается струей пара и уносится ею к холодной стенке насоса. После перемещения откачиваемого газа пар рабочей жидкости конденсируется на охлажденной стенке корпуса насоса и в жидком виде стекает в кипятильник, где снова испаряется, чем обеспечивается непрерывная циркуляция рабочей жидкости в насосе. Газ, попадая со струей пара на стенку корпуса насоса, перетекает вдоль нее к выпускному патрубку и выбрасывается насосом предварительного разрежения в атмосферу. Для лучшей конденсации пара рабочей жидкости наружные стенки корпуса насоса охватываются водяным холодильником, а стенки паропроводов — теплоизоляцией (для уменьшения конденсации пара на его стенках).

Современные пароструйные насосы зачастую выполняются многоступенчатыми (2—3, а иногда и больше ступеней). Ступени работают последовательно в одном корпусе, питаются паром от общего кипятильника.

Пароэжекторные насосы, в отличие от насосов описанной выше схемы, питаются паром не из собственного кипятильника, а от паровой магистрали, идущей от котельной или ТЭЦ завода. В остальной схеме работы эжектора не отличается от схемы, приведенной на рис. 19.

Диффузионные высоковакуумные паромасляные насосы, составляющие серию Н, позволяют достигать высокой скорости откачки и обеспечивают разрежение до  $10^{-7}$  мм рт. ст. Они предназначены для откачки воздуха и других газов, не воздействующих на материалы конструкции (сталь конструкционная, медь) и на масло в насосах. Насосы данной серии укомплектованы типовыми маслоотражателями, препятствующими проникновению паров масла из насоса в откачиваемый объем.

Характеристики высоковакуумных паромасляных насосов серии Н приведены в табл. 20. Зависимость скорости откачки от давления для четырех насосов этой серии показана на рис. 20 [12].

Паромасляные бустерные насосы, составляющие серию БН, обеспечивают откачку больших количеств газа при давлении  $10^{-2}$ — $10^{-4}$  мм рт. ст. Они также предназначены для откачки воздуха и других газов, не воздействующих на материалы конструкции (сталь конструкционная, медь) и на масло в насосе.

Паромасляные бустерные насосы могут применяться для откачки газов из крупногабаритных вакуумных установок, где необходимо непрерывно поддерживать давление  $1 \cdot 10^{-2}$ — $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. в условиях интенсивного и длительного газовыделения. Они также могут использоваться в качестве предварительной ступени к высоковакуумным паромасляным насосам, в печах вакуумной плавки металлов и их сплавов. В этом случае паромасляными бустерными насосами создается предварительное разрежение до  $10^{-2}$ — $10^{-4}$  мм рт. ст., после чего подключаются высоковакуумные

Характеристики высоковакуумных паромасляных насосов серии Н

Параметры	Типы насосов							
	Н-5С-М1	Н-2Т	Н-2Т-2	Н-5Т	Н-5Т-2	Н-8Т	Н-8Т-2	
Быстрота откачки воздуха при давлении от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., л/сек	500 ± 50	1500	1500	3000	3000	6000	6000	
Предельный вакуум, мм рт. ст.	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	
Надежность атмосферного воздуха внутрь насоса не более, мкл/сек	0,05	0,1	—	0,1	—	0,1	—	
Наибольшее выпускное давление, мм рт. ст.	0,15	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	
Рекомендуемое масло (по ГОСТу 7904—56)	ВМ-1 или ВМ-5	ВМ-1 или ВМ-5	ВМ-1 или ВМ-5	ВМ-1 или ВМ-5	ВМ-1 или ВМ-5	ВМ-1 или ВМ-5	ВМ-1 или ВМ-5	
Количество масла, заливаемого в насос, л	0,5	1	1,2	1,5	2	4	4	
Расход охлаждающей воды, л/ч	120—150	200	200	350	350	400—500	400—500	
Рекомендуемый механический насос предварительного разрежения	ВН-1МГ или ВН-2МГ	ВН-1МГ	ВН-1МГ	ВН-1МГ	ВН-1МГ	ВН-1МГ	ВН-1МГ	
мощность, квт	0,7	1,2—1,3	2	1,9—2,1	3	2,7—2,9	5,2—5,5	
напряжение, в	220/380	220	220	220	220/380	220	220	
схема соединения	—	Звезда	Звезда	Звезда	Звезда	Звезда	Звезда	
Вес, кг	26	51	75	94	156	170	264	

паромасляные насосы, с помощью которых давление в системе доводится до расчетного.

Характеристики вакуумных паромасляных бустерных насосов серии БН приведены в табл. 21. Зависимость быстроты откачки от давления для насосов этой серии показана на рис. 21.

В последние годы в отечественной и зарубежной металлургической промышленности находят применение прогрессивные конструкции пароэжекторных насосов.

Применение пароэжекторных вакуумных насосов особенно эффективно в вакуумных системах, системах крупногабаритных

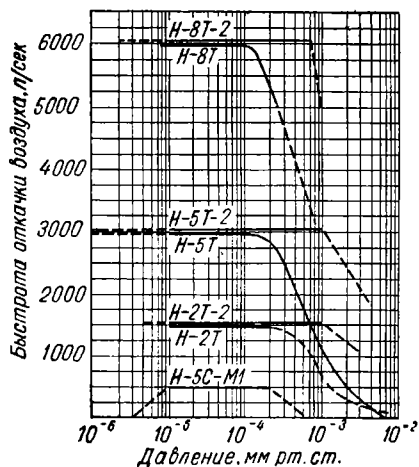


Рис. 20. Кривые изменения быстроты откачки высоковакуумных паромасляных насосов серии Н в зависимости от давления

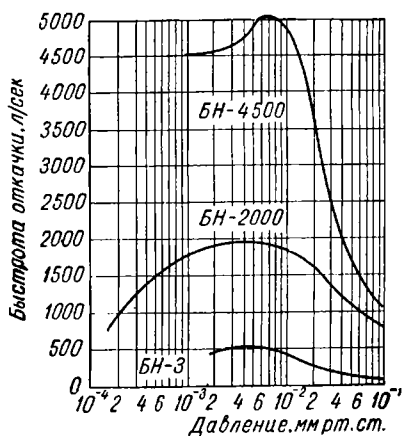


Рис. 21. Кривые изменения быстроты откачки паромасляных бустерных насосов серии БН в зависимости от давления

вакуумных установок, предназначенных для вакуумирования большого количества стали в сталеплавильных цехах, требующих насосов с высокой быстротой откачки, при специально низких степенях разрежения (порядка 0,1—1 мм рт. ст.). Так, на одном из заводов вакуумная система подобной установки включала группу механических насосов, обеспечивающих давление в вакуумной камере от 1 до 100 мм рт. ст. с быстротой откачки газа до 50 000 м<sup>3</sup>/ч. После замены механических насосов пароэжекторным насосом давление в вакуумной камере стало достигать 0,1—1 мм рт. ст., а быстрота откачки газа увеличилась до 1 000 000 м<sup>3</sup>/ч.

Пароэжекторный насос в большинстве случаев представляет собой многоступенчатую установку, работающую с выхлопом в атмосферу.

Схема четырехступенчатого вакуумного пароэжекторного насоса с конденсаторами смешения показана на рис. 22.



**Характеристики вакуумных паромасляных бустерных насосов  
серии БН**

Параметры		Типы насосов		
		БН-3	БН-2000	БН-4500
Быстрота откачки воздуха при давлении $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., л/сек		450	2000	4500
Предельный вакуум, мм рт. ст.		$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Наибольшее выпускное давление при $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., мм рт. ст.		0,3	2	$1 \pm 10\%$
Рекомендуемое масло		ВМ-3	ВМ-3	ВМ-3
Количество масла, заливаемого в насос, л		1,5	16	20
Расход охлаждающей воды, л/ч		150—180	450	1100
Рекомендуемый насос предварительного разрежения		ВН-1МГ	ВН-4 или ВН-6Г	ВН-6Г
Электро- двигатель	мощность, квт	3,5	7,5	25,2
	напряжение, в	220	380	380
	схема соединения	Звезда	Звезда	Звезда
Вес, кг		34	266	400

Первая и вторая ступени насоса установлены последовательно, непосредственно одна за другой без промежуточного конденсатора. За второй и третьей ступенями установлены конденсаторы. Из четвертой ступени пар выбрасывается непосредственно в атмосферу.

Пар поступает к соплам всех ступеней из паровой магистрали котельной или ТЭЦ. Насос подключается к откачиваемой вакуумной камере впускным фланцем первой ступени. Парогазовая смесь из первой ступени поступает непосредственно во вторую, а затем после сжатия во второй ступени — в конденсатор и т. д.

Конденсаторы, изображенные на рис. 22, работают по принципу смешения. Такой конденсатор представляет собой колонку с тарелками, в верхнюю часть которой впрыскивается охлаждающая вода из водяной магистрали. Пар, поднимаясь вверх навстречу потоку воды, перемешивается с ней и конденсируется. Конденсат уносится с охлаждающей водой, а откачиваемый газ,

насыщенный пар охлаждающей воды, поступает к следующей ступени.

