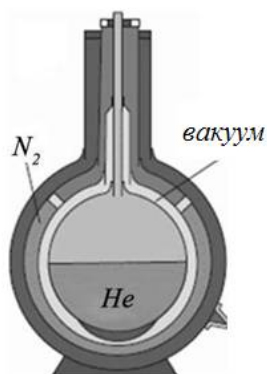


ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и нанoeлектроники

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических занятий по дисциплине  
**«Вакуумная техника»**  
для студентов направления подготовки  
11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»  
(направленность «Электронное машиностроение»)  
очной формы обучения



Воронеж 2017

Составители: канд. физ.-мат. наук Е.П. Николаева,  
С.О. Николаева

УДК 621.52(075)

ББК31.77я7

Н632

Методические указания к выполнению практических занятий по дисциплине «Вакуумная техника» для студентов направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (направленность «Электронное машиностроение») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Е.П. Николаева, С.О. Николаева. Воронеж, 2017. 57 с.

Методические указания содержат сведения об элементах вакуумных систем, физических процессах в вакууме, сорбционных свойствах откачки, принципах построения вакуумных систем. Методические указания предназначены для студентов третьего курса.

Издание подготовлено в электронном виде и содержится в файле «Му пз ВТ.pdf».

Табл. 10. Ил. 11. Библиогр.: 3 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. Н.Н. Кошелева

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический  
университет», 2017

## 1. ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ. ПРОВОДИМОСТЬ СЛОЖНОГО ТРУБОПРОВОДА

Рассмотрим вакуумную систему, которая состоит из откачиваемого объекта, крана, трубопровода, насоса и монотрических датчиков. С началом работы насоса количество газа в системе уменьшается, следовательно, происходит понижение давления в вакуумной системе. Наличие трубопровода, крана и других элементов, оказывающих сопротивление потоку газа, обуславливает разность давлений  $P_0$  и  $P_n$  на концах элемента ( $P_0, P_n$ ).

Быстротой действия вакуумной системы  $S_i$  в произвольном сечении трубопровода называется объем газа, проходящий через это сечение в единицу времени при давлении  $P_i$ .

Быстротой откачки объекта  $S_0$  называется объем газа поступающий в единицу времени из откачиваемого объекта трубопровода при давлении.

$$S_0 = \left. \frac{dV}{dt} \right|_{P=P_0}. \quad (1.1)$$

Быстрота действия насоса – это объем газа, удаляемого насосом в единицу времени через входной патрубок при давлении  $P_n$ .

$$S_n = \left. \frac{dV}{dt} \right|_{P=P_n}. \quad (1.2)$$

Для стационарного потока выполняется условие

$$Q = S_0 P_0 = S_n P_n = U(P_n - P_0). \quad (1.3)$$

Стационарный газовый поток через элементы вакуумной системы является следствием существующей в них разности давлений и рассчитывается следующим образом:

$$Q = U(P_n - P_0). \quad (1.4)$$

Для ряда параллельно соединенных элементов общая проводимость и сопротивление сложного трубопровода равны:

$$U_{нар} = \sum_1^n U_i; \quad (1.5)$$

$$\frac{1}{W_{нар}} = \sum_1^n \frac{1}{W_i}, \quad (1.6)$$

где  $U_i$  – проводимость трубопровода,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $W_i$  – сопротивление трубопровода,  $\text{с}/\text{м}^3$ .

Для ряда последовательно соединенных элементов общая проводимость и сопротивление сложного трубопровода равны:

$$W_{посл} = \sum_1^n W_i; \quad (1.7)$$

$$\frac{1}{U_{посл}} = \sum_1^n \frac{1}{U_i}. \quad (1.8)$$

Вакуумные системы включают трубопроводы различной длины и поперечного сечения, соединённых последовательно, параллельно, кранов, отверстий и др.

## Режим течения газа в трубопроводах

Проводимость элемента вакуумной системы зависит от режима течения газа в трубопроводе.

Свойства газа и явления в вакууме различаются в зависимости от отношения  $\lambda/d$ , где  $\lambda$  – средняя длина свободного размера молекулы,  $d$  – диаметр трубопровода, при  $T = \text{const}$  обратно пропорциональный давлению. По мере откачки газа от сосуда  $\lambda$  увеличивается и может наступить такой момент, когда  $\lambda > d$ . При  $\lambda \gg d$  столкновений между молекулами газа практически нет, и молекулы без столкновений проходят от стенки к стенке.

Свойства газа и различия в его поведении в зависимости от  $\lambda/d$  необходимо учитывать при разработке вакуумных систем, приборов, насосов, следовательно, соотношение  $\lambda/d$  положено в основу определения степени вакуума.

Если  $\lambda \ll d$  – низкий вакуум;

$\lambda \sim d$  – средний вакуум;

$\lambda \gg d$  – высокий вакуум.

В табл. 1.1 приведено соотношение степени вакуума и области давлений. Таким образом, степень вакуума понятие относительное, и одному и тому же давлению могут соответствовать разные степени вакуума. Например, воздух в порах твердого тела соответствует высокому вакууму и при нормальном давлении.

Таблица 1.1

Соотношение степени вакуума и области давлений

Степень вакуума	Низкий	Средний	Высокий	Сверхвысокий
Область давлений, Па	$>100$	$100-10^{-1}$	$10^{-1}-10^{-5}$	$<10^{-5}$

Для вакуумных систем с характерными размерами трубопроводов сантиметры степени вакуума характеризуются приблизительно значениями давлений указанных в табл. 1.1.

В самом начале процесса откачки при наиболее высоких давлениях может существовать инерционный режим течения газа, когда основную роль играют силы инерции движущейся массы газа. Обычно такой режим существует короткое время, в момент запуска некоторых вакуумных установок или при аварийных ситуациях, т.е является не характерным для стандартных вакуумных систем.

Условие существования инерционного режима определяется критерием Рейнольда

$$R = \frac{Ud}{\eta}, \quad (1.9)$$

где  $U$  – средняя скорость газа;  $d$  – характерный диаметр элемента;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости.

При  $R \geq 2200$  существует инерционный режим.

Основную роль при низком вакууме играет вязкостный режим течения газа, при котором характер распределения скорости определяется силами внутреннего трения.

В процессе откачки давление уменьшается настолько, что при этом молекулы не сталкиваются друг с другом и такой режим течения газа называется молекулярным.

В среднем вакууме на течение газа оказывает влияние и внутреннее трение, и молекулярный перенос. Существующий при этом режим течения газа называется молекулярно-вязкостным.

Граничные условия существования различных режимов течения газа определяется по значениям критерия Кнудсена (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Критерии границ режимов течения газа ( $\lambda/d$ )

Режим	Граница, Па·м	
	Верхняя	Нижняя
Вязкостный	Атм. давление	$\lambda/d \leq 5 \cdot 10^{-3}$
Молекулярно-вязкостный	$\lambda/d > 5 \cdot 10^{-3}$	$\lambda/d \leq 1,5$
Молекулярный	$\lambda/d > 1,5$	$\infty$

При расчётах более удобно использовать  $P \cdot d$ , а не  $\lambda/d$ .

Известно, что при постоянной температуре  $\lambda \cdot P = \text{const} = \lambda'$ , где  $\lambda'$  – средняя длина свободного пробега при  $P = 1$  Па.

Значения  $\lambda'$  вычислены и табулированы.

Для воздуха при  $T = 298$  К  $\lambda' = 6,2 \cdot 10^{-3}$  мПа. Следовательно, при любом давлении для воздуха можно определить  $\lambda$  по уравнению

$$\lambda = \frac{6,2 \cdot 10^{-3}}{P}, \text{ м.} \quad (1.10)$$

Используя это выражение, приведем таблицу критериев режима течения газа через значение величины  $P \cdot d$  (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Критерии границ режимов течения газа ( $P \cdot d$ )

Режим	Граница, Па·м	
	Верхняя	Нижняя
Вязкостный	Атм. давление	$P \cdot d \geq 1,33$
Молекулярно-вязкостный	$P \cdot d < 1,33$	$P \cdot d \geq 2 \cdot 10^{-2}$
Молекулярный	$P \cdot d < 2 \cdot 10^{-2}$	$P \rightarrow 0$

Значения проводимости круглого трубопровода при разных режимах течения газа приведены в табл. 1.4 и 1.5.

Таблица 1.4

Проводимость трубопровода для воздуха

Режим	Проводимость газа круглого трубопровода, $\text{м}^3/\text{с}$	Проводимость газа круглого трубопровода для воздуха при $T = 298 \text{ К}$ , $\text{м}^3/\text{с}$
Вязкостный	$U_{TB} = \frac{\pi d^4}{128\eta l} P_{cp}$	$U_{TB} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} P_{cp}$
Молекулярный	$U_{TM} = 38,2 \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{d^3}{l}$	$U_{TM} = 121 \frac{d^3}{l}$
Молекулярно-вязкостный	$U_{TMB} = bU_{TM} + U_{TB}$	---

Для технических расчетов  $b = 0,9$ .

Таблица 1.5

Проводимость отверстий для воздуха

Режим	Проводимость отверстия площадью $A$ , $\text{м}^3/\text{с}$	Проводимость крана для воздуха при $T = 298 \text{ К}$ , $\text{м}^3/\text{с}$
Вязкостный	$U_{OB} = 200A$	$U_{KB} = 0,6U_{OB}$
Молекулярный	$U_{OM} = 116A$	$U_{KM} = 0,1U_{OM}$
Молекулярно-вязкостный	$U_{OMB} = U_{OM} + \frac{U_{OB} - U_{OM}}{P_B - P_M} \times (P_i - P_M)$	$U_{KMB} = U_{KM} + \frac{U_{KB} - U_{KM}}{P_i - P_M} \times (P_i - P_M)$

$P_B$  – верхняя граница молекулярно-вязкостного режима;

$P_M$  – нижняя граница молекулярно-вязкостного режима;

$P_i$  – давление, для которого определяется режима течения газа;

$l$  – длина трубопровода.



При течении газа по трубопроводу необходимо учитывать влияние местных сопротивлений. Принимается, что влияние изгиба трубопровода под углом  $90^\circ$  учитывается удлинением трубопровода на 1.33 диаметре:

$$L_{расч} = I_{факт} + d \cdot i, \quad (1.11)$$

где  $i$  – число изгибов трубопровода.

Проводимость крана в вязкостном режиме можно считать равной (50 – 70) % проводимости отверстия в молекулярном режиме – (6 – 15) %.

Проводимость трубопровода при переходе от одной температуры к другой определяется формулой:

$$U_{T1}/U_{T2} = \sqrt{T_1/T_2}. \quad (1.12)$$

### Задание

1. Рассчитать проводимость трубопровода для воздуха при 293 К.

2. При нанесении металлических пленок расстояние между испарителем и подложками равно  $d$ . Определить, при каком давлении нужно проводить процесс напыления, если режим течения газа в объеме должен быть молекулярным.

$d = 5, 8, 10, 15, 18, 20, 25, 29, 30, 35, 40, 45, 50$  см.

3. Рассчитать проводимость магистрали предварительной откачки при давлении  $P$ . Магистраль состоит из трубопровода  $d = 3,2$  см,  $l = 80$  см (90; 100; 120 см), электромагнитного клапана ДУ-32 (размер проходного сечения 3,2 см).