Применяются конденсаторы и поверхностного типа, у которых

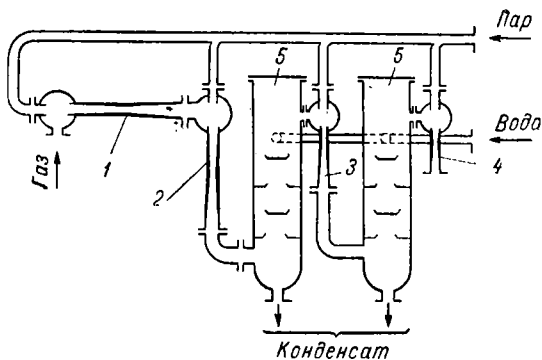


Рис. 22. Схема устройства четырехступенчатого вакуумного парожекторного насоса:  
1—4 — эжекторные ступени; 5 — конденсаторы смешения

теплообмен происходит через поверхность охлаждения, образуемую системой трубок, по которым проходит охлаждающая вода. Конденсат удаляется из конденсаторов либо с помощью водяных насосов, либо по специальным барометрическим трубам в барометрический сосуд и далее в дренаж [12].

Для суждения о величине потребления пара, охлаждающей воды и электроэнергии парожекторными насосами, в табл. 22 приведены соответствующие данные для 1 кг откачиваемого газа, в зависимости от создаваемого давления и температуры охлаждающей воды [18].

На рис. 23 приведен график удельного расхода рабочего пара вакуумными парожекторными насосами с различным количеством ступеней, при всасывающем давлении 0,5 мм рт. ст., противодавлении 760 мм рт. ст. и температуре охлаждающей воды 10° С [18]. К числу основных преимуществ парожекторных насосов,

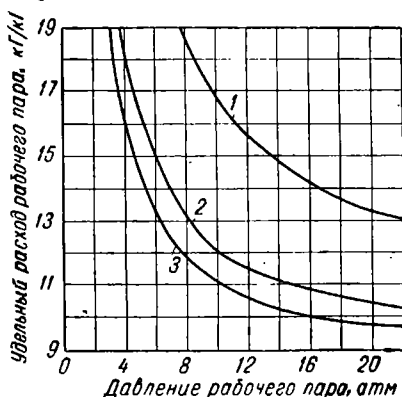


Рис. 23. График удельного расхода рабочего пара вакуумными парожекторными насосами с различным количеством ступеней, при всасывающем давлении 0,5 мм рт. ст., противодавлении 760 мм рт. ст. и температуре охлаждающей воды 10° С:  
1 — четырехступенчатые; 2 — пятиступенчатые; 3 — шестиступенчатые

**Удельный расход пара, охлаждающей воды и электроэнергии  
пароэжекторными вакуумными насосами в установках вакуумирования стали**

П а р о э ж е к т о р н ы й н а с о с б е з в о д о к о л ь ц е в о г о н а с о с а										
Давление всасывания, <i>мм рт. ст.</i>	0,1			0,5			1,0			
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	
Температура охлаждающей воды, °С	54	55	58	25	26	29	20	21	24	
Удельный расход пара, <i>кг пара/кг откач. газа</i>	1,4	2,4	6,3	0,6	1,0	2,8	0,5	0,8	2,1	
Удельный расход охлаждающей воды, <i>м³ воды/кг откач. газа</i>										
П а р о э ж е к т о р н ы й н а с о с с в о д о к о л ь ц е в ы м н а с о с о м										
Удельный расход пара, <i>кг пара/кг откач. газа</i>	47,5	48,5	50	18,5	19,5	21	13,5	14,5	16	
Удельный расход охлаждающей воды, <i>м³ воды/кг откач. газа</i>	1,4	2,4	6,2	0,6	1,0	2,7	0,5	0,8	2,0	
Удельный расход электроэнергии, <i>квт·ч/кг откач. газа</i>	0,28	0,30	0,32	0,28	0,30	0,32	0,28	0,30	0,32	

для указанных выше условий их применения, могут быть отнесены:

а) возможность достижения разрежения, отвечающего условиям процесса вакуумирования жидкой стали (0,1—1 мм рт. ст.), при быстроте откачки, во много раз превышающей достижимую быстроту откачки механическими насосами (до 1 000 000 м<sup>3</sup>/ч);

б) использование пара, производство которого не требует дополнительного оборудования, в котельных или ТЭЦ на металлургических заводах;

в) простота конструкции насосов, отсутствие в них вращающихся и движущихся частей;

г) отсутствие надобности в устройствах для очистки газов от пыли;

д) стойкость против воздействия влаги в откачиваемых газах, вследствие чего отпадает необходимость в вымораживающих ловушках;

е) необходимость незначительной производственной площади для установки насосов;

ж) наибольшая экономичность при заданной производительности и степени разрежения по сравнению со всеми вакуумными насосами.

Выпуск парожеткторных насосов начат на Казанском механическом заводе.

При проектировании вакуумных систем для вакуумных установок выбор вакуумных насосов осуществляется по их основным параметрам: начальное давление; максимальное выпускное давление; предельное давление; быстрота откачки насоса и др.

Начальным давлением называется давление, с которого насос начинает нормально работать. Как уже отмечалось выше, насосы серии Н нуждаются в предварительной разреженности всей вакуумной системы, включая насос. Такая предварительная разреженность осуществляется с помощью другого насоса, который в этом случае называется насосом предварительного разрежения.

В качестве насосов предварительного разрежения применяют главным образом вращательные масляные насосы типа ВН-1МГ, ВН-2МГ и др., присоединяемые своим впускным патрубком к выпускному патрубку насоса, нуждающегося в предварительной разреженности. При этом впускным патрубком вакуумного насоса называется патрубок, через который удаляемый газ входит в насос, а выпускным — называется патрубок, через который удаляемый газ выбрасывается из насоса.

Максимальным выпускным давлением насоса называется такое давление в выпускном патрубке, при превышении которого насос перестает работать. В проектируемой вакуумной схеме должна исключаться возможность превышения максимального допустимого давления в выпускном патрубке насоса.

Под предельным давлением принято понимать разреженность газа при работе насоса на себя.

С целью сочетания повышенной разреженности газа и увеличения скорости откачки (без превышения максимального выпускного давления в насосах) иногда для откачки газа из разреженного сосуда применяют комбинированные откачные системы. В таких системах выпускное давление одного насоса соответствует впускному давлению другого. Разумеется, наибольшее впускное давление предыдущей ступени не может быть ниже давления, создаваемого следующей ступенью более высокого давления. Например, вакуумные схемы большинства вакуумных индукционных и дуговых плавильных электропечей имеют комбинированные откачные устройства, состоящие из вакуумных паромасляных бустерных насосов серии ВН и вакуумных механических вращательных насосов серии ВН-Г с газобалластным устройством. Такое комбинированное применение вакуумных насосов обеспечивает осуществление плавки металла при разрежении в рабочем объеме печи порядка  $10^{-3}$  мм рт. ст. У вакуумных дуговых электропечей для плавки металлов, склонных к интенсивному взаимодействию с газами (например, титана), вместо бустерных насосов применяют высоковакуумные паромасляные насосы серии Н.

Кроме перечисленных выше основных параметров насосов следует учитывать и другие параметры: мощность, потребляемую электродвигателем и подогревателем; число оборотов ротора в минуту (у вращательных насосов); расход охлаждающей воды; расход масла и т. п.

Проектировщики вакуумных установок должны учитывать, что мощные насосы могут обеспечить достаточно глубокий вакуум даже при наличии весьма значительных протечек. Однако при этом над поверхностью дегазируемого металла будет проходить значительное количество воздуха, и, несмотря на достигнутую требуемую глубину вакуума, количество газов, реагирующих с металлом, будет увеличиваться, ухудшая качество металла.

При учете этих параметров полезно иметь специально составленные таблицы, графики и номограммы, облегчающие выполнение расчетов.

На рис. 24 приведена номограмма для расчета ожидаемого расхода масла механическим вращательным насосом, построенная из расчета, что средняя величина расхода масла составляет  $2 \text{ см}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  откачиваемого воздуха.

Для ускорения откачки объема отдельные механические насосы соединяют параллельно.

Для углубления вакуума в откачиваемом объеме с увеличением скорости откачки насосы включают последовательно, причем подобное соединение механических насосов (т. е. создание двустороннего насоса) позволяет экономить мощность, отбираемую электродвигателями обеих ступеней насоса.

Кроме вакуумных насосов в каждую вакуумную систему входят: приборы измерения вакуума, газоанализаторы, вакуумные затворы, газоочистители, фильтры, ловушки, сифоны, вентили и другая арматура, предназначенная для регулирования газовых потоков, разделения вакуумной системы на части, поддержания в каждой из них необходимых рабочих режимов и обеспечения возможности наблюдения за процессами, протекающими в системе, внутри аппаратуры, а также для чистки и заправки.

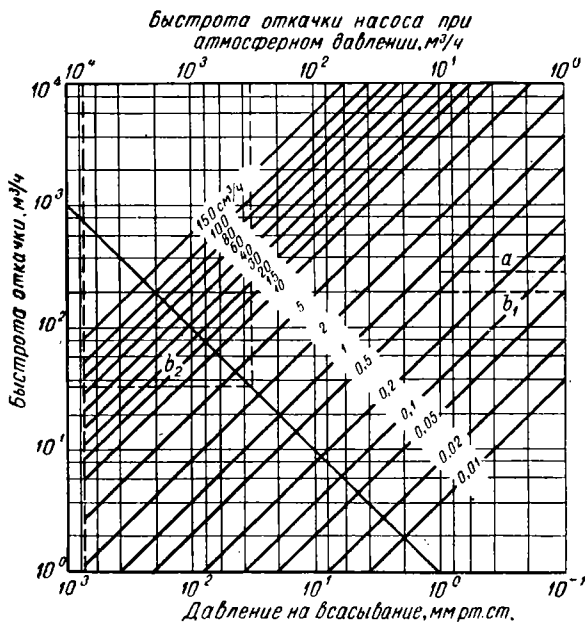


Рис. 24. Номограмма для расчета ожидаемого расхода масла механическим вращательным насосом

Выбор этой аппаратуры и арматуры осуществляется по соответствующим каталогам и справочникам.

Ниже познакомим читателя с основными положениями по размещению конструктивных элементов вакуумных систем, которые сводятся к следующему.

1. Вакуумный трубопровод должен иметь по возможности максимальный диаметр и минимальную длину. Как правило, диаметр трубопровода должен быть не менее диаметра подсоединяемого насоса. Практически поперечное сечение трубопровода должно быть не меньше суммы сечений впускных отверстий насосов. Число изгибов и колен у трубопровода должно быть минимальным.

2. При проектировании крупных вакуумных установок для вакуумирования стали, выхлопным трубопроводам необходимо давать уклон в сторону движения газов для того, чтобы

сконденсированная влага из откачиваемых газов и атмосферного воздуха не попадала в насосы, а собиралась бы в отдельной спускной трубе, с периодическим спуском в канализацию.

3. Между насосами и остальной вакуумной системой, а также в местах замкнутых контуров должны устанавливаться компенсаторы.

4. Для снятия вакуума по окончании вакуумирования и после остановки вакуумных насосов, на всасывающей части трубопровода и около насоса предварительного разрежения должны быть предусмотрены специальные вентили. К ним в случае надобности может быть подключен гелиевый течеискатель. Своевременное снятие вакуума с помощью вентиля предотвратит уход масла из насосов в трубопровод.

В крупногабаритных вакуумных установках, предназначенных для получения крупных слитков, во избежание вспышки газовых смесей (хлопков) при снятии вакуума необходимо предусмотреть выпуск в вакуумную камеру нейтральных газов или азота.

5. Внутренние поверхности вакуумной арматуры и труб трубопровода должны быть хорошо отполированы; полированные поверхности удерживают меньшее количество газов и облегчают промывку различного рода органическими растворителями (бензином, ацетоном, спиртом и т. п.). Конструкция трубопровода должна предусмотреть возможность отключения отдельных его элементов (особенно фильтров и ловушек) для очистки их от загрязнения, влаги и последующей промывки.

6. Все соединения вакуумного трубопровода должны обладать высокой герметичностью. Обеспечение герметичности разборных соединений достигается применением уплотняющих прокладок из вакуумной резины, пластмасс, меди и алюминия, стягиваемых болтами или винтами.

Герметичность вентиля и кранов достигается взаимной тщательностью притиркой соприкасающихся поверхностей, с последующим нанесением на них специальной вакуумной смазки.

7. Затворы и вентили должны хорошо перекрывать линии вакуумного трубопровода и не допускать в закрытом положении утечки газа на вакуумную сторону. В открытом положении они должны оказывать возможно меньшее сопротивление потоку газа. Срабатывать затворы и вентили должны по возможности быстрее.

8. Расположение вакуумных затворов должно обеспечить проверку работы любого вакуумного насоса «на себя», а также возможность переключения откачиваемого объема с насосов одного типа на другой.

9. Датчики вакуумметров должны быть расположены как вблизи откачиваемого объема, так и около насосов (чтобы можно было испытать их при работе «на себя»).

# V

## ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА

Эффективное использование выбранных вакуумных насосов в вакуумной системе, управление этой системой и контроль за натеканием газа в разрежаемом сосуде могут быть осуществлены только при условии применения в проектируемой вакуумной системе соответствующих приборов, обеспечивающих измерение вакуума газовоздушной среды.

Таковыми приборами являются вакуумметры. Поскольку свойства газа существенно меняются при различной его разреженности, то весь диапазон давлений — от атмосферного до глубокого вакуума — измерить одним прибором не представляется возможным.

В настоящее время для измерения вакуума разработано значительное количество приборов.

Вакуумметры, выпускаемые отечественной промышленностью, по принципам работы можно свести в следующие классы:

1. Жидкостные вакуумметры, непосредственно измеряющие давление (U-образные вакуумметры и их модификации).

2. Деформационные вакуумметры, использующие в качестве чувствительного элемента сильфон, мембрану и т. д.; деформация чувствительного элемента служит мерой давления.

3. Компрессионные вакуумметры, действие которых основано на законе изотермического сжатия идеального газа (манометры Мак-Леода).

4. Теплоэлектрические вакуумметры, использующие зависимость теплопроводности газа от давления (они подразделяются на термопарные и вакуумметры сопротивления).

5. Радиоактивные вакуумметры, использующие радиоактивные элементы.

6. Ионизационные вакуумметры, основанные на ионизации газов потоком электронов, испускаемых накалившимся катодом.

7. Магнитные электроразрядные вакуумметры, в которых мерой давления служит ток разряда, возникающий при низких давлениях под действием электрического и магнитного полей [9].



Класс	Теплоэлектрические		Радиоактивные		Ионы
	ВСБ-1	ВТ-2А	ВР-3	ВРБС-1	ВИТ-1А
Название	Блокировочный вакуумметр сопротивления	Термопарный вакуумметр	Радиоактивный вакуумметр	Радиоактивный блокировочный самопишущий вакуумметр	Ионизационно-термопарный вакуумметр
Датчики вакуумметра	Датчики давления	Датчики давления ЛТ-2 и ЛТ-4М	Радиоактивный ионизационный датчик МР-2	Вакуумметр ВР-3П с датчиком МР-2	Ионизационный датчик ЛМ-2 и термопарный датчик ЛТ-2 или ЛТ-4М
Диапазон измерения вакуума <i>мм рт. ст.</i>	30—0,7 и 0,7— $1 \cdot 10^{-2}$	С датчиком ЛТ-2 $2 \cdot 10^{-1}$ — $1 \cdot 10^{-3}$ . С датчиком ЛТ-4М $1 \cdot 10^{-1}$ — $1 \cdot 10^{-3}$	$100—5 \cdot 10^{-3}$	$100—1 \cdot 10^{-7}$ , автоматическая запись в пределах $100—8 \cdot 10^{-3}$	С датчиком ЛМ-2 $1 \cdot 10^{-3}$ — $5 \cdot 10^{-8}$ С датчиком ЛТ-2 $1 \cdot 10^{-1}$ — $1 \cdot 10^{-3}$
Погрешность измерения %	$\pm 40$	С датчиком ЛТ-2 $\pm 15$ . С датчиком ЛТ-4М $\pm 25$	$\pm 10$		С датчиком ЛМ-2 $\pm 15$
Напряжение сети, в	220	220	220	220	220
Потребляемая мощность, вт	140	110	110	400	160

## вакуумметров

зационные		Магнитные электроразрядные				
ВЛБ-1	ВИ-12	ВМБ-2	ВМБС-1	ВМБ-3	ВМБ-4	ВИМ-1
Автоматический блокировочный вакуумметр	Ионизационный вакуумметр	Магнитный блокировочный вакуумметр	Магнитный блокировочный самопишущий вакуумметр	Магнитный блокировочный вакуумметр	Магнитный блокировочный вакуумметр	Инверсионно-магнетронный вакуумметр
Ионизационный датчик ЛМ-2	Датчик ИМ-12 или ИМ-12М	Датчик ММ-8	Вакуумметр ВМБ-2МС с датчиком ММ-8. Вакуумметр с датчиком ЛТ-2 или ЛТ-4М	Датчик ММ-13М-4	Датчик ММ-15	Инверсионно-магнетронный датчик ММ-14С
$1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$ — $1 \cdot 10^{-10}$	$1$ — $5 \cdot 10^{-6}$	С датчиком ММ-8 $5 \cdot 10^{-6}$ . С датчиком ЛТ-2 или ЛТ-4М $1 \cdot 10^{-1}$ — $1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-1}$ — $1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-2}$
—	Не более $\pm 32$	Не более $\pm 55$ для диапазона $1$ — $1 \cdot 10^{-2}$ . Не более $\pm 35$ для диапазонов $10^{-3}$ — $5 \cdot 10^{-5}$ ; $1 \cdot 10^{-2}$ — $1 \cdot 10^{-3}$	—	$\pm 30$ для диапазона $10^{-2}$ — $1 \cdot 10^{-5}$ . $\pm 40$ для диапазона $1 \cdot 10^{-5}$ — $1 \cdot 10^{-7}$	$\pm 50$	Не более $\pm 15$
220	220	220	220	220	220	220
300	280	110	—	150	80	200

Каждому типу вакуумметра соответствует определенный интервал давлений.

Некоторые вакуумметры (например, магнитный электроразрядный ВНБ-4) позволяют осуществлять не только контроль, но и вакуумную блокировку при достижении заданного уровня давления в вакуумной системе, что позволяет автоматизировать работу

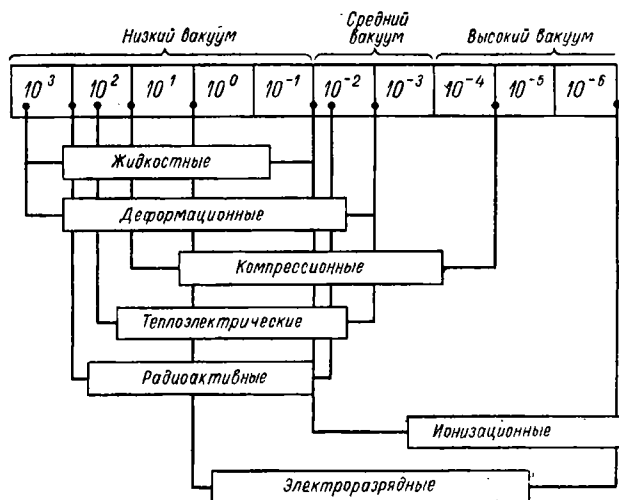


Рис. 25. Области давлений рационального применения отдельных типов вакуумметров

всей вакуумной установки и ее отдельных конструктивных элементов (автоматическое закрывание и открывание вакуумных затворов, автоматическое включение и выключение вакуумных насосов и т. д.).