Вакуумная система состоит из: вакуумного объекта, пароструйного насоса, механического насоса, форбаллона, электромагнитных клапанов, датчиков измерения давления.

При проведении расчетов использовать данные, приведенные в табл. 1.6 и 1.7.

Таблица 1.6

Вариант	Диаметр, см	$P_1$ , Па	$P_2$ , Па	$P_3$ , Па
1	2	$10^2$	10	$8 \cdot 10^{-4}$
2	3,2	$5 \cdot 10^2$	1	$6 \cdot 10^{-4}$
3	4	$5 \cdot 10^2$	0,2	$2 \cdot 10^{-4}$
4	6	$3 \cdot 10^2$	0,3	$10^{-4}$
5	8	$2 \cdot 10^2$	0,1	$8 \cdot 10^{-5}$
6	10	$10^2$	$10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-5}$
7	12	90	$8 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-5}$
8	14	80	$6 \cdot 10^{-2}$	$10^{-5}$
9	16	70	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$
10	18	60	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-6}$
11	20	50	$10^{-2}$	$10^{-7}$
12	24	40	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-8}$
13	30	30	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-8}$
14	36	20	$10^{-3}$	$10^{-8}$

Таблица 1.7

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_1$ , Па	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$
$P_2$ , Па	10	12	15	16	20	30	40	60	100

### Контрольные вопросы

1. Рассчитать режим течения газа для заданных  $P$  и  $d$ .
2. Рассчитать проводимость элементов.
3. Рассчитать проводимость сложного трубопровода.

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМЕ. ПЕРЕНОС ТЕПЛА

Передача тепла в газах происходит в основном благодаря двум процессам: конвекции и теплопроводности.

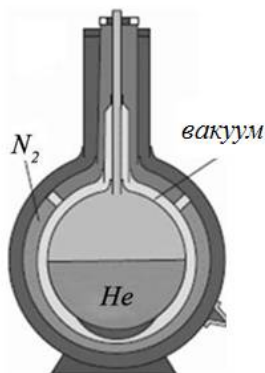
*Конвекция* – образование макроскопических потоков в газовой (или жидкой) среде - возникает под действием силы тяжести в условиях, когда давление газа и расстояние между телами достаточно велики. Если нагретое тело находится внизу, а холодное, к которому передается тепло, наверху, газ, приобретая тепло от нагретого тела уменьшает свою плотность и поднимается вверх, где отдавая тепло холодному телу, охлаждается. Как следствие, плотность газа увеличивается и он опускается вниз. В результате возникает интенсивная циркуляция газа, которая практически не поддается количественному теоретическому описанию. По абсолютной величине количество тепла, переносимое из-за конвекции, может быть значительно больше, чем энергия, передаваемая за счет теплопроводности. Однако с понижением давления газа роль конвекции в передаче тепла уменьшается.

*Теплопроводность* – непосредственная передача энергии теплового движения между имеющими разную температуру объемами вещества за счет взаимодействия их молекул. В газах это взаимодействие осуществляется молекулами, беспорядочно перелетающими в ту или в другую сторону через границу раздела между объемами и передающими избыточную кинетическую энергию при столкновениях (в конденсированных (твердых и жидких) средах более интенсивные колебания молекул одного объема раскачивают соседние с ними молекулы другого объема).

При очень низких давлениях газа, когда средняя длина свободного пробега молекул больше размеров сосуда, в котором газ заключен, обычное понятие теплопроводности – явления, обусловленного столкновениями молекул между собой – теряет смысл. Перенос тепла (теплопередача) существует и

в разреженном газе, но механизм его иной. Так как молекулы здесь сталкиваются только со стенками сосуда, то процесс теплопередачи от более нагретой поверхности к менее нагретой можно приблизительно описать так. Молекулы газа при ударах о более нагретую поверхность приобретают энергию, соответствующую температуре этой поверхности. Отразившись от нее, молекулы, не сталкиваясь между собой, достигают более холодной поверхности, передают ей избыток энергии и отражаются от нее с энергией, соответствующей температуре холодной стенки. При таком способе передачи тепла от одной поверхности к другой внутри газа нет градиента температуры, поэтому и теряет смысл понятие теплопроводности. Очевидно, что в этих условиях количество тепла, переносимое газом, пропорционально числу ударов молекул о стенки (которое определяется концентрацией молекул), то есть давлению газа.

Это свойство разреженных газов используется в некоторых устройствах: тепловых манометров, калориметрах, сосудах Дьюара, в приборах для поддержания и регулировки низких температур – криостатах и т.д. Для уменьшения теплопередачи между двойными стенками таких устройств создается по возможности высокая степень разрежения. Вариант исполнения сосуда Дьюара представлен на рисунке.



Сосуд Дьюара стеклянный лабораторный

Лабораторный сосуд Дьюара представляет собой стеклянную колбу с двойными стенками. Внутренняя поверхность колбы покрывается тонким слоем серебра или алюминия для уменьшения переноса теплоты за счет излучения.

### Расчетная часть

Задание 1.

Расстояние между испарителем и подложкой  $d$  (10, 20, 30, 40, 50 мм). Как изменится коэффициент теплопроводности газа, если давление снизится от  $5 \cdot 10^5$  Па до  $5 \cdot 10^4$  Па ( $1 \cdot 10^4$ ,  $5 \cdot 10^3$ ,  $10^3 \dots 50$  Па).

Если давление изменится от  $1 \cdot 10^{-2}$  Па до  $2 \cdot 10^{-2}$  Па ( $2 \cdot 10^{-1}$ ,  $4 \cdot 10^{-1}$ ,  $6 \cdot 10^{-1}$ ,  $8 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10^{-2}$  Па).

Задание 2.

Рассчитать пределы работы термопарного датчика. Определить интервалы давлений, имеющие линейную зависимость ЭДС от давления.

### Методика расчета

Для заданного диаметра датчика определить границы режимов течения газов:

1) граница между вязкостным и молекулярно-вязкостным режимами

$$P_{\text{в.м-в}} = \frac{1,32}{d}, \text{ Па.} \quad (2.1)$$

2) граница между молекулярно-вязкостным и молекулярным режимами

$$P_{\text{м-в,м}} = \frac{0,02}{d}, \text{ Па.} \quad (2.2)$$

3) коэффициент теплопроводности

$$\lambda = \text{const}, \rho \cdot \lambda, \quad (2.3)$$

где  $\rho$  - плотность газа,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\lambda$  - средняя длина свободного пробега, м.

Для низкого вакуума  $\lambda \sim 1/P$ ,  $\rho \sim P$ , следовательно  $\rho \cdot \lambda$ , - не зависит от давления.

Для высокого вакуума  $\lambda \sim d$ , следовательно,  $\rho \cdot \lambda \sim P$ , т.е. в условиях высокого вакуума теплопроводность газа прямо пропорциональна давлению.

В условиях среднего вакуума  $\lambda \sim d$  имеется нелинейная зависимость от давления и с приближением состояний газа к высокому вакууму зависимость теплопроводности газа приближается к прямой пропорциональности.

### Контрольные вопросы

1. Каков принцип работы манометра сопротивления и термопарного манометра?

2. От каких факторов зависит чувствительность тепловых манометров?

3. Как проводится градуировка тепловых манометров?

4. Каковы пределы измерения давления термопарным манометром? Какими факторами обусловлена невозможность измерения давления ниже  $10^{-1}$  Па? Какими способами можно расширить пределы измерения давления термопарных манометров?

5. Как зависит коэффициент теплопроводности от давления при различных режимах течения газа?

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ МАТЕРИАЛОВ

Одним из условий сохранения высокого вакуума в изолированных от насосов системах и электровакуумных приборах является отсутствие газовой выделений с поверхностей и из масс, граничащих с вакуумом. В обычных условиях все материалы содержат связанные газы: удерживаются на поверхности за счет сил физической адсорбции (адсорбированы); растворены в объеме материала (абсорбированы); содержатся в виде химических соединений (хемосорбированы); имеются в виде объемных включений в порах, трещинах (окклюдированы). Связанные газы при определенных условиях могут переходить в свободное состояние (десорбироваться) и повышать давление в замкнутом объеме.

Обычно в ходе откачки высоковакуумные системы и электровакуумные приборы подвергаются обезгаживанию. В каждом конкретном случае следует рассматривать пару «материал - газ» и намечать соответствующие пути освобождения материала от газа.

В зависимости от способа получения, хранения и обработки материалы могут содержать и выделять самые разнообразные газы: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и др.

Растворимость кислорода происходит с образованием химического соединения, и аналогичные обстоятельства имеют место для окиси углерода (образование карбониллов). Кислород поглощают все металлы (за исключением благородных).

Водород растворяется во многих металлах; в Ni, Fe, Co, Cu, Ag, Mo, W и Pt растворимость водорода с повышением температуры возрастает, а в Ti, Zr, Ta, Pt – уменьшается. В Au, Zn, Cd и In растворимость водорода вообще невелика. Он лучше всех газов растворяется в металлах вследствие малого радиуса его атомов и ионов.

Азот поглощают металлы, образующие нитраты, а именно, Cr, Mo, W, Fe, Mn и Ta, Zr, Al.

Такие газы, как CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (и H<sub>2</sub>O), обычно образуются на поверхности металла из составляющих их элементов.

Идентификацию газов, выделяющихся из материалов, осуществляют обычно с помощью масс-спектрометров.

Технологов интересует, кроме того, и количество газов, которое может выделиться из материалов в ходе их вакуумной обработки. В связи с тем, что газовыделение зависит от очень многих факторов и не всегда строго известна «история» материала, то нельзя полностью доверяться справочным сведениям по газовыделению, поэтому часто приходится оценивать газовыделение экспериментально.

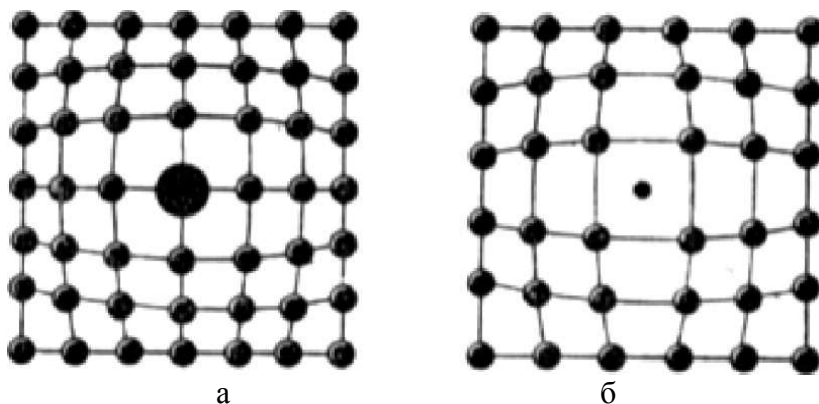
Наиболее эффективным способом очистки материалов от газов считают высокотемпературный отжиг в вакууме или водороде. При этом решается также проблема снятия внутренних напряжений, появившихся в ходе предварительных механических и других обработок материалов.

Газы и металлы образуют растворы различных типов. Сравнительно небольшие по размерам атомы газов (водорода, азота) могут занимать устойчивое положение между большими атомами металла, образуя так называемые растворы внедрения. При этом кристаллическая решетка металла несколько растягивается вследствие колебаний атомов относительно центров равновесия. Если размеры атомов растворяющихся газов соизмеримы с размерами атомов металла, то образуются так называемые растворы замещения: в узлах кристаллической решетки атомы газа замещают атомы металла, при этом решетка деформируется (рисунок).