Области давлений, в которых наиболее рационально применение отдельных типов вакуумметров, используемых в вакуумных системах литейных и металлургических вакуумных установок, приведены на рис. 25 (величины давлений в мм рт. ст.), а характеристики вакуумметров, выпускаемых в настоящее время отечественной промышленностью, приведены в табл. 23.

Жидкостные (гидростатические), деформационные и компрессионные вакуумметры непосредственно реагируют на изменение давления.

Теплоэлектрические, радиоактивные, ионизационные и электроразрядные вакуумметры измеряют не само давление, а некоторую его функцию. Их показания зависят от рода газа, а градуировка производится в основном по компрессионным вакуумметрам [10]. Обычно они состоят из датчика и радиотехнического измерительного блока.

Датчики вакуумметров представляют собой газоразрядные баллоны, соединенные с вакуумной системой. Их устройство различно в зависимости от классов и типов.

## VI

### ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Чтобы показать, как пользоваться приведенными выше формулами и таблицами для расчета вакуумных систем, приведем примеры расчета вакуумных систем вакуумной плавильно-разливочной установки и двух установок для внепечного вакуумирования стали<sup>1</sup>.

Расчеты вакуумных систем электропечей, описанные в известных трудах [7 и 8], в данном случае не приводятся.

**Пример 1.** Рассчитать вакуумную систему индукционной плавильно-разливочной установки для центробежной отливки в вакууме заготовок деталей из нержавеющей стали.

#### Данные для расчета

Максимальная температура металла в тигле $T, ^\circ\text{C}$	1700
Емкость тигля $G, \text{ кг}$	125
Время плавки $t_p, \text{ мин}$	40
Площадь внутренней поверхности камеры и внутренних конструкций $F, \text{ м}^2$	10
Величина вакуума $P, \text{ мм рт. ст.}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Натекание $q_n, \text{ мм рт. ст./сек}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент неравномерности вытекания газа $n$	1,0

Необходимая быстрота откачки газов из камеры определяется по формуле (45)

$$S = \frac{10 \cdot q_m G}{tP} n + \frac{q_\phi V_\phi}{tP} + \frac{q_z F}{P} + \frac{q_n}{P},$$

где  $q_m = 20 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  — среднее содержание газов в стали (см. табл. 8 и 10).

Футеровка из шамота-легковеса, объем футеровки  $V_\phi = 20 \text{ дм}^3$ .

По графику рис. 8 определяем газовыделение шамота-легковеса при средней температуре  $700^\circ \text{C}$

$$q_\phi = 50 \text{ см}^3/\text{дм}^3.$$

<sup>1</sup> Расчеты выполнены при участии инж. Л. М. Горбачевич.

Газоотделение с поверхности нержавеющей стали (см. табл. 14)

$$q_2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{ч.}$$

Подставляя численные значения, получаем

$$S = \frac{10 \cdot 20 \cdot 125 \cdot 760}{10^3 \cdot 40 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} + \frac{50 \cdot 20}{10^3 \cdot 40 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} + \\ + \frac{6 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 10^3}{10 \cdot 3600 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} + \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} = 4000 + 0,5 + 0,5 + 2,5 \approx 4000 \text{ л/сек.}$$

Как видно из расчета, величины внутреннего газовыделения и внешнего натекания в данном случае незначительны по сравнению с газовыделением из металла, и ими можно пренебречь.

Для заданного давления при необходимой скорости откачки наиболее рациональным является сочетание насосов: два бустерных паромасляных насоса БН-2000 и два бустерных паромасляных насоса БН-4500 (см. табл. 21).

Быстрота откачки при  $P = 2 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$  (согласно рис. 21):

$$\text{насоса БН-2000 } S_{n_1} = 1850 \text{ л/сек;}$$

$$\text{насоса БН-4500 } S_{n_2} = 4500 \text{ л/сек.}$$

Диаметр подсоединительного трубопровода  $d = 50,0 \text{ см}$ , длина трубопровода  $L = 3 \text{ м}$ .

Для определения режима течения газа по трубопроводу вычисляем  $\bar{P}d$ , где  $\bar{P}$  — среднее давление в трубопроводе,  $\text{мм рт. ст.}$

В рассматриваемом случае можно принять среднее давление в трубопроводе (с некоторым запасом)  $\bar{P} = 6 \text{ мм рт. ст.}$ ; тогда  $\bar{P}d = 6 \cdot 50 = 300 \text{ см} \cdot \text{мм рт. ст.}$ ;  $15 < \bar{P}d = 300 < 500$ .

Следовательно, режим течения газа в трубопроводе в основном будет молекулярно-вязкостным. Для молекулярно-вязкостного потока пропускная способность трубопровода определяется по формуле (36)

$$U = 12,1 \frac{d^3}{L} y,$$

где  $y = 5,4$  — поправочный коэффициент.

Подставляя численные значения, получаем

$$U = 28\,500 \text{ л/сек.}$$

Необходимая быстрота откачки насоса  $S_n$  определяется по формуле (29)

$$S_n = \frac{SU}{U - S} \approx 5000 \text{ л/сек.}$$

В конце процесса вакуумирования  $\bar{P} \approx 3 \text{ мм рт. ст.}$  Соответственно:  $\bar{P}d = 150 \text{ см} \cdot \text{мм рт. ст.}$ ,  $y = 3,1$ ,  $V = 16\,000 \text{ л/сек}$ ,  $S_n = 5400 \text{ л/сек}$ . Выбранные насосы вполне удовлетворяют необходимым условиям.

**Пример 2.** Рассчитать вакуумную систему установки для вакуумирования стали при выпуске ее из электропечи в закрытый ковш.

В данном случае в закрытом ковше перед заполнением его жидким металлом создается разрежение, которое поддерживается откачными средствами до полного его заполнения (рис. 26).

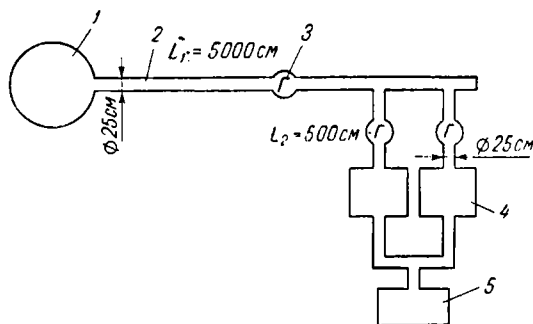


Рис. 26. Схема вакуумной системы установки для вакуумирования стали при выпуске ее из электропечи в ковш емкостью 15 т:

1 — закрытый ковш; 2 — трубопровод; 3 — газоочиститель (3 шт.); 4 — насосы РВН-60 (два комплекта); 5 — насос ВН-500

#### Данные для расчета

Объем ковша или вес вакуумируемого металла $G$ , т . . .	15
Давление в закрытом ковше к началу выпуска из электропечи в него металла $P_2$ , мм рт. ст. . . . .	1
Давление в закрытом ковше к концу заполнения его металлом, т. е. в конце вакуумирования $P_1$ , мм рт. ст. . . . .	5
Время заполнения ковша металлом, т. е. время вакуумирования $t_0$ , мин . . . . .	5
Объем всей системы $V$ , м <sup>3</sup> . . . . .	8
Диаметр трубопровода $d$ , см . . . . .	25,0
Длина общего трубопровода $L_1$ , см . . . . .	5000
Длина ответвленной части трубопровода $L_2$ , см . . . . .	(2×500)

Величина газовыделения из малоуглеродистой стали при температуре 1100—1200° С (согласно табл. 8) составляет

$$q_1 = 7-10 \text{ см}^3/100 \text{ г.}$$

Газ, десорбирующий со стенок закрытого ковша и газопровода, составляет небольшую величину по сравнению с выделением газа сталью.

Суммарное количество газа, которое нужно откачать из закрытого ковша, с учетом величины натекания газа через неплотности соединений принимаем, согласно выражению (41) и рекомендуемым выше величинам газовыделения

$$q_{\text{сумм}} = 20 \text{ см}^3/100 \text{ г} = 0,2 \text{ л/кг.}$$

След вательно, суммарное количество газа, которое подлежит откачке:

$$V_2 = q_{\text{сумм}}G = 0,2 \cdot 15\,000 = 3000 \text{ л.}$$

Быстрота откачки разрежаемого сосуда (в данном случае закрытого ковша) при давлении  $P_0 = 1 \text{ мм рт. ст.}$ , согласно выражению (13),

$$S_n = \frac{V_2}{t} P_0 = \frac{3000 \cdot 760}{5 \cdot 60} = 7600 \text{ л/сек.}$$

Соответственно при давлении в закрытом ковше, равном 2, 3, 4 и 5 мм рт. ст., быстрота откачки системы составит значения, приведенные в табл. 24.

Таблица 24

Быстрота откачки системы

$P_p$ мм рт. ст.	1	2	3	4	5
$S, \text{ л/сек}$	7600	3800	2530	1900	1520

Для определения режима течения газа по трубопроводам вычисляем величину  $\bar{P}d$ , где  $\bar{P}$  — среднее давление в трубопроводе, *мм рт. ст.*

$$\bar{P} = \frac{P_1 - P_2}{2} = \frac{5 - 1}{2} = 2 \text{ мм рт. ст.} = 2000 \text{ мк рт. ст.}$$

$$\bar{P}d = 2000 \cdot 25,0 = 50\,000 > 500.$$

Следовательно, режим течения газа можно считать вязкостным.

Проводимость соединительного трубопровода  $U$  может быть составлена из проводимости  $U_1$  трубопровода диаметром 250 мм и длиной 50 м и проводимости  $U_2$  двух трубопроводов диаметром 250 мм и длиной по 5 м.

Проводимость газоочистителей в расчет не вводим, но наличие последних компенсируем увеличением длины трубопроводов.

Для вязкостного режима потока газов, согласно уравнению (35),

$$U = 0,182 \frac{d^4}{L} \bar{P}.$$

Тогда  $U_1 = 0,182 \frac{25^4}{5000} 2000 = 28\,400 \text{ л/сек}$ ;  $U_2 = 0,182 \frac{25^4}{500} \times 2000 = 284\,000 \text{ л/сек.}$

Соответственно суммарная проводимость определяется по формуле (31):

$$\frac{1}{U_{\text{сумм}}} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{2U_2};$$

$$\frac{1}{V_{\text{сумм}}} = \frac{1}{28\,400} + \frac{1}{2 \cdot 284\,000} = \frac{568\,000 + 28\,400}{568\,000 \cdot 28\,400} = \frac{1}{27\,000} \text{ л/сек.}$$

Для обеспечения потребной быстроты откачки системы  $S$  подсчитываем по уравнению (29) необходимую быстроту откачки насосов

$$S_n = \frac{U_{\text{сумм}} S}{U_{\text{сумм}} - S}.$$

Для вычисления для возможных давлений в закрытом ковше воспользуемся данными табл. 25.

Таблица 25

Возможные давления в закрытом ковше

$P$ , мм рт. ст.	1	2	3	4	5
$U_{\text{сумм}}$ л/сек	13 500	27 000	40 500	54 000	675 000
$S$ , л/сек	760	3800	25 300	1900	1520
$U_{\text{сумм}} S$	$1020 \cdot 10^5$	$1020 \cdot 10^5$	$1020 \cdot 10^5$	$1020 \cdot 10^5$	$1020 \cdot 10^5$
$U_{\text{сумм}} - S$	$59 \cdot 10^3$	$232 \cdot 10^3$	$380 \cdot 10^2$	$521 \cdot 10^2$	$660 \cdot 10^2$
$S_n$	17 400	4410	2700	1960	1560

Для откачки газа из ковша необходимы два многопластинчатых насоса РВН-60 (см. табл. 17) и подсоединенный к ним последовательно один масляный вращательный насос ВН-500 (см. табл. 19). Данные о скорости откачки берем из графика (см. рис. 14), где приведена кривая скорости откачки насоса РВН-60 с присоединенным последовательно насосом РВН-30.

Насос ВН-500 при входном давлении 1—5 мм рт. ст. (см. рис. 18) более чем вдвое превышает по скорости откачки насос РВН-30. Следовательно, один насос ВН-500, подсоединенный последовательно к двум насосам РВН-60, вполне заменяет два насоса РВН-30, подключенных аналогично.

Определение достижения возможного вакуума в ковше в процессе вакуумирования при принятой схеме действия насосов (два насоса РВН-60 плюс один насос ВН-500) видно из табл. 26.

Как видно из таблицы, в конце заливки вакуум в ковше будет порядка 5 мм рт. ст., что отвечает заданию.



## Возможный вакуум в ковше

Давление в ковше мм рт. ст.	1	2	3	4	5
Быстрота откачки РВН-60—РВН-30, л/сек	450	675	770	800	840
Быстрота откачки 2 РВН-60—ВН-500, л/сек	900	1350	1540	1600	1680
Необходимая быстро- та откачки, л/сек	17 400	4410	2700	1960	1560

Пример 3. Рассчитать вакуумную систему установки для вакуумирования стали в ковше и при переливке ее из ковша в ковш емкостью до 150 т (рис. 27).

## Данные для расчета

Вес вакуумируемого металла $G$ , т	150
Давление в вакуумной камере к началу вакуумирования $P_1$ , мм рт. ст.	1
Давление в вакуумной камере к концу вакуумирования $P_2$ , мм рт. ст.	5
Время вакуумирования $t_0$ , мин	50
Объем всей системы $V$ , м <sup>3</sup>	120
Площадь внутренней поверхности вакуумной камеры $F$ , м <sup>2</sup>	86
Натекание $q_n$ , мм рт. ст.	$5 \cdot 10^{-3}$
Диаметр присоединительного трубопровода $D_1$ , см	50
Длина присоединительного трубопровода $L_1$ , см	12 000
Диаметр трубопровода в районе насосной станции $d_2$ , см	25
Длина трубопровода в районе насосной станции $L_2$ , см	1000
Коэффициент неравномерности вытекания газа $n$	1

Необходимая скорость откачки из камеры определяется по формуле (45)

$$S = \frac{10q_m G}{tP} n + \frac{q_\phi V_\phi}{tP} + \frac{q_g}{P} + \frac{q_n}{P},$$

где  $P$  — давление, при котором протекает процесс;

$q_m = 20 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  — среднее содержание газов в стали (см. табл. 8 и 10);

$V_\phi = 30 \text{ м}^3$  — объем футеровки (футеровка из шамота-легковеса).

По графику рис. 8 определяем газовыделение шамота-легковеса при средней температуре 700° С:

$$q_{\phi_2} = 50 \text{ см}^3/\text{дм}^3.$$

Газоотделение с поверхности нержавеющей стали (см. табл. 14):

$$q_2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{ч.}$$

Подставляя численные значения, получаем

$$S = \frac{10 \cdot 20 \cdot 150 \cdot 000 \cdot 760}{10^3 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 5} \cdot 1 + \frac{50 \cdot 30 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 5} + \frac{6 \cdot 10^{-4} \cdot 86 \cdot 10^2}{10 \cdot 3600 \cdot 5} + \frac{5 \cdot 10^{-3}}{5} = 1520 + 0,1 + 0,001 + 0,001 \approx 1520 \text{ л/сек.}$$

При давлениях 1—5 мм рт. ст. полученные результаты сводим в таблицу (табл. 27).

Величинами внутреннего газоотделения и внешнего натекания пренебрегаем, так как в рассматриваемом случае они незначительны по сравнению с газоотделением из металла.

Для определения режима течения газа по трубопроводам вычисляем  $\bar{P}d$ , где  $\bar{P}$  — среднее давление в трубопроводе

$$\bar{P} = \frac{P_2 - P_1}{2} = \frac{5 - 1}{2} = 2 \text{ мм рт. ст.} = 2000 \text{ мк рт. ст.};$$

$d$  — диаметр трубопровода в см;  $\bar{P}d = 2000 \cdot 50,0 = 1\,000\,000 > 500$ . Следовательно, режим течения газа можно считать вязкостным.

Проводимость соединительного трубопровода  $U$  может быть составлена из проводимости  $U_1$  трубопровода диаметром 500 мм и проводимости  $U_2$  трубопровода диаметром 250 мм. Проводимость газоочистителей в расчет не вводим, но их наличие компенсируем увеличением длины трубопроводов.

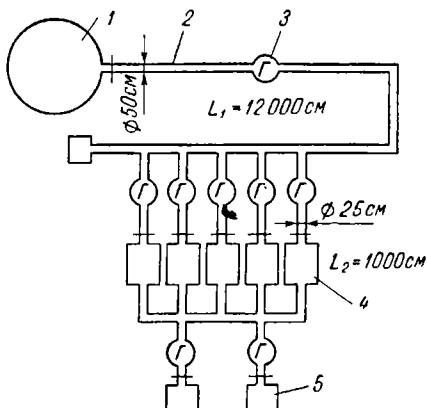


Рис. 27. Схема вакуумной системы установки для вакуумирования стали в ковше и при переливке ее из ковша в ковш емкостью до 150 т:

1 — вакуумная камера; 2 — трубопровод; 3 — газоочистители (8 шт.); 4 — насосы РВН-60 (пять комплектов); 5 — насосы ВН-500 (два комплекта)

Таблица 27

Давления при 1—5 мм рт. ст.

$P$ мм рт. ст.	1	2	3	4	5
S	7600	3800	2540	1900	1520

Для вязкостного потока, согласно уравнению (35),

$$U_1 = 0,182 \frac{D_1^4}{L_1} \bar{P} = 0,182 \frac{50^4}{12000} 2000;$$

$$U_1 = 190\,000 \text{ л/сек};$$

$$U_2 = 0,182 \frac{25^4}{1000} 2000 = 142\,000 \text{ л/сек}.$$

Соответственно, суммарная проводимость определяется по формуле (31)

$$\frac{1}{U_{\text{сумм}}} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{5U_2} = \frac{1}{190\,000} + \frac{1}{5 \cdot 142\,000} = \frac{1}{150\,000}.$$

Для обеспечения потребной быстроты откачки системы  $S$  подсчитываем необходимую быстроту откачки насосов  $S_n$  по уравнению (29)

$$S_n = \frac{U_{\text{сумм}} S}{U_{\text{сумм}} - S}.$$

Все вычисления для возможных давлений в камере сводим в таблицу (табл. 28).