Перемещение растворенных атомов газов в объеме металла или к его поверхности происходит за счет диффузии; диффузия возможна тогда, когда колеблющиеся атомы газов приобретают энергию, достаточную для «расталкивания» со-



седних атомов решетки металла. Диффузия газов в растворах внедрения идет легче, чем в растворах замещения.



Деформация кристаллической решетки в случае образования раствора замещения (а) и раствора внедрения (б)

Проницаемость газа в металле  $q_{\text{прон}}$  зависит от многих факторов. Выражение для коэффициента проницаемости газа через металлическую пластину толщиной  $d$ , по одну сторону которой имеется вакуум, а по другую – газ с давлением  $P$ , экспоненциально зависит от температуры  $T$ :

$$q_{\text{прон}} = \frac{A}{d} g_0 \exp\left(-\frac{\Delta H}{jRT}\right) \cdot (P_1^{1/j} - P_2^{1/j}), \quad (3.1)$$

где  $g_0$  – константа проницаемости, зависящая от природы системы «газ – металл»;  $\Delta H$  – энергия активации процесса диффузии;  $P$  – давление;  $A$ ,  $d$  – площадь и толщина стенки;  $j = 1$  для неметаллов;  $j = 1/2$  для металлов.

При повышении температуры возрастает интенсивность колебаний частиц твердого тела, и осевшие на поверхности молекулы газа могут выделиться в свободное пространство.

Освободившиеся участки поверхности твердого тела могут быть снова заняты газом, диффундирующим из объема твердого тела. Ясно, что обезгаживание следует вести при повышенных температурах, чтобы ускорить процессы десорбции и диффузии. Однако в некоторых случаях при повышенных температурах процессы могут осложняться за счет химического взаимодействия газов с твердым телом.

На практике бывает довольно трудно различить, за счет какого процесса поглощается или выделяется газ. Более легко различима физическая адсорбция (десорбция), при которой газ поглощается или выделяется практически мгновенно. В общем случае для распознавания природы поглощения газа основываются на форме кривых зависимости количества выделившегося газа от времени при изотермическом обезгаживании. Если газовыделение обусловлено в основном диффузией газа из объема твердого материала, то скорость выделения газа приблизительно пропорциональна  $t^{-1/2}$ , (где  $t$  – время обезгаживания). Скорость выделения хемосорбированного газа пропорциональна  $t^{-1}$ , а образующегося при поверхностной термической диссоциации –  $t^{-2}$ .

Количество физически адсорбированного газа считают эквивалентным мономолекулярному слою:  $(0,3 - 0,5) \cdot 10^{-2}$  Па/см<sup>2</sup>. Этот газ удаляется за 2 – 3 мин. при нагреве до 200 – 300 °С. Величина истинной поверхности, участвующей в физической адсорбции, может в сотни раз превышать геометрическую поверхность твердого тела.

Повышение температуры отжига всегда ускоряет обезгаживание металлов и улучшает очистку поверхности. Однако при выборе температуры обезгаживания следует учитывать и возможность нежелательных структурных изменений металлов, приводящих к рекристаллизации и к снижению прочности, нарушению формоустойчивости деталей. Температура обезгаживания должна быть, по возможности, более высокой, по крайней мере, выше рабочей температуры дета-

лей в приборах. Эта температура ограничивается иногда испарением материала (испарение считается заметным, если давление паров над металлом превышает 1000 Па). Максимальные температуры обезгаживания для наиболее распространенных металлов следующие: для вольфрама 1800 °С, для молибдена 950 °С, для меди 500 °С, для никеля 750 – 950 °С, для железа 1000 °С.

Известны следующие способы нагрева материалов при обезгаживании:

- в электрических и газовых печах;
- за счет непосредственного пропускания электрического тока через деталь;
- токами высокой частоты;
- путем бомбардировки деталей положительными ионами или электронами в вакууме (в последнем случае возможно разрушение химических соединений, находящихся на поверхности).

Методом прогрева в печи возможно обезгаживание всего прибора целиком. При этом происходит обезгаживание вспомогательных металлических деталей, которые в готовом приборе при его работе не нагреваются до высокой температуры.

Прогрев или прокаливание непосредственным пропусканием электрического тока удобно применять к деталям, которые используются как нагревательные элементы в готовом изделии (например, катоды, нити накаливания и т.п.). В частности, режим прокаливания катода для его обезгаживания всегда должен удовлетворять также и требованиям его температурной обработки для получения надлежащих эмиссионных свойств. Во всяком случае в процессе откачки катод должен хотя бы некоторое время выдерживаться при температуре более высокой по сравнению с его рабочей температурой.

Прокаливанию токами высокой частоты в процессе откачки подвергаются наиболее ответственные металлические

детали электровакуумного прибора. При этом катушка (индуктор), по которой течет ток высокой частоты, располагается снаружи (в воздушной атмосфере), а нагреваемая металлическая деталь - внутри вакуумной системы (обычно стеклянной). В детали, расположенной внутри катушки, наводятся токи Фуко, за счет их протекания происходит разогревание.

При прокаливании электронной бомбардировкой используется кинетическая энергия электронов, эмитируемых накалившимся катодом и устремляющихся под действием электрического поля к положительно заряженному (по отношению к катоду) электроду. При достижении электронами поверхности положительного электрода их кинетическая энергия превращается в теплоту, которая и повышает температуру электрода. Очевидно, температура прокаливания, достигаемая методом электронной бомбардировки, тем выше, чем выше положительный потенциал прокаливаемого электрода и чем больше электронный ток катода. Электронная бомбардировка является единственным эффективным методом обезгаживания внутренних электродов (например, сеток).

При пользовании методом электронной бомбардировки необходимо соблюдать такой режим, чтобы насос успевал откачивать выделяющиеся газы, иначе давление в приборе может возрасти до величины, достаточной для образования дугового разряда через газы (между катодом и прокаливаемым электродом); даже, если нет опасности возникновения дуги, то все же нельзя допускать такого повышения давления, при котором может происходить заметная ионная бомбардировка катода, приводящая к его распылению или к снижению эмиссии.

При использовании данных методов обезгаживания необходимо придерживаться следующих общих правил:

– температуру прокаливаемой детали повышать постепенно;

– максимальную температуру прокаливания устанавливать, по возможности, более высокой, учитывая свойства данного металла в отношении скорости испарения и точки плавления, а также близость к стеклу;

– при прокаливании делать кратковременные перерывы для удаления выделяющихся газов, которые не только опасны с точки зрения возникновения дугового разряда в откачиваемом приборе, но и сильно снижают скорость обезгаживания.

При обезгаживании методом ионной бомбардировки в откачанный до высокого вакуума прибор впускается некоторое количество газа, не действующего химически на нагретый катод и являющегося для ионной бомбардировки достаточно удовлетворительным; например, можно пользоваться смесью водорода с аргоном при давлении 1000 Па. В атмосфере впущенного в откачанный прибор газа возбуждается разряд, и образующимися при этом ионами газа, ударяющимися под действием электрического поля об электроды прибора, последние доводятся до высокой температуры. Получающийся при соприкосновении с нагретым катодом активный (одноатомный) водород является весьма эффективным восстановителем и, воздействуя на нагретые ионной бомбардировкой электроды, очищает их поверхность от окислов. Ударами ионов выбиваются также молекулы других газов, адсорбированные на поверхности бомбардируемых электродов и со стенок стекла.

Использованные для ионной бомбардировки газы удаляются насосом: при этом необходимо иметь в виду, что если для ионной бомбардировки были использованы только инертные газы, то они почти не адсорбируются электродами при ионной бомбардировке; водород же может оказаться сам поглощенным в некотором количестве; поэтому при откачке прибора после ионной бомбардировки необходимо подвергать электроды некоторому дополнительному прокаливанию, но уже в вакууме.

Способ обезгаживания ионной бомбардировкой применяется при откачке больших электровакуумных приборов (мощных генераторных ламп, рентгеновских трубок и т.п.), в которых для электронной бомбардировки необходимо прикладывать к электродам весьма высокие напряжения; ионная же бомбардировка требует сравнительно низких напряжений.

## Расчетная часть

### Задание

Рассчитать суммарный газовый поток печи отжига изделий из меди, молибдена, кобальта, никеля после 1 ч. отжига. Рабочая камера печи отжига включает водоохлаждаемый колпак из нержавеющей стали площадью  $A_1$ , медные водоохлаждаемые электроды площадью  $A_2$ , нижнюю водоохлаждаемую плитку площадью  $A_3$ ; резиновый уплотнитель площадью  $A_4$  толщиной 1 см; вес изделия  $m$  кг; температура отжига  $T$ ; время отжига 4 ч.

### Методика расчета суммарного газового потока

В общем случае суммарный газовый поток определяют четыре потока газов, поступающих в вакуумную систему:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{изд}} + Q_{\text{ст}} + Q_{\text{нат}} + Q_{\text{прон}} = P_{\text{пред}} \cdot S_0, \quad (3.2)$$

где  $Q_{\text{изд}}$  – поток газов, поступающих из обрабатываемых изделий;  $Q_{\text{ст}}$  – поток газов, выделяющийся со всех стенок, обращенных в вакуумную плоскость;  $Q_{\text{нат}}$  – поток газов, натекающих в вакуумную систему через неплотности;  $Q_{\text{прон}}$  – поток газов, поступающих в вакуумную систему за счет проницаемости;  $P_{\text{пред}}$  – предельное давление в рабочей камере;  $S_0$  – эффективная быстрота откачки вакуумного объема при давлении  $P_{\text{пред}}$ .

Поток газов  $Q_{\text{изд}}$  можно определить по формуле

$$Q_{\text{изд}} = \frac{m \cdot q_{\text{изд}}}{t} \cdot n \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (3.3)$$

где  $m$  – масса обрабатываемых изделий, кг;  $q_{\text{изд}}$  – удельное газовыделение из материала обрабатываемых изделий при данной температуре,  $(\text{м}^3 \text{Па})/\text{кг}$  (значения величины удельного газовыделения  $q_{\text{изд}}$  для материалов при различных температурах являются справочными данными);  $n$  – коэффициент, учитывающий неравномерность процесса газовыделения, обычно  $n = 1,5 - 3$ .

Поток газов  $Q_{\text{ст}}$  суммируется из потоков газов, выделяющихся со всех стенок вакуумной системы, обращенных в вакуумную полость, и определяется как

$$Q_{\text{ст}} = \sum g_{\text{газ}}^i \cdot A_i \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (3.4)$$

где  $g_{\text{газ}}^i$  – скорость удельного газовыделения с поверхности стенки вакуумной системы после 1 ч отжига,  $(\text{м}^3 \text{Па})/(\text{м}^2 \text{с})$ ;  $A_i$  – площадь поверхности стенок, обращенных в вакуумную полость, изготовленных из разных материалов.

Поток газов  $Q_{\text{нат}}$ , натекающих в вакуумную систему через соединения, обычно берется или по характеристикам элементов вакуумной системы, или равным чувствительности течеискателя, умноженной на число мест, которые могут быть источниками натекания

$$Q_{\text{нат}} = q_{\text{теч}} \cdot n \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (3.5)$$

где  $q_{\text{теч}}$  – чувствительность течеискателя или минимально обнаруживаемый поток пробного вещества;  $n$  – число источников натекания.

Поток газов  $Q_{\text{прон}}$  суммируется из потока газов  $Q_{\text{прон}}^{\text{рез}}$ , протекающего в вакуумную камеру через резиновые уплотнители, и потока газов, протекающих через стенки нагреваемых элементов, отделяющих вакуумную систему от атмосферы (например, стакан для термопары):

$$Q_{\text{прон}} = \sum_i Q_{\text{прон,с}}^{\text{рез}} + \sum_i Q_{\text{прон,и}}^{\text{ст}} \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right]; \quad (3.6)$$

$$Q_{\text{прон,и}} = q_{\text{прон,и}} P_i^{1/k} \frac{A}{d} \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (3.7)$$

где  $q_{\text{прон,и}}$  – удельный поток проницаемости данного газа,  $(\text{м}^3 \text{Па})/(\text{м}^3 \text{с})$ ;  $A$  – площадь стенки,  $\text{м}^2$ ;  $d$  – толщина стенки,  $\text{м}$ ;  $P_i$  – парциальное давление  $i$ -го газа ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ , ...).

### Контрольные вопросы

1. Методика расчета суммарного газового потока.
2. Как зависит проницаемость газов от давления?
3. Система «вакуум в вакууме».



## 4. СОРБЦИОННЫЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

### Принцип действия и классификация сорбционных средств откачки

Принцип действия электрофизических средств откачки основан на протекании физико-химических процессов при взаимодействии частиц газа с сорбирующей поверхностью, которая представляет собой постоянно обновляемый слой активного вещества - геттера (рис. 1).

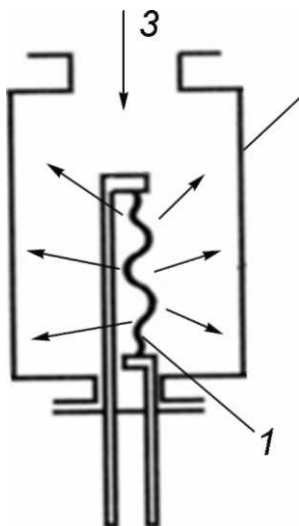


Рис. 4.1. Схема геттерного насоса: 1 – испаритель (источник геттерного материала); 2 – сорбирующая поверхность; 3 – откачиваемый газ

По виду взаимодействия откачиваемых газов с сорбирующей поверхностью различают следующие основные процессы поглощения газов: сорбция, ионная откачка и «замуровывание».

**Сорбция** – поглощение атомов и/или молекул газа в результате образования слабой физической или сильной химической связи и твердых растворов с последующей диффузией продуктов. Физически адсорбируются только атомы инертных газов, основным механизмом при откачке активных газов является образование химических соединений (оксидов, нитридов и др.), которые имеют весьма низкие давления паров и диссоциируют при очень высоких температурах.

**Ионная откачка** – поглощение ионизованных атомов и/или молекул газа в результате внедрения ионов, ускоренных электрическим полем в материал отрицательно заряженных электродов с последующей диффузией.

Ионы химически активных газов могут образовывать химические соединения, а ионы инертных газов удерживаются в кристаллической решетке физическими связями, при этом энергия связи ионов с поверхностью близка к энергии связи молекул при хемосорбции.

**Замуровывание** – это образование над адсорбированными частицами газа новой пленки геттера, предотвращающей их дальнейшую десорбцию. Данный механизм играет существенную роль при откачке инертных газов, хотя и не оказывает влияния на общую быстроту откачки насоса. При нормальной температуре время адсорбции невозбужденных атомов инертного газа на сорбирующих поверхностях слишком мало, чтобы этот механизм откачки мог быть заметным. Поэтому для повышения эффективности необходимо либо охлаждение поверхности, либо ионизация (возбуждение) откачиваемых атомов. Падающие на поверхность ионы и возбужденные атомы пребывают на поверхности сорбции значительно большее время – достаточное для замуровывания слоями распыляемого геттера.

По методу нанесения геттерных покрытий различают испарительные геттерные, ионно-геттерные, магнитные электроразрядные и комбинированные насосы.

## Испарительные геттерные насосы

В основе принципа действия испарительных геттерных насосов лежат два процесса поглощения газов: сорбция и замуровывание.

Чтобы откачивающее действие пленок геттеров было эффективным, коэффициент прилипания газа на сорбирующей поверхности должен быть близок к единице, а время пребывания молекул газа на поверхности сорбции – по возможности продолжительным. Эти условия выполняются при использовании материалов с большой энергией химической связи, а также при снижении температуры сорбирующей поверхности.

В качестве геттеров обычно используют пленки титана, циркония, тантала, бария, молибдена и других химических активных веществ.

Основным фактором при выборе геттерного материала является сорбционная активность его паров и пленок. Один из физических показателей этой активности – теплота сорбции  $E$ , определяющая прочность связи адсорбированных частиц. Значения теплоты сорбции газов на пленках титана приведены в таблице 1. Вследствие малой теплоты сорбции инертных газов, характерной для геттеров, эффективная откачка этих газов испарительными насосами невозможна.

Таблица 4.1

Газ	H <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Ar	Kr	Xe
E, кДж/моль	19,3	419	356	813	461	8,38	16,8	33,5

Кроме высокой сорбционной активности, к геттерам предъявляют ряд других требований. Геттер должен легко испаряться при температуре не слишком высокой, чтобы не ис-

парялись другие материалы вакуумной системы, но и не слишком низкой, чтобы можно было проводить обезгаживание системы. Геттер должен иметь низкое давление паров и должен быть активным в широком интервале температур. Образующиеся химические соединения должны быть устойчивы, чтобы поглощенный при температуре окружающей среды газ не выделялся во время работы насоса.

Инертные газы и углеводороды геттерными пленками практически не поглощаются, их удаляют с помощью вспомогательных средств откачки. При этом не удастся полностью освободиться от углеводородов, так как они (например,  $\text{CH}_4$ ) синтезируются на поверхности пленки, играющей роль катализатора. Присутствие углеводородов в составе остаточных газов не позволяет получить остаточное давление ниже  $10^{-7}$  -  $10^{-9}$  Па.

Сорбционные характеристики геттерных пленок сильно зависят от температуры и условий образования. В испарительных геттерных насосах титан, как наиболее распространенный геттерный материал, нагревается до  $1100 - 1400$  °С в зависимости от требуемой скорости испарения и типа испарителя. Различают насосы с твердофазными испарителями, где распыление геттера осуществляется методом сублимации при температуре значительно ниже температуры плавления геттера, и насосы с жидкофазными испарителями, в которых геттерный материал нагревается выше температуры плавления. В обоих случаях распыление геттера может осуществляться по средством:

- омического нагрева твердого распыляемого материала;
- излучения накаливаемой вольфрамовой спирали;
- электронной бомбардировки;
- дугового разряда (только для жидкофазных испарителей).

Метод сублимации является наиболее распространенным, как контролируется проще, чем испарение из жидкой фазы.

Испаритель геттерного металла является основным элементом геттерных насосов. Для оценки испарителей используются следующие характеристики:

- энергетическая эффективность (подводимая к испарителю мощность на единицу скорости испарения геттера);
- коэффициент использования геттера (отношение массы испаренного геттера к моменту выхода испарителя из строя к его начальной массе);
- скорость испарения геттера и диапазон ее регулирования;
- предельно допустимое давление газовой среды при включении испарителя.

Простейший прямонакальный испаритель такого типа представляет собой отрезок («шпильку») биметаллической проволоки с молибденовым керном (сердечником) диаметром  $d = 0,3 - 2$  мм, на который осажден слой титана толщиной  $5 = 0,5d$  (рабочий ток испарителей до 200 А, температура геттера – до 1150 °С). В геттерных насосах устанавливается от одной до шести таких прямых или U-образных шпилек, содержащих от 1 до 17 г распыляемого титана. Скорость испарения регулируется подводимой мощностью; максимальный ресурс одной шпильки 600 ч.

Прямонакальные испарители отличаются предельной простотой конструкции и схемы электропитания. Их недостатки – ограниченный ресурс и относительно малый коэффициент использования геттера.

Несколько больший коэффициент использования геттера имеют испарители косвенного накала. Такой испаритель выполняется в виде сферической Т оболочки диаметром порядка 30 мм, во внутренней полости которой установлен проволочный вольфрамовый нагреватель. Скорость испарения Ti варь-

ируется от 310 до 0,15 мг/с (начальная масса титана 35 г, максимальная потребляемая мощность 750 Вт). Толщина оболочки обычно не превышает 5 мм, что лимитирует общую массу геттера и ресурс испарителя. Коэффициент использования геттера ограничен местными прогарамии оболочки.

Максимальное давление газа при включении титановых испарителей рассматриваемых типов не должно превышать  $10^{-2}$  Па. При более высоких давлениях на поверхности испарителя образуются слои химических соединений титана с откачиваемыми газами, резко снижающие скорость испарения и ухудшающие сорбционные характеристики насоса.

При создании высокопроизводительных геттерных насосов преимущественное применение получили электронно-лучевые и дуговые испарители титана.

Электронно-лучевой испаритель представляет собой электронную пушку с вольфрамовым катодом и испаряемую мишень-анод, помещенные в поперечное магнитное поле (рис. 2).

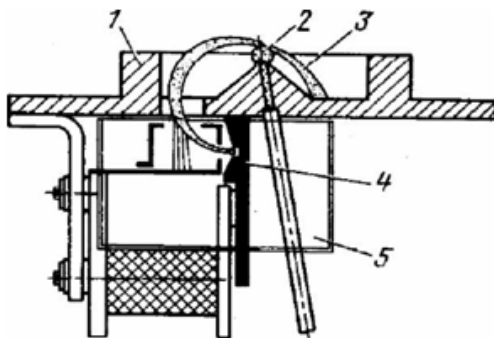


Рис. 4.2. Схема электронно-лучевого испарителя проволоочно-титана: 1 – тигель испарителя; 2 – испаряемый металл; 3 – электронный луч; 4 – электронная пушка; 5 – магнитная система

Между пушкой и мишенью приложено ускоряющее напряжение в несколько киловольт. В зависимости от размера мишени и мощности электронного пучка максимальная скорость испарения титана может достигать порядка 25 мг/с. Наличие поперечного магнитного поля, поворачивающего пучок электронов примерно на  $270^\circ$ , позволяет разместить электронную пушку вне зоны распыления титана.

В дуговых испарителях (рис. 3) источником распыляемого геттера служит катодное пятно дуги постоянного тока. Плотность тока в пятне достигает  $10^6 - 10^7$  А/см<sup>2</sup>. Дуга горит в парах испаряемого титана, что позволяет поддерживать ее горение вплоть до давлений  $10^{-7}$  Па. Катодное пятно хаотично перемещается по поверхности испарения охлаждаемого водой катода, вследствие чего титан испаряется равномерно, и катод имеет сравнительно низкую температуру. Возбуждение дуги производится кратковременным замыканием катода с анодом (стенками насоса) подвижным молибденовым электродом или другим способом.