Таблица 28

Возможные давления в камере

$P$ мм рт. ст.	1	2	3	4	5
$U_{\text{сумм}}$ , л/сек	100 000	150 000	200 000	250 000	300 000
$S$ , л/сек	7600	3800	2530	1900	1520
$U_{\text{сумм}} S$	$760 \cdot 10^6$	$570 \cdot 10^6$	$506 \cdot 10^6$	$475 \cdot 10^6$	$456 \cdot 10^6$
$U_{\text{сумм}} - S$	$92,4 \cdot 10^3$	$146,2 \cdot 10^3$	$197,5 \cdot 10^3$	$248,1 \cdot 10^3$	$298,5 \cdot 10^3$
$S_n$ , л/сек	8230	3900	2570	1920	1530

Откачку газа из вакуумной камеры производим пятью многопластинчатыми насосами РВН-60 (см. табл. 17), к которым последовательно подключены два масляных вращательных насоса ВН-500 (см. табл. 19). Данные о скорости откачки насоса берем из графика (см. рис. 14), на котором приведена кривая скорости откачки насоса РВН-60 с присоединенным последовательно насосом РВН-30. Насос ВН-500 при входном давлении 1—5 мм рт. ст. (см. рис. 18) более чем вдвое превышает по скорости откачки насос РВН-30. Следовательно, два насоса ВН-500, подсоединенные последовательно к пяти насосам РВН-60, вполне заменяют пять насосов РВН-30, подключенных аналогично.

Определение достижения возможного вакуума в камере в процессе вакуумирования при принятой схеме действия насосов сводим в таблицу (табл. 29).

Как видно из табл. 29, в конце разливки металла в камере будет вакуум порядка 3 мм рт. ст.

Таблица 29

Возможный вакуум в камере

Давление в камере мм рт. ст.	1	2	3	4	5
Быстрота откачки РВН-60+РВН-30, л/сек	450	675	770	800	840
Быстрота откачки 5 РВН-60+2 ВН-500, л/сек	2250	3380	3850	4000	4200
Необходимая быстро- та откачки, л/сек	8230	3900	2570	1920	1530

Определим время, необходимое для понижения давления в вакуумной камере от  $P_1 = 760$  мм рт. ст. до  $P_2 = 1$  мм рт. ст. по формуле (49)

$$t = V \left[ \left( \frac{1}{S_{\Sigma 1}} + \frac{1}{U_{\Sigma 1}} \right) \ln \frac{P_1}{P_2} + \left( \frac{1}{S_{\Sigma 2}} + \frac{1}{U_{\Sigma 2}} \right) \ln \frac{P_2}{P_3} + \dots \right. \\ \left. \dots + \left( \frac{1}{S_{\Sigma n}} + \frac{1}{U_{\Sigma n}} \right) \ln \frac{P_n}{P_{n+1}} \right].$$

Откачка газов из вакуумной камеры от  $P_1 = 760$  мм рт. ст. до  $P_i = 30 \div 25$  мм рт. ст. осуществляется пятью насосами РВН-60. При достижении в вакуумной камере  $P = 30 \div 25$  мм рт. ст. подключаются последовательно подсоединенные два насоса ВН-500.

Быстрота откачки насосов на каждом участке принимается: для насосов РВН-60 по рис. 14; для насосов ВН-500 по рис. 18.

Объем камеры с трубопроводом, согласно заданию, составляет  $V = 120 \text{ м}^3 = 120 \text{ 000 л}$ .

В табл. 30 дан сводный расчет времени вакуумирования.

Суммарная величина по всем 23 участкам, приведенным в табл. 30 (последняя колонка),

$$\left[ \left( \frac{1}{S_{\Sigma 1}} + \frac{1}{U_{\Sigma 1}} \right) \ln \frac{P_1}{P_2} + \dots + \left( \frac{1}{S_{\Sigma n}} + \frac{1}{U_{\Sigma n}} \right) \ln \frac{P_n}{P_{n+1}} \right] = 156 \cdot 10^{-5} \text{ сек/л.}$$

Следовательно, суммарное время откачки газов из вакуумной камеры от  $P_1 = 760$  мм рт. ст. до  $P_n = 1$  мм рт. ст. при работе пяти насосов РВН-60 и двух насосов ВН-500, согласно формуле (49), составит  $t = 120 \text{ 000} \cdot 156 \cdot 10^{-5} = 190 \text{ сек} \approx 3,2 \text{ мин}$ .

Сводный расчет времени вакуумирования

$i$	$P_i$	$P_i + 1$	$\frac{P_i}{P_i + 1}$	$\frac{P_i}{\ln \frac{P_i}{P_i + 1}}$	$U_{li}$	$U_{\Sigma i}$	$\frac{1}{U_{\Sigma i}}$	$\frac{1}{U_{\Sigma i} + S_{ni}}$	$\left( \frac{1}{U_{\Sigma i}} + \frac{1}{S_{ni}} \right) \ln \frac{P_i}{P_i + 1}$
1	760	700	1,085	0,008	$6,95 \cdot 10^7$	$6,29 \cdot 10^7$	$\frac{1}{5,5 \cdot 10^7}$	$\frac{1}{4700}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
2	700	600	1,17	0,157	$6,17 \cdot 10^7$	$4,62 \cdot 10^7$	$\frac{1}{4,88 \cdot 10^7}$	$\frac{1}{4700}$	$3,35 \cdot 10^{-5}$
3	600	500	1,20	0,182	$5,22 \cdot 10^7$	$3,9 \cdot 10^7$	$\frac{1}{4,12 \cdot 10^7}$	$\frac{1}{4700}$	$3,38 \cdot 10^{-5}$
4	500	400	1,25	0,223	$4,27 \cdot 10^7$	$3,2 \cdot 10^7$	$\frac{1}{3,37 \cdot 10^7}$	$\frac{1}{4700}$	$4,75 \cdot 10^{-5}$
5	400	300	1,33	0,285	$3,32 \cdot 10^7$	$2,48 \cdot 10^7$	$\frac{1}{2,62 \cdot 10^7}$	$\frac{1}{4700}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$
6	300	200	1,50	0,405	$2,37 \cdot 10^7$	$1,77 \cdot 10^7$	$\frac{1}{1,87 \cdot 10^7}$	$\frac{1}{4700}$	$8,65 \cdot 10^{-5}$
7	200	100	2,00	0,693	$1,42 \cdot 10^7$	$1,06 \cdot 10^7$	$\frac{1}{1,12 \cdot 10^7}$	$\frac{1}{4700}$	$14,75 \cdot 10^{-5}$

$i$	$P_i$	$P_i + 1$	$\frac{P_i}{P_i + 1}$	$\ln \frac{P_i}{P_i + 1}$	$U_{1i}$	$U_{2i}$	$\frac{1}{U_{\Sigma i}}$	$\frac{1}{U_{\Sigma i}} + \frac{1}{S_{ni}}$	$\left( \frac{1}{U_{\Sigma i}} + \frac{1}{S_{ni}} \right) \ln \frac{P_i}{P_i + 1}$
8	100	50	2,00	0,693	$7,1 \cdot 10^8$	$5,3 \cdot 10^6$	$\frac{1}{5,6 \cdot 10^6}$	$\frac{1}{4700}$	$14,75 \cdot 10^{-5}$
9	50	25	2,00	0,693	$3,51 \cdot 10^6$	$2,62 \cdot 10^6$	$\frac{1}{2,77 \cdot 10^6}$	$\frac{1}{4700}$	$14,75 \cdot 10^{-5}$
10	25	23	1,085	0,008	$2,28 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^6$	$\frac{1}{1,8 \cdot 10^6}$	$\frac{1}{4700}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
11	23	21	1,095	0,009	$2,09 \cdot 10^6$	$1,56 \cdot 10^6$	$\frac{1}{1,64 \cdot 10^6}$	$\frac{1}{4700}$	$1,92 \cdot 10^{-5}$
12	21	19	1,105	0,10	$1,9 \cdot 10^6$	$1,41 \cdot 10^6$	$\frac{1}{1,49 \cdot 10^6}$	$\frac{1}{4700}$	$2,13 \cdot 10^{-5}$
13	19	17	1,115	0,11	$1,71 \cdot 10^6$	$1,27 \cdot 10^6$	$\frac{1}{1,34 \cdot 10^6}$	$\frac{1}{4600}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
14	17	15	1,35	0,127	$1,52 \cdot 10^6$	$1,13 \cdot 10^6$	$\frac{1}{1,19 \cdot 10^6}$	$\frac{1}{4600}$	$2,77 \cdot 10^{-5}$
15	15	13	1,15	0,140	$1,33 \cdot 10^6$	$9,9 \cdot 10^5$	$\frac{1}{1,05 \cdot 10^6}$	$\frac{1}{4550}$	$3,09 \cdot 10^{-5}$

$i$	$P_i$	$P_i + 1$	$\frac{P_i}{P_i + 1}$	$\ln \frac{P_i}{P_i + 1}$	$\frac{P_i}{P_i + 1}$	$U_{1i}$	$U_{2i}$	$\frac{1}{U_{\Sigma i}}$	$\frac{1}{U_{\Sigma i} + S_{ni}}$	$\left( \frac{1}{U_{\Sigma i}} + \frac{1}{S_{ni}} \right) \ln \frac{P_i}{P_i + 1}$
16	13	11	1,18	0,165	$1,14 \cdot 10^5$	$8,5 \cdot 10^5$	$\frac{1}{9 \cdot 10^5}$	$\frac{1}{4500}$	$3,67 \cdot 10^{-5}$	
17	11	9	1,225	0,2	$9,5 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^5$	$\frac{1}{7,5 \cdot 10^5}$	$\frac{1}{4500}$	$4,45 \cdot 10^{-5}$	
18	9	7	1,285	0,25	$7,6 \cdot 10^5$	$5,66 \cdot 10^5$	$\frac{1}{6,0 \cdot 10^5}$	$\frac{1}{4400}$	$5,69 \cdot 10^{-5}$	
19	7	5	1,4	0,336	$5,7 \cdot 10^5$	$4,25 \cdot 10^5$	$\frac{1}{4,5 \cdot 10^5}$	$\frac{1}{4250}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	
20	5	4	1,25	0,223	$4,27 \cdot 10^5$	$3,18 \cdot 10^5$	$\frac{1}{3,36 \cdot 10^5}$	$\frac{1}{4100}$	$5,45 \cdot 10^{-5}$	
21	4	3	1,33	0,285	$3,32 \cdot 10^5$	$2,48 \cdot 10^5$	$\frac{1}{2,62 \cdot 10^5}$	$\frac{1}{3900}$	$7,31 \cdot 10^{-5}$	
22	3	2	1,5	0,405	$2,37 \cdot 10^5$	$1,77 \cdot 10^5$	$\frac{1}{1,87 \cdot 10^5}$	$\frac{1}{3600}$	$11,27 \cdot 10^{-5}$	
23	2	1	2,0	0,693	$1,42 \cdot 10^5$	$1,06 \cdot 10^5$	$\frac{1}{1,12 \cdot 10^5}$	$\frac{1}{3000}$	$23,2 \cdot 10^{-5}$	

## VII

### РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗРЕЖАЕМЫХ СОСУДОВ

В применяемых в литейном производстве вакуумных системах широко используются разрежаемые сосуды. Примером могут служить вакуумные системы установки для вакуумирования цветных и черных металлов перед заливкой их в литейные формы, а также системы для быстрого вакуумирования внутренних полостей прессформ машин литья под давлением. Роль разрежаемых сосудов в таких системах чрезвычайно велика. Однако практика показывает, что разрежаемые сосуды, применяемые без должного, правильного их расчета на прочность, выходят из строя, вызывают аварии [1]. Поэтому для эффективной и надежной работы любой вакуумной системы большое значение имеет правильно выполненный прочностной расчет разрежаемого сосуда и его элементов.

Ниже приведены основы прочностных расчетов основных элементов разрежаемых сосудов на конкретном примере расчета сосуда, изображенного на рис. 28.

*Расчет толщины стенки гладкой цилиндрической обечайки.* Толщина стенки гладкой цилиндрической обечайки рассчитывается как цилиндр, подверженный наружному давлению, по формуле

$$s = 0,47 \frac{D}{100} \left( \frac{P_p}{10^{-6} E^t} - \frac{l}{D} \right)^{0,4} + C \dots \quad (50)$$

где  $s$  — толщина стенки обечайки, см;  
 $D$  — внутренний диаметр обечайки, см (здесь  $D = 120$  см);  
 $P_p$  — давление расчетное, равное  $1 \text{ кг/см}^2$ ;  
 $E^t$  — модуль продольной упругости при расчетной температуре,  $\text{кг/см}^2$ .

В зависимости от марки стали и температуры  $E^t$  определяется по графику, изображенному на рис. 29. Рассчитываемый нами разрежаемый сосуд предназначается для быстрого создания разрежения в пресс-форме машины литья под давлением деталей из



алюминиевых сплавов. Он изготавливается из углеродистой стали марки Ст.3 и работает при нормальной расчетной температуре  $T = 20^\circ \text{C}$ .

Для углеродистой стали и температуры обечайки, равной  $20^\circ \text{C}$ , согласно графику (рис. 29),  $E^t = 2 \cdot 10^6$ .

Длина обечайки расчетная (в см) определяется по формуле

$$l = L + \frac{2}{3} h, \quad (51)$$

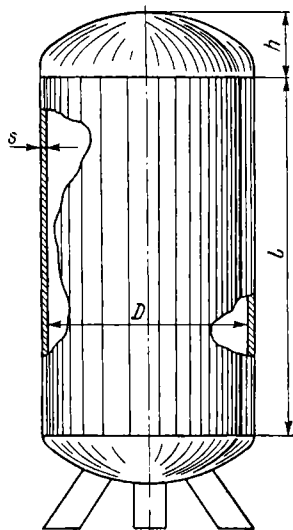


Рис. 28. Разрезаемый сосуд

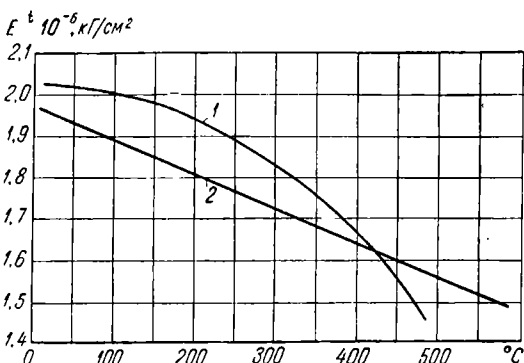


Рис. 29. Расчетные значения модуля упругости сталей в зависимости от температуры:

1 — углеродистые; 2 — легированные (аустенитного класса)

где  $L$  — длина обечайки чертежная, см;

$h$  — высота днища, см.

В нашем случае заданы:  $L = 170$  см и  $h = 30$  см; тогда  $l = 170 + \frac{2}{3} 30 = 190$  см.

Прибавка к расчетной толщине обечайки,  $C$ , см предусматривает компенсацию возможного утонения стенки сосуда вследствие коррозионного влияния рабочей среды на материал рассчитываемого элемента.

Величина прибавки устанавливается проектантом с учетом условий работы сосуда, технологических и монтажных требований. Принимаем  $C = 0,2$  см.

Подставляя известные величины в формулу (50), получим

$$s = 0,47 \frac{120}{100} \left( \frac{1}{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^6} \frac{190}{120} \right)^{0,4} + 0,2 = 0,712 \text{ см.}$$

Ближайшая по ГОСТу 5681—57 толщина листа составляет 8 мм; принимаем  $s = 8$  мм.

Определяем давление, допускаемое исполнительной толщиной обечайки, по формуле

$$[P] = 6,49 \cdot 10^{-6} E^t \frac{D}{l} \left[ \frac{100(s-C)}{D} \right]^2 \sqrt{\frac{100(s-C)}{D}}. \quad (52)$$

Подставляя известные величины, получим

$$[P] = 6,49 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^6 \frac{120}{190} \left[ \frac{100 \cdot 0,6}{120} \right]^2 \sqrt{0,5} = 1,45 \text{ кг/см}^2.$$

Проверим границы применимости формул (50) и (52) с помощью следующих выражений:

$$\beta = \frac{2(s-C)}{D} \leq \frac{1}{30}; \quad (53)$$

$$\text{а) } 1,5\sqrt{\beta} \leq \frac{l}{D} < \frac{1}{\sqrt{\beta}}; \quad (54)$$

$$\text{б) } 0,3 \frac{E^t}{\sigma_T^t} \sqrt{\beta^3} \leq \frac{l}{D}. \quad (55)$$

В данном случае  $\sigma_T^t$  — предел текучести материала обечайки при расчетной температуре.

При этом

$$\sigma_T^t \geq 1,5\sigma^*,$$

где номинальное допускаемое напряжение  $\sigma^*$  принимается по табл. 31 [16]. Число 1,5 характеризует соответствующий запас.

Подставляем известные величины:

$$\beta = \frac{2 \cdot 0,6}{120} = \frac{1}{100} < \frac{1}{30};$$

$$\text{а) } 1,5\sqrt{0,01} = 0,15 < \frac{190}{120} < \frac{1}{\sqrt{0,01}} = 10;$$

$$\text{б) } 0,3 \frac{2 \cdot 10^6}{1,5 \cdot 1490} \sqrt{0,01^3} = 0,02 \leq 1,58.$$

Неравенства выполняются; следовательно, расчет толщины стенки обечайки выполнен правильно.

*Расчет толщины стенки сферического днища.* Толщина стенки сферического днища сосуда рассчитывается по формуле

$$s_1 = \frac{P_p D}{4\sigma^* \eta K \varphi Z - P_p} \frac{D}{2h} + C, \quad (56)$$

где  $P_p$  — давление расчетное,  $\text{кг/см}^2$ ;

$D$  — внутренний диаметр днища,  $\text{см}$ .

$\sigma^*$  — номинальное допустимое напряжение.

Номинальные допусаемые напряжения  $\sigma^*$ , кг/см<sup>2</sup>

Расчетная температура стенок, °С	Углеродистые и низколегированные марганцовистые стали								Теплостойкие и кислотоустойкие легированные стали									
	Марка стали								Марка стали									
	Ст. 2	Ст. 3	Ст. 3	15, 15К	Ст. 4	20, 20К	25, 25К	22К	16Тс (3Н)	09Тс (М)	Расчетная температура стенок, °С	16М	12МХ	15ХМ	12Х1МФ	12Х2МФБ	Х18Н10Т	Х18Н13М2Б (ЭИ40Б)
20	1340	1380	1490	1520	1640	1670	1830	1720	1840	1840	20	1530	1610	1720	1900	1600	1470	1470
200	1200	1250	1340	1390	1470	1520	1600	1610	1720	1720	250	1420	1470	1580	1670	1490	1400	1400
240	1120	1150	1230	1270	1340	1400	1530	1530	1630	1630	300	1370	1450	1520	1600	—	1380	1380
260	1070	1100	1180	1210	1270	1330	1450	1480	1590	1590	350	1340	1410	1450	1530	—	1360	1360
280	1020	1050	1120	1160	—	1270	1380	1440	1540	1540	400	1260	1530	1380	1450	—	1330	1330
300	980	1000	1080	1110	—	1210	1320	1400	1490	1490	420	1210	1290	1340	1410	—	1300	1300
320	—	950	—	1060	—	1150	1260	1360	1280	1430	440	1170	1260	1320	1390	—	1260	1260
340	—	900	—	1000	—	1090	1190	1340	1220	1370	460	1120	1230	1300	1360	—	1230	1230
360	—	860	—	940	—	1030	1130	—	1150	1300	480	980	1210	1260	1330	—	1180	1180
380	—	810	—	890	—	970	1060	—	1080	1230	500	760	960	1030	1300	840	1150	1150
400	—	770	—	840	—	920	1000	—	1010	1150	510	—	830	890	1200	760	1130	1130
410	—	750	—	820	—	890	960	—	—	—	520	—	690	780	1080	690	1120	1120
420	—	720	—	790	—	860	930	—	—	—	530	—	570	690	950	630	1100	1100
430	—	680	—	730	—	830	860	—	—	—	540	—	470	600	850	570	1080	1080
440	—	600	—	650	—	730	770	—	—	—	550	—	—	500	750	520	1060	1060