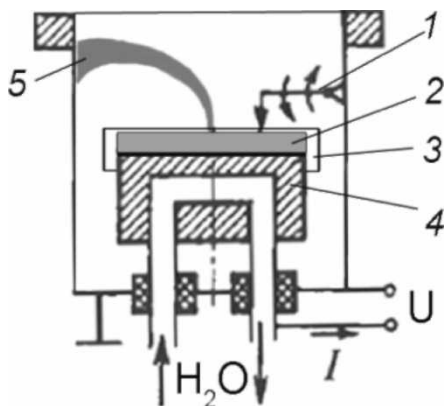


Рис. 4.3. Конструкция дугового испарителя: 1 – подвижный молибденовый электрод; 2 – испаряемый геттерный материал; 3 – экран; 4 – медная подложка, 5 – дуга

Конструктивно катод представляет собой экранированный диск из титана, лежащий на изолированной от корпуса и охлаждаемой водой медной подложке. Экран изолирован от катода и корпуса насоса (находится под нулевым потенциалом). Он служит для предотвращения попадания катодного пятна на боковые поверхности титанового диска.

Давление запуска насоса не должно превышать 50 Па, иначе возможно образование неподвижных анодных пятен, способных проплавить стенку насоса.

Во время работы дугового испарителя в откачиваемой камере могут наблюдаться значительные (более чем на порядок) колебания давления. Это связано с тем, что откачиваемые за счет диссоциации в дуговом разряде углеводороды адсорбируются на поверхности пленки титана и в дальнейшем за счет его каталитических свойств образуют молекулы  $\text{CH}_4$ . Поскольку дуговой разряд является источником теплового и УФ излучения образованные молекулы  $\text{CH}_4$  десорбируются обратно в газовую среду, тем самым, повышая давление в камере.

Таким образом, дуговые геттерные насосы рекомендуются эксплуатировать в режиме циклического включения испарителей. В промежутках между распылением остаточное давление достигает значений 1000 Па.

Из-за ограничения минимальной величины скорости испарения дуговые испарители целесообразно использовать в вакуумных системах с большими газовыми нагрузками.

В процессе эксплуатации геттерных насосов необходима периодическая чистка корпуса насоса от пленок титана. Необходимая периодичность чистки определяется режимом работы насоса, рабочим давлением, количеством напусков атмосферного воздуха и т.д. Рекомендуется чистить насос после испарения трех-четырёх блоков испарителей.

Наиболее частым видом отказа геттерного насоса является замыкание электродной системы по изоляторам в резуль-



тате запыления их титаном. Частота отказов выше, если насос в основном работает при высоких впускных давлениях.

К недостаткам этих насосов, препятствующим их применению в качестве основных насосов для получения сверхвысокого вакуума, остается трудность обеспечения максимальной активации поглотителей, а также плохая воспроизводимость скорости откачки. Кроме того, насосы этого типа не способны откачать инертные газы и углеводороды.

### **Испарительные ионно-геттерные насосы**

Эффект ионного откачивания газов определяется, главным образом, следующими причинами:

– ионизованные молекулы активных газов, таких, как  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$  и  $CO_2$  обладают значительно более высокой химической активностью по сравнению с нейтральными молекулами (*сорбция*);

– ионы, ускоряясь в электрическом поле, приобретают значительную кинетическую энергию и вследствие этого могут проникать вглубь поверхности, об которую они ударяются (*ионная откачка*);

– при бомбардировке ионами катода, выполненного из геттерного материала, происходит его распыление. Образующиеся при этом частицы геттера при столкновении с молекулами газа могут их захватывать, обеспечивая, тем самым, дополнительное откачивание газа.

Таким образом, в ионно-геттерном насосе необходимо обеспечить, в первую очередь, эффективную ионизацию молекул газа. Простейшим способом ионизации газа является столкновение атома (молекулы) газа с электроном, обладающим энергией достаточной для отрыва еще одного электрона.

При высоких давлениях, например, атмосферном, длина свободного пробега электронов мала, и, следовательно, для ионизации газа требуется высокая напряженность электриче-

ского поля. При таких давлениях основным механизмом гибели ионов является их рекомбинация в газовой фазе, и откачивающий эффект будет незначительным.

По мере уменьшения давления длина свободного пробега электронов увеличивается, соответственно уменьшается напряженность, необходимая для ионизации. При давлениях около 1 Па возникает значительный ионизационный ток, а рекомбинация ионов происходит, главным образом, на поверхности, обеспечивая эффективное связывание газа.

При более низких давлениях длина свободного пробега электронов становится больше размеров вакуумной камеры и вероятность ионизационного столкновения электрона с молекулой газа существенно уменьшается. В этом случае для ионизации нужны поля с высокой напряженностью, а токи получаются слабыми.

Таким образом, для ионной откачки необходимо обеспечить высокую степень ионизации газа при низких давлениях, не прибегая при этом к слишком высоким напряжениям.

Известны два метода эффективной ионизации газа при низких давлениях: создание большого числа свободных электронов и увеличение пути ионизации.

Рассмотрим конструкцию и принцип работы испарительного ионно-геттерного насоса орбитронного типа (рис. 4). Увеличение эффективности ионизации в этом насосе достигается увеличением длины пробега электронов в радиальном электростатическом поле. Электроны эмитируются одним (3) или несколькими прямонакальными вольфрамовыми катодами. Наличие экрана (6) позволяет электронам миновать центральный стержневой анод (1). Положение и форма катода подобраны так, что осевая и радиальная симметрия электрического поля системы нарушена. Небольшое положительное напряжение смещения на катоде (около 10 В) предотвращает попадание электронов на стенку насоса (2) и экранирующую сетку.

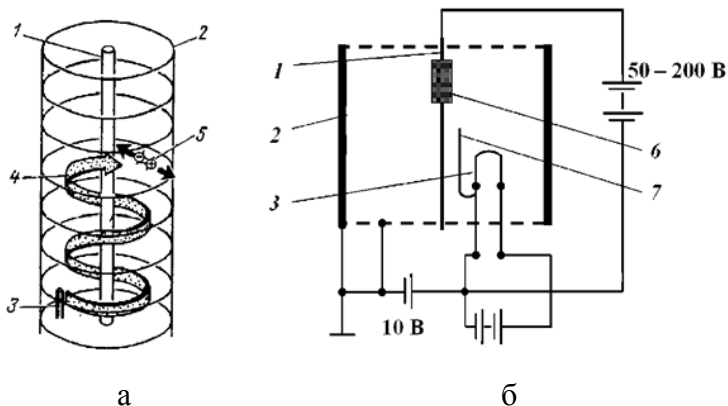


Рис. 4.4. Движение электронов (а) и схема испарительного ионно-геттерного насоса орбитронного типа (б):

1 – стержневой анод; 2 – коллектор ионов (стенка корпуса насоса); 3 – катод; 4 – траектория электронов; 5 – акт ионизации; 6 – геттер; 7 – экранирующая пластина

Поэтому электроны двигаются по спиральным орбитам (4) со скоростью, имеющей осевую, радиальную и тангенциальную составляющие, до тех пор, пока не ударятся о центральный стержень (1), приводя к нагреву и распылению титанового геттера. Так как попадание электронов на центральный стержень, имеющий малое поперечное сечение, затруднено, электроны движутся по орбитам достаточно долго, вследствие чего эффективность ионизации газа резко возрастает. Образовавшиеся ионы, ускоренные электрическим полем, попадают на коллектор в слой с напыляемым титаном, где происходит их химическое связывание с геттером, или же внедряются вглубь этого слоя и «замуровываются» вновь напыляемыми слоями.

Недостатки насосов этого типа – наличие накаливаемых частей с ограниченным сроком службы, небольшой запас геттера и отсутствие саморегулирования скорости испарения.

## Магнитные электроразрядные насосы

Откачка газов магниторазрядным насосом является результатом двух основных механизмов поглощения. Один из них – сорбция газов распыленным геттером; второй – ионное внедрение в катоды и пленки распыленного катодного материала (геттера).

Распыление геттерного материала в магнитных электроразрядных насосах происходит под действием ионов откачиваемого газа, бомбардирующих катодные пластины (рис. 5).

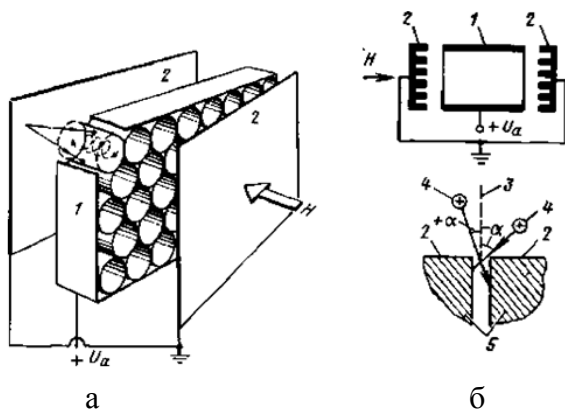


Рис. 4.5. Схемы диодного магниторазрядного насоса:  
*а* – с плоскими; *б* – с ребристыми катодами; 1 – анод;  
2 – катод; 3 – ось ячейки; 4 – ион; 5 – стенки щели

Ионизация газовых молекул осуществляется при взаимодействии нейтрального газа с плазмой пеннинговского разряда в полости анодных ячеек. Анодные ячейки могут иметь в сечении круглую, квадратную, прямоугольную или правильную многоугольную форму. Число ячеек в мощных насосах достигает несколько тысяч, магнитное поле в них перпендикулярно плоскости катодов.

Зажигание разряда происходит при подаче постоянного напряжения в несколько киловольт между анодом и катодами. Свободные электроны, всегда имеющиеся в разрядном промежутке, начинают совершать сложное колебательное движение между катодами, вызывая возбуждение и ионизацию газовых атомов или молекул, и появление вторичных электронов. В результате этого процесса в полости анодных ячеек формируется стабильный пространственный заряд с электронной концентрацией  $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , поддерживающий самостоятельный газовый разряд вплоть до давления  $10^{-9}$  Па.

Образовавшиеся в результате ионизации газа положительные ионы ускорятся аксиальным электрическим полем и бомбардируют катоды, вызывая их интенсивное распыление. В среднем один падающий ион выбивает один атом титана. Поскольку основная часть распыляемых частиц титана представляет собой электрически нейтральные атомы и молекулы, они осаждаются на все поверхности электродов, но, главным образом, на анод. Активные газы, попадая на непрерывно возобновляемую пленку титана, хемосорбируются ею. Катоды также поглощают газы, но из-за постоянного распыления большей части их поверхности вклад катодов в процесс откачки активных газов незначителен. Следует отметить, что скорость распыления геттера будет пропорциональна току разряда, который в свою очередь пропорционален давлению откачиваемого газа. Таким образом, магнитоэлектрические насосы обладают эффектом саморегулирования скорости распыления геттера, что делает их ресурс при малых газовых нагрузках практически не ограниченным.

Поскольку коэффициент распыления катодных материалов сильно зависит от массы падающих ионов, и откачиваемые газы имеют различную химическую активность, магнитоэлектрические насосы обладают значительной селективностью (табл. 2).

Большинство атмосферных газов химически активны ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ) и за исключением  $H_2$  откачиваются путем хемосорбции, образуя термически устойчивые оксиды, нитриды и карбиды титана.

Поэтому поглощение этих газов в насосе имеет необратимый характер. Молекулы газа, не взаимодействующие с титаном (углеводороды, пары воды, тяжелые сложные молекулы) в разряде диссоциируют на более простые компоненты, которые в свою очередь, ионизируются и откачиваются. Образующиеся при диссоциации отрицательные ионы идут непосредственно на анод. Тяжелые многокомпонентные ионы распадаются также при ударе о поверхность катодов.

Таблица 4.2

Относительные значения быстроты действия диодных магниторазрядных насосов с титановыми катодами при откачке различных газов

Газ	Быстрота действия, %	Газ	Быстрота действия, %
Водород	270 – 300	Азот	98 – 100
Метан	270	СО	85 – 100
Дейтерий	190 – 210	СО <sub>2</sub>	82 – 100
Аммиак	170	Кислород	55 – 57
Легкие углеводороды	90 – 160	Гелий	10 – 11
Пары воды	100 – 130	Неон	4
Этиловый эфир	135	Аргон, криптон	1 – 2
Сухой воздух*	100	Ксенон	1

Примечание: \* при точке росы ниже 228 К.

Углерод, образующийся при диссоциации сложных молекул, отлагается на внутренних поверхностях насоса. На катоде атомы углерода образуют карбид титана, имеющий низкий коэффициент распыления. Этим объясняется уменьшение

быстроты действия магниторазрядных насосов при попадании паров масла или продуктов его разложения. Особенно опасно осаждение свободного углерода на поверхности изоляторов, приводящее к омическому разогреву изоляторов, пробою и, в конечном итоге, выходу насоса из строя.

Откачка водорода магниторазрядными насосами имеет существенные особенности. Его поглощение обусловлено двумя процессами: растворением нейтральных молекул  $H_2$  титановыми катодами и внедрением ионов  $H^+$  в тело катода с последующей диффузией вглубь. Распыление титана ионами водорода весьма незначительно (коэффициент распыления для ионов  $H^+$  с энергией 7 кэВ составляет всего 10, что на два порядка меньше, чем для ионов аргона). Это обстоятельство весьма уменьшает скорость образования свежих пленок распыленного титана при работе насосов в атмосфере чистого водорода, в результате чего поверхностный слой катодов слабо очищается и оказывается насыщенным атомами примесей и загрязнений, внесенных при изготовлении, а также «замурованными» атомами инертных газов.

Инертные газы не сорбируются и не растворяются в геттерном материале. Они могут удерживаться на поверхности только очень слабыми силами Ван-дер-Ваальсова взаимодействия. Так как основная часть атомов инертных газов после отражения и нейтрализации на катодах падает на анод, где замуровывается пленками геттера, то для устойчивого удержания на поверхности анода эти атомы должны иметь относительно высокую энергию. Поэтому для интенсификации их откачки необходимо, чтобы бомбардирующие катод ионы отражались от них с сохранением большей доли своей начальной энергии.

Часть первичных ионов внедряется также в поверхность катодов; в дальнейшем, однако, вследствие распыления катодов возможна их реэмиссия. Поскольку интенсивное распыление катодов напротив анодной ячейки охватывает только их

центральную область, а примерно 10-20% их поверхности вообще не затрагивается процессом распыления, доля необратимо поглощенных катодами атомов инертных газов определяется именно этой поверхностью.

При длительной откачке аргона в системах с магнито-разрядными насосами возникают периодические колебания давления (так называемая «аргонная нестабильность»), в такт которым изменяется и разрядный ток. Эти колебания возникают вследствие реэмиссии внедренных атомов аргона. Аргонная нестабильность часто возникает и при длительной (несколько сотен часов) откачке воздуха при давлении  $10^{-5}$  Па.

Длительность старта (запуска) магниторазрядных насосов зависит от степени чистоты внутренних поверхностей откачиваемого сосуда и насоса, а также от степени предварительного разрежения.

Неохлаждаемый магниторазрядный насос может запускаться с давлений не более 10 Па, но в таком случае длительность старта может превышать 3 ч.

В момент старта насоса при высоком давлении запуска, возникающий тлеющий разряд может выходить за пределы разрядных ячеек, захватывая даже область присоединительного патрубка насоса. В этом случае при выключении средств предварительной откачки с откачиваемым сосудом и магниторазрядным насосом и включении насоса вместо понижения давления будет наблюдаться его повышение в результате повышенного газовыделения внутренних поверхностей насоса и присоединительного патрубка. Если нет возможности создать лучшее предварительное разрежение, запуск насоса производят, не прекращая предварительной откачки. Средства предварительной откачки отсоединяют от откачиваемого сосуда и насоса после того, как стабильно начнет понижаться давление.

Достижимое с помощью магниторазрядных насосов предельное остаточное давление зависит от предыстории насоса, суммарной наработки, режимов работы и рода откачки-



ваемого газа. На предельное остаточное давление, так же как и на длительность старта, сильное влияние оказывает загрязнение насоса углеводородами. Например, создание предварительного разрежения с помощью механических насосов с масляным уплотнением повышает предельное остаточное давление в 5 – 10 раз.

С течением времени (если принудительно не обезгазить насос) происходит самовосстановление насоса в результате разложения тяжелых углеводородов в разряде с последующей откачкой образующихся легких углеводородов. Но это достаточно длительный процесс.

Главным преимуществом электроразрядных насосов является получение с их помощью вакуума, свободного от загрязняющих примесей органических веществ. Следовательно, не возникает необходимость использовать с этими насосами охлаждаемые ловушки или отражатели, что, в свою очередь, позволяет полностью реализовать собственную скорость откачки насоса, а также открывает возможность размещения насоса непосредственно в вакуумной камере.

Для большинства электроразрядных насосов требуется только источник электропитания, который не нуждается в специальном обслуживании и средствах защиты. По току разряда в насосе можно оценивать давление в системе, и при незначительном изменении схемы блока питания насос можно использовать в качестве течеискателя.

К недостаткам электроразрядных насосов следует отнести их ограниченную газовую емкость, низкую скорость откачки инертных газов, а также наличие сильных магнитных полей, присутствие которых в некоторых случаях недопустимо.

## Комбинированные насосы

Комбинированные насосы представляют собой совокупность нескольких откачных средств, размещенных в одном корпусе: адсорбционного и испарительного геттерного насосов, испарительного геттерного и электроразрядного насосов и др. Целесообразность подобных комбинаций определяется тем, что геттерные насосы эффективно откачивают химически активные газы, но непригодны для откачки инертных газов (даже в смеси с активными) и углеводородов. Магниторазрядные насосы, напротив, неприменимы для откачки больших количеств активных газов, но эффективны при откачке инертных газов и углеводородов.

### Расчетная часть

#### Задание

По заданному предельному давлению в вакуумной камере  $P_{\text{пред}}$  и суммарному потоку газов, поступающих в вакуумную камеру, определить:

1. Тип и размер основного насоса.
2. Тип и размер вспомогательного насоса.

#### Методика расчета

1. Выбор типа основного насоса, исходя из заданного предельного давления. Например, если  $P_{\text{пред}} = 10^{-3} - 10^{-4}$  Па, то в качестве основного насоса выбирается пароструйный диффузионный насос.

2. Определение эффективной быстроты откачки камеры  $S_0$  для заданного предельного давления  $P_{\text{пред}}$  и рассчитанного суммарного газового потока

$$S_0 = \frac{Q_{\Sigma}}{P_{\text{пред}}}; \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.1)$$

3. Определение скорости откачки основного насоса. Быстрота действия насоса при проектном расчете выбирается из условия обеспечения рабочего давления в установленном режиме работы вакуумной системы:

$$S_H^{\text{осн}} = kS_0^{\text{осн}}, \quad (4.2)$$

где  $k$  – коэффициент использования насосов.

Для пароструйных и криогенных насосов  $k = 2$ , для сорбционных насосов  $k=4$ , для механических –  $k = 1,2$ .

При проектировании вакуумных установок с диффузионным насосом желательно, чтобы пропускная способность трубопровода  $U$ , соединяющего объект с пароструйным насосом, была равно скорости откачки насоса, т.е.  $U = S_H$ ,

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U}. \quad (4.3)$$

По техническим характеристикам насоса и рассчитанному значению  $S_{H, \text{расч}}^{\text{осн}}$  выбираем размер основного насоса. Выписываем основные технические характеристики выбранного насоса:  $P_{\text{пред}}$ ,  $P_{\text{нач}}$ ,  $P_{\text{вин}}$ ,  $P_{\text{зад}}^{\text{max}}$ ,  $P_{\text{зад}}^{\text{min}}$ ,  $S_H$ .

Быстрота действия выбранного насоса  $S_H^{\text{осн}} \geq S_{H, \text{расч}}^{\text{осн}}$ , а предельное давление насоса должно быть равно или меньше заданного в условии  $P_{\text{пред}}$  проектируемой установки.

4. Определение необходимости и типа вспомогательного насоса по техническим характеристикам основного насоса  $P_{\text{нач}}$ ,  $P_{\text{вып}}$ . Так, для пароструйных насосов  $P_{\text{нач}}$ ,  $P_{\text{вып}} < P_{\text{атм}}$ , т.е. требуется предварительное разрежение вакуумной камеры и на выпуске пароструйного насоса. Тип вспомогательного насоса выбирается из условия

$$P_{\text{прод}}^{\text{всп}} \leq P_{\text{нач}}^{\text{осн}}, P_{\text{вып}}^{\text{осн}}. \quad (4.4)$$

Очевидно, что для создания предварительного разрежения в пароструйных и сорбционных насосах используются механические или адсорбционные насосы.

Расчет параметров вспомогательного насоса основан на том, что максимальный поток откачиваемых газов должен быть одинаков для основного и вспомогательного насосов, соединенных последовательно, т.е.

$$Q_{\text{max}} = S_{\text{н}}^{\text{осн}} P_1^{\text{осн}} = S_{\text{н}}^{\text{всп}} P_2, \quad (4.5)$$

где  $S_{\text{н}}^{\text{осн}}$  и  $S_{\text{н}}^{\text{всп}}$  – эффективная быстрота откачки вспомогательного и основного насосов при давлении на входе в насосы  $P_1$  и  $P_2$  соответственно.

$$S_{\text{н}}^{\text{всп}} = \frac{Q_{\text{max}}}{P_2}, \quad (4.6)$$

Давление на входе во вспомогательном насосе выбирается из условия

$$P_2 = (0,7 - 0,75) P_{\text{вып}}^{\text{осн}}, \quad (4.7)$$

где  $P_{\text{вып}}^{\text{осн}}$  – выпускное давление основного насоса;  $Q_{\text{max}}$  – максимальный поток газа, который может быть удален основным насосом,

$$Q_{\text{max}} = P_{\text{раб, max}}^{\text{осн}} S_{\text{н}}^{\text{осн}}, \quad (4.8)$$

где  $P_{\text{раб, max}}^{\text{осн}}$  – максимальное рабочее давление основного насоса.

Тогда

$$\Sigma_{\text{н. расч}}^{\text{всп}} = \frac{Q_{\text{так}}^{\text{всп}}}{0,7 \cdot P_{\text{вып}}^{\text{всп}}} \cdot k, \quad (4.9)$$

где  $k$  – коэффициент использования насоса.

Для механических насосов  $k = 1,1 - 1,25$ .

По рассчитанным параметрам и техническим характеристикам механических насосов выбираем размер механического насоса из условий

$$P_{\text{пред}}^{\text{всп}} \leq P_{\text{нач}}^{\text{всп}}, P_{\text{вып}}^{\text{всп}}, \quad (4.10)$$

$$\Sigma_{\text{н}}^{\text{всп}} \geq \Sigma_{\text{н. расч}}^{\text{всп}}, \quad (4.11)$$

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип ионной откачки?
2. Классификация электрофизических средств откачки.
3. Особенности откачки инертных газов и углеводородов.
4. В чем заключается принцип геттерной откачки?
5. Каково назначение магнитного поля в магнитоэридном насосе?
6. В чем заключается явление аргонной нестабильности?
7. Поясните понятие саморегулирования скорости распыления геттера в магнитоэридных насосах.
8. Чем определяется предельное давление геттерных насосов?
9. Перечислите основные достоинства электрофизических средств откачки.

## 5. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ. ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

В качестве исходных величин для расчета вакуумных систем обычно заданы предельное давление  $P_{\text{пред}}$ , геометрические размеры рабочей камеры или величина потока газов  $Q_Z^{\text{max}}$ , время достижения заданного давления, характер технологического процесса.

Принципиальная схема высоковакуумной системы стандартного типа ( $P_{\text{np}} \geq 10^{-5}$  Па), показана на рис. 5.1.

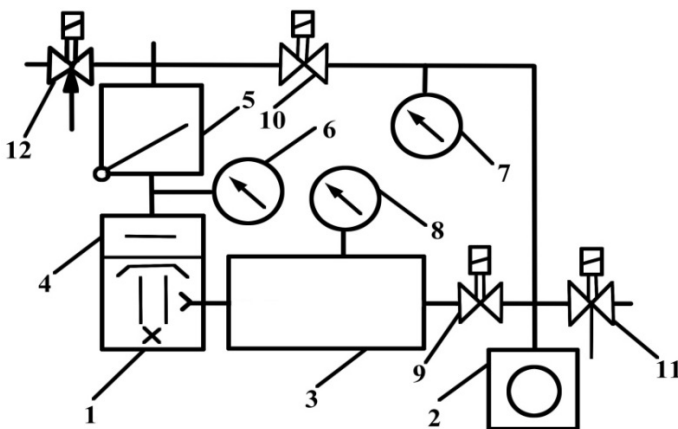


Рис. 5.1. Принципиальная схема высоковакуумной системы стандартного типа: 1 – диффузионный насос; 2 – механический насос; 3 – форвакуумный баллон; 4 – ловушка; 5 – высоковакуумный затвор; 6, 7, 8 – манометрические датчики; 9, 10 – клапаны; 11 – клапан-натекатель; 12 – вентиль-натекатель

Вакуумная система состоит из диффузионного насоса 1 с охлаждаемой ловушкой 4, форвакуумного баллона 3. Высокововакуумный затвор 5 изолирует вакуумную систему от контакта с атмосферой во время установки нового изделия. При откачке воздуха из вакуумной камеры через линию предварительного разрежения диффузионный насос 1 работает на фор-

вакуумный баллон 3, который отделен в это время от механического насоса 2 клапаном 9. При выключении системы для исключения попадания масла в клапаны 9 и 10 предусмотрен клапан-натекатель 11. Измерение давления производится манометрическими датчиками 6, 7 и 8. Вентиль-натекатель 12 служит для подачи в вакуумную камеру газа.

На рис. 5.2 показана принципиальная схема сверхвысоковакуумной системы комбинированной откачки.

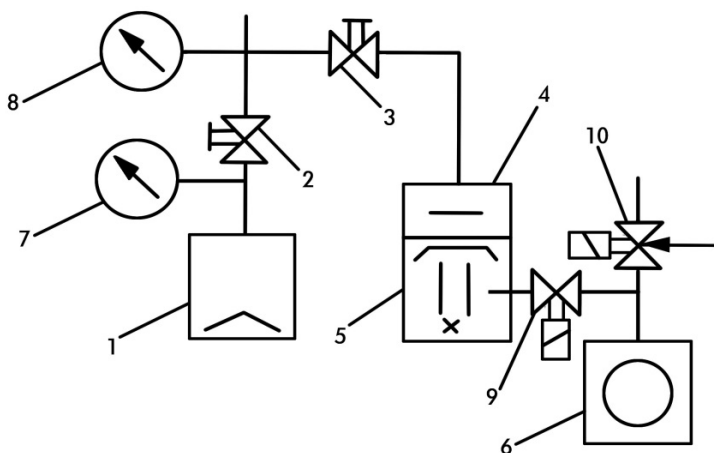


Рис. 5.2. Принципиальная схема сверхвысоковакуумной системы: 1 – сверхвысоковакуумный сорбционный насос; 2, 3 – клапаны; 4 – азотная ловушка; 5 – диффузионный насос; 6 – механический насос; 7, 8 – манометрические датчики; 9 – клапан; 10 – клапан-натекатель

В качестве сверхвысоковакуумного насоса используется геттерно-ионный, геттерный испарительный или магнитный электроразрядный насос 1, который производит откачку через прогреваемый клапан 2. Для создания предварительного разряжения в камере и откачки сверхвысоковакуумного насоса предназначен диффузионный насос 5 с азотной ловушкой 4 и механический насос 6.

В вакуумных системах, приведенных на рис. 5.1 и 5.2, используются диффузионные и механические насосы. Эти насосы загрязняют остаточную атмосферу технологической установки парами масла и продуктами их крекинга. Адсорбируясь на поверхности подложки, пары органических соединений образуют прочно связанные с ней слои, которые препятствуют созданию хорошей адгезии между покрытием и подложкой. Кроме того, в процессе осаждения пленки загрязняются парами масел, что в некоторых случаях приводит к необратимому изменению свойств напыленных пленок. Поэтому в настоящее время в сверхвысоковакуумных системах нашли широкое применение безмасляные средства откачки, когда используются сорбционные и криогенные насосы.

На рис. 5.3 приведена принципиальная схема сверхвысоковакуумной системы ( $P_{\text{пр}} \leq 10^{-7}$ ) с безмасляной откачкой с применением защитного вакуумного колпака.

Предварительная откачка сверхвысоковакуумного насоса 1 (геттерно-ионного, магнитного электроразрядного) и вакуумной камеры 4 производится через краны 15, 17, 21 адсорбционными насосами 10 и 14. Во время регенерации насосы 10 и 14 откачиваются механическим насосом 9 через краны 12 и 13. Сверхвысоковакуумная откачка осуществляется насосом 1 через высоковакуумный затвор 3. Защитный вакуумный колпак 18 откачивается механическим насосом 8 через кран 7. Защитный вакуумный колпак, или система «вакуум в вакууме», широко применяется в установках сверхвысокого вакуума для нанесения тонких пленок. В зависимости от требуемого давления в рабочей камере разрежение между защитным колпаком и рабочей камерой создается или механическим насосом, или диффузионным с азотной ловушкой.

Установка предназначена для нанесения многослойных металлических покрытий методами электроннолучевого и резистивного напыления.



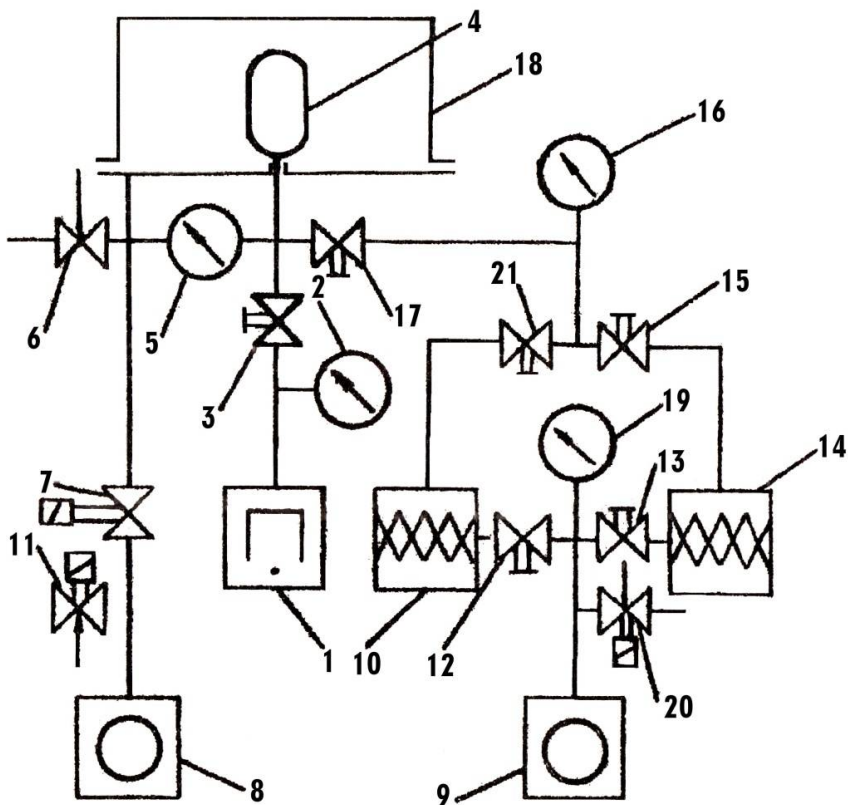


Рис. 5.3. Принципиальная схема сверхвысоковакуумной системы безмасляной откачки с применением защитного вакуумного клапана: 1 – сверхвысоковакуумный сорбционный насос; 2, 5, 16, 19 – манометры; 3 – высоковакуумный затвор; 4 – вакуумная камера; 6, 11, 20 – натекатели; 7, 12, 13, 15, 17, 21 – краны; 8, 9 – механические насосы; 10, 14 – адсорбционные насосы; 18 – защитный вакуумный колпак

В производстве наиболее широко применяются магнетронные распылительные системы непрерывного действия (рис. 5.4). Установка состоит из рабочей камеры, а также

шлюзовых устройств загрузки и выгрузки пластин. Пластины из кассеты 1 через шлюзовое устройство загрузки 2 поступают на конвейер 5. В процессе движения пластины проходят под ВЧ-источником ионной очистки 3, а затем через зону осаждения, где установлена магнетронная система распыления 4 (магнетрон). С конвейера пластины попадают в шлюзовое устройство выгрузки 6, а затем в кассету выгрузки 7. В процессе работы производится непрерывная откачка: из рабочей камеры (из зоны осаждения) с помощью высоковакуумного (диффузионного, геттерно-ионного) насоса 9 и последовательно включенного форвакуумного насоса 8, а из шлюзовых устройств – с помощью форвакуумных насосов 8 и 10. К магнетрону подводится мощность до 10 кВт при напряжении 450 В и токе разряда до 22 А.

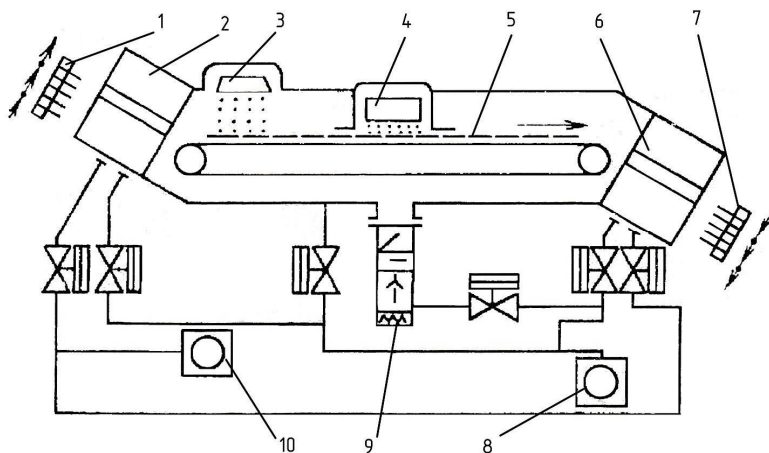


Рис. 5.4. Схема установки магнетронного распыления непрерывного действия

Вакуумная система магнетронной установки показана на рис. 5.5. Вакуумная система имеет три вакуумных насоса: форвакуумный насос 1, пароструйный насос 2 с низкотемпературной ловушкой 13, сверхвысоковакуумный сорбционный

насос 3. К вакуумной камере подключается форвакуумный насос 1 в режиме обводной откачки. В это время диффузионный насос 2 работает на форбаллон 4, давление в котором контролируется вакуумметром 10, при этом клапан 6 закрыт. При остановке форвакуумного насоса 1 закрывается клапан 9 и открывается клапан 11. Манометры 13,14, 15, 16, 17 и 18 служат для измерения давления в вакуумной камере, контроля эффективности работы насосов. Клапан 19 предназначен для напуска воздуха в вакуумную камеру. Клапаны 5, 6, 7, 8 и 12 коммутируют сверхвысоковакуумный, диффузионный и форвакуумный насосы.

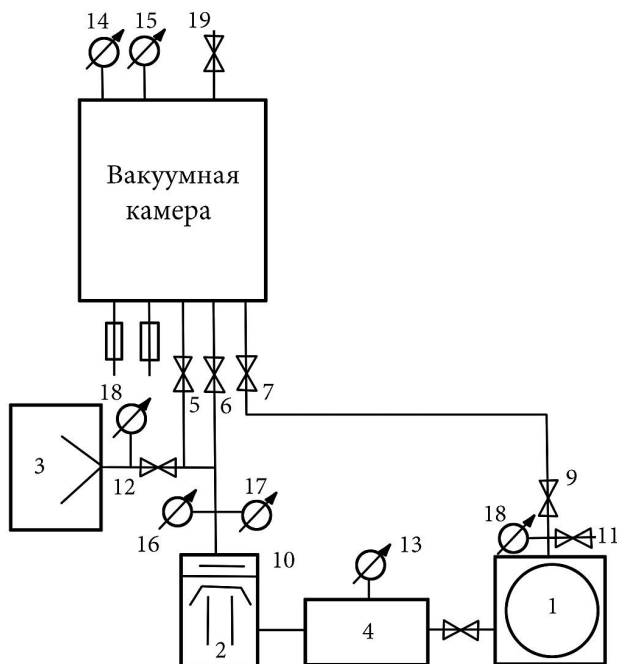


Рис. 5.5. Вакуумная система магнетронной распылительной установки

## Методика расчета вакуумных систем

Расчет вакуумной системы выполняется в два этапа.

Проектный расчет – расчет, в результате которого определяется принципиальная схема вакуумной системы, типы и размеры насосов, коммутирующие элементы и ориентировочные размеры трубопроводов.

Проверочный расчет – расчет, в результате которого уточняются характеристики насосов, размеры трубопроводов, определяется время достижения заданного давления.

### Проектный расчет вакуумной системы

Исходными данными для расчета обычно являются:

- а) предельное давление в рабочей камере  $P_{\text{пред}}$ ;
- б) длительность откачки, исходя из требований технологического процесса;
- в) размеры или вес изделий, температура изделий;
- г) размеры рабочего объема;
- д) характер технологического процесса.

Проектный расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Определение суммарного газового потока, поступающего в вакуумную систему. В общем случае суммарный газовый поток определяют четыре потока газов, поступающих в вакуумную систему:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{изд}} + Q_{\text{ст}} + Q_{\text{нат}} + Q_{\text{прон}} = P_{\text{пред}} \cdot S_0, \quad (5.1)$$

где  $Q_{\text{изд}}$  – поток газов, поступающих из обрабатываемых изделий;  $Q_{\text{ст}}$  – поток газов, выделяющийся со всех стенок, обращенных в вакуумную плоскость;  $Q_{\text{нат}}$  – поток газов, натекающих в вакуумную систему через неплотности;  $Q_{\text{прон}}$  – поток газов, поступающих в вакуумную систему за счет проникае-

мости;  $P_{\text{пред}}$  – предельное давление в рабочей камере;  $S_0$  – эффективная быстрота откачки вакуумного объема при давлении  $P_{\text{пред}}$ .

Поток газов  $Q_{\text{изд}}$  можно определить по формуле

$$Q_{\text{изд}} = \frac{m \cdot q_{\text{изд}}}{t} \cdot n \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (5.2)$$

где  $m$  – масса обрабатываемых изделий, кг;  $q_{\text{изд}}$  – удельное газовыделение из материала обрабатываемых изделий при данной температуре,  $(\text{м}^3 \text{Па})/\text{кг}$  (значения величины удельного газовыделения  $q_{\text{изд}}$  для материалов при различных температурах являются справочными данными);  $n$  – коэффициент, учитывающий неравномерность процесса газовыделения, обычно  $n = 1,5 - 3$ .

Поток газов  $Q_{\text{ст}}$  суммируется из потоков газов, выделяющихся со всех стенок вакуумной системы, обращенных в вакуумную полость, и определяется как

$$Q_{\text{ст}} = \sum g_{\text{газ}}^i \cdot A_i \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (5.3)$$

где  $g_{\text{газ}}^i$  – скорость удельного газовыделения с поверхности стенки вакуумной системы после 1 ч отжига,  $(\text{м}^3 \text{Па})/(\text{м}^2 \text{с})$ ;  $A_i$  – площадь поверхности стенок, обращенных в вакуумную полость, изготовленных из разных материалов.

Поток газов  $Q_{\text{нат}}$ , натекающих в вакуумную систему через соединения, обычно берется или по характеристикам элементов вакуумной системы, или равным чувствительности течеискателя, умноженной на число мест, которые могут быть источниками натекания

$$Q_{\text{нат}} = q_{\text{теч}} \cdot n \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (5.4)$$

где  $q_{\text{теч}}$  – чувствительность течеискателя или минимально обнаруживаемый поток пробного вещества;  $n$  – число источников натекания.

Поток газов  $Q_{\text{прон}}$  суммируется из потока газов  $Q_{\text{прон}}^{\text{рез}}$ , протекающего в вакуумную камеру через резиновые уплотнители, и потока газов, протекающих через стенки нагреваемых элементов, отделяющих вакуумную систему от атмосферы (например, стакан для термопары):

$$Q_{\text{прон}} = \sum_i Q_{\text{прон,с}}^{\text{рез}} + \sum_i Q_{\text{прон,и}}^{\text{ст}} \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right]; \quad (5.5)$$

$$Q_{\text{прон,и}} = q_{\text{прон,и}} P_i^{1/k} \frac{A}{d} \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (5.6)$$

где  $q_{\text{прон,и}}$  – удельный поток проницаемости данного газа,  $(\text{м}^3 \text{Па})/(\text{м}^3 \text{с})$ ;  $A$  – площадь стенки, м;  $d$  – толщина стенки, м;  $P_i$  – парциальное давление  $i$ -го газа ( $\text{N}_2, \text{O}_2, \text{H}_2, \dots$ ).

2. Выбор основного насоса, исходя из предельного давления. Например, если  $P_{\text{пред}} = 10^{-3} - 10^{-4}$  Па, то в качестве основного насоса выбирается пароструйный диффузионный насос.

3. Определение эффективной быстроты откачки камеры  $S_0$  для заданного предельного давления  $P_{\text{пред}}$  и рассчитанного суммарного газового потока

$$S_0 = \frac{Q_{\Sigma}}{P_{\text{пред}}}; \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.7)$$

3. Определение скорости откачки высоковакуумного насоса. Быстрота действия насоса при проектном расчете выбирается из условия обеспечения рабочего давления в установленном режиме работы вакуумной системы:

$$S_{\text{н}}^{\text{осн}} = k S_0^{\text{осн}}, \quad (5.8)$$

где  $k$  – коэффициент использования насосов.

Для пароструйных и криогенных насосов  $k = 2$ , для сорбционных насосов  $k = 4$ , для механических –  $k = 1,2$ .

По техническим характеристикам насоса и рассчитанному значению  $S_{\text{н, расч}}^{\text{осн}}$  выбираем размер основного насоса. Выписываем основные технические характеристики выбранного насоса:  $P_{\text{пред}}$ ,  $P_{\text{нач}}$ ,  $P_{\text{вып}}$ ,  $P_{\text{раб}}^{\text{макс}}$ ,  $P_{\text{раб}}^{\text{мин}}$ ,  $S_{\text{н}}$ .

Быстрота действия выбранного насоса  $S_{\text{н}}^{\text{осн}} \geq S_{\text{н, расч}}^{\text{осн}}$ , а предельное давление насоса должно быть равно или меньше заданного в условии  $P_{\text{пред}}$  проектируемой установки.

4. Определение необходимости и типа вспомогательного насоса по техническим характеристикам основного насоса  $P_{\text{нач}}$ ,  $P_{\text{вып}}$ . Так, для пароструйных насосов  $P_{\text{нач}}$ ,  $P_{\text{вып}} < P_{\text{атм}}$ , т.е. требуется предварительное разрежение вакуумной камеры на впуске пароструйного насоса. Тип вспомогательного насоса выбирается из условия

$$P_{\text{пред}}^{\text{всп}} \leq P_{\text{нач}}^{\text{осн}}, P_{\text{вып}}^{\text{осн}}. \quad (5.9)$$

Очевидно, что для создания предварительного разрежения в пароструйных насосах используются механические или адсорбционные насосы.

Расчет параметров вспомогательного насоса основан на том, что максимальный поток откачиваемых газов должен быть одинаков для основного и вспомогательного насосов, соединенных последовательно, т.е.

$$Q_{\max} = S_{\text{н}}^{\text{осн}} P_1^{\text{осн}} = S_{\text{н}}^{\text{всп}} P_2, \quad (5.10)$$

где  $S_{\text{н}}^{\text{осн}}$  и  $S_{\text{н}}^{\text{всп}}$  – эффективная быстрота откачки вспомогательного и основного насосов при давлении на входе в насосы  $P_1$  и  $P_2$  соответственно.

$$S_{\text{н. расч}}^{\text{всп}} = \frac{Q_{\max}}{P_2}. \quad (5.11)$$

Давление на входе во вспомогательном насосе выбирается из условия

$$P_2 = (0,7 - 0,75) P_{\text{вып}}^{\text{осн}}, \quad (5.12)$$

где  $P_{\text{вып}}^{\text{осн}}$  – выпускное давление основного насоса;  $Q_{\max}$  – максимальный поток газа, который может быть удален основным насосом,

$$Q_{\max} = P_{\text{раб, макс}}^{\text{осн}} S_{\text{н}}^{\text{осн}}, \quad (5.13)$$

где  $P_{\text{раб, макс}}^{\text{осн}}$  – максимальное рабочее давление основного насоса.

Тогда

$$S_{\text{н. расч}}^{\text{всп}} = \frac{Q_{\max}^{\text{осн}}}{0,7 \cdot P_{\text{вып}}^{\text{осн}}} \cdot k, \quad (5.14)$$

где  $k$  – коэффициент использования насоса.

Для механических насосов  $k=1,1 - 1,25$ .



По рассчитанным параметрам и техническим характеристикам механических насосов выбираем размер механического насоса из условий

$$P_{\text{пред}}^{\text{всп}} \leq