Расчетная температура стенок, °С	Углеродистые и низколегированные марганцовистые стали										Теплостойкие и кислотостойкие легированные стали						
	Марка стали										Марка стали						
	Ст. 2	10, 10К	Ст. 3	15, 15К	Ст. 4	20, 20К	25, 25К	22К	16ТС (3Н)	09Т2С (М)	16М	12МХ	15ХМ	12Х1МФ	12Х2МФБ	X18Н10Т X18Н12Т	1Х18Н13М2В (ЭИ405)
450		530		590		640	680						420	670	480	1030	1030
460		470		530		560	590							590	450	980	990
470		420		460		490	520							520	410	890	950
480		370		400		430	450								380	810	910
490		320		350		380	390									740	870
500		270		300		340	340									690	830
																630	750
																540	680
																520	610
																480	540
																	480
																	430
																	390
																	350
																	310

При изготовлении днища из углеродистой стали марки Ст.3 и расчетной температуре работы сосуда  $T = 20^\circ \text{C}$ , согласно табл. 31 [16],

$$\sigma^* = 1490 \text{ кг/см}^2.$$

Поправочный коэффициент  $\eta$  при расчете с учетом класса и группы эксплуатации установки выбирается по табл. 32.

Таблица 32

Величины поправочного коэффициента

Группы эксплуатации	Классы эксплуатации	
	I	II
Обогреваемые сосуды и аппараты	$\eta=0,75$	$\eta=0,90$
Необогреваемые сосуды и аппараты	$\eta=0,90$	$\eta=1,0$

В нашем случае принимаем  $\eta = 1,0$ .

Коэффициент прочности  $\phi$  сварного шва принимается:

а) для стыковых швов с двусторонним проваром, выполняемым автоматической дуговой электросваркой под слоем флюса, а также для соединения втавр с обеспечением двустороннего сплошного провара  $\phi = 1$ ;

б) для соединений втавр, выполняемых вручную с обеспечением двустороннего сплошного провара, а также для всех видов стыковых швов, выполняемых вручную и подвариваемых со стороны вершины шва,  $\phi = 0,95$ ;

в) для стыковых швов, выполняемых вручную, доступных к сварке только с одной стороны и имеющих в процессе сварки подкладку со стороны вершины шва, прилегающую к основному металлу по всей длине шва,  $\phi = 0,9$ ;

г) для соединений втавр, в которых не обеспечивается сплошной провар соединяемых элементов, а также для соединений внахлестку при наличии шва с двух сторон  $\phi = 0,8$ ;

д) для стыковых швов, свариваемых только с одной стороны автоматической сваркой под слоем флюса,  $\phi = 0,8$ ;

е) для стыковых швов, доступных к сварке только с одной стороны и выполняемых вручную,  $\phi = 0,7$ .

В нашем случае принимаем  $\phi = 0,9$ .

Конструктивный коэффициент  $K$  при наружном давлении принимается:

для глухих днищ 0,63;

для днищ с неподкрепленными отверстиями 0,60 [16].

При глухом днище принимаем  $K = 0,63$ .

Коэффициент для неподкрепленного отверстия  $z$  обычно принимается равным  $1 - \frac{d}{D}$ .

При подкрепленных отверстиях, а также, если размер  $d$  относится к неподкрепленным отверстиям,  $z = 1$ .

Принимаем  $z = 1$ .

Высота выпуклой части днища  $h = 30$  см.

Прибавка к расчетной толщине степени днища на коррозию  $C$  принимается, как и при расчете толщины стенки обечайки, равной  $0,2$  см.

Подставим известные значения в формулу (56)

$$s_1 = \frac{1 \cdot 120}{4 \cdot 1490 \cdot 1 \cdot 0,63 \cdot 0,9 \cdot 1 - 1} \frac{120}{60} + 0,2 \approx 0,3 \text{ см.}$$

Конструктивно толщину стенки днища принимаем  $s_1 = 1,0$  см. Границы применимости формулы (56):

$$\beta = \frac{2s_1}{D} \leq 0,25; \quad (57)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 0,3}{120} = 0,005 < 0,25.$$

Неравенство удовлетворяется. Следовательно, расчет толщины стенки днища выполнен правильно.

Давление, допускаемое исполнительной толщиной стенки днища, определяется по формуле

$$[P] = \frac{8(s_1 - C) \varphi K \sigma^* \eta z}{D + 2 \frac{h}{D} (s_1 - C)} \frac{h}{D}. \quad (58)$$

Подставляя известные величины, получим

$$[P] = \frac{8 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,63 \cdot 1490 \cdot 1 \cdot 1}{120 + 2 \frac{30}{120} \cdot 0,8} \frac{30}{120} = 1,12 \text{ кг/см}^2.$$

Найденная величина  $[P]$  отвечает условиям работы разрезаемого сосуда.

Расчет на прочность цилиндрических обечаек, усиленных кольцами жесткости, плоских и конических днищ, укрепленных отверстий, фланцевых соединений, болтов и шпилек разрезаемых сосудов, осуществляется согласно РТМ 42—62 «Сосуды и аппараты» [16], на основе которого выполнены и описанные выше расчеты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борусевич А. И., Сидоренко В. И., Урузаев Т. Ю. Письмо в редакцию. — «Литейное производство», 1968, № 7.
2. Данилин Б. С. Применение вакуума. М., Трудрезервиздат, 1958.
3. Данилин Б. С. Вакуум. М., изд-во «Знание», 1960.
4. Дешман С. Научные основы вакуумной техники. Пер. с англ. М., изд-во «Мир», 1964.
5. Королев Б. И. Основы вакуумной техники. М., Госэнергиздат, 1958.
6. Кузнецов В. И. Механические насосы. — Вакуумная металлургия. Под научн. ред. чл.-корр. АН СССР А. М. Самарина. М., Металлургиздат, 1962.
7. Мармер Э. Н., Фиштер Л. Н. Расчет и проектирование вакуумных систем электропечей. М., Госэнергиздат, 1960.
8. Пазухин В. А., Фишер А. Я. Вакуум в металлургии. М., Металлургиздат, 1956.
9. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенченко Е. А. Оборудование для откачки вакуумных приборов. М.—Л., изд-во «Энергия», 1965.
10. Фролов Е. С., Русак Ф. А., Соколова Е. Е. и др. Вакуумные системы и их элементы. Справочник-атлас. Под ред. д-ра техн. наук В. Д. Лубенца, М., изд-во «Машиностроение», 1968.
11. Цейтлин А. Б. Основы расчета вакуумных систем. — Вакуумная металлургия. Под научн. ред. чл.-корр. АН СССР А. М. Самарина. М., Металлургиздат, 1962.
12. Цейтлин А. Б. Пароструйные вакуумные насосы. — Вакуумная металлургия. Под науч. ред. чл.-корр. АН СССР А. М. Самарина. М., Металлургиздат, 1962.
13. Яккель Р. Получение и измерение вакуума. Пер. с нем. М., Изд-во иностр. лит., 1952.
14. Бюллетень комиссии технической терминологии. Под ред. академика С. А. Чаплыгина и Д. С. Лотте. Вып. XII. Терминология вакуумной техники. М., АН СССР, 1938.
15. ГОСТ 5197—50. Вакуумная техника. Терминология.
16. РТМ 42—62. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность узлов и деталей. М., Стандартгиз, 1965.
17. Каталог фирмы E. Leybold's Nachfolger Köln—Bayental, 1963.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
I. Понятие о вакууме и важнейших свойствах разреженного газа . . . . .	4
II. Теоретические основы процесса откачки газов из разрежаемого сосуда . . . . .	11
III. Основные факторы, определяющие выбор оборудования для получения вакуума . . . . .	18
IV. Основные характеристики вакуумных насосов . . . . .	36
V. Приборы для измерения вакуума . . . . .	55
VI. Примеры расчета вакуумных систем . . . . .	59
VII. Расчет на прочность основных элементов разрежаемых сосудов . . . . .	71
Литература . . . . .	78



**Константин Матвеевич Овсянников**

**ОСНОВЫ РАСЧЕТА  
ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ  
В ЛИТЕЙНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ**

Редактор издательства **Г. И. Мишкевич**  
Обложка художника **Л. М. Жданова**  
Технический редактор **Т. Н. Кондрот**  
Корректор **С. Я. Кудерская**

Сдано в производство 9/XII 1969 г. Подписано к печати 30/XI 1970 г. М-51696  
Формат издания 60×90/16. Печ. л. 5. Уч.-изд. л. 4,5  
Зак. № 408. Тираж 4500 экз. Цена 24 коп.

Ленинградское отделение издательства «МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
Ленинград, Д-65, ул. Дзержинского, 10

Ленинградская типография № 6 Главполиграфпрома  
Комитета по печати при Совете Министров СССР  
Ленинград, С-144, ул. Монсеенко, 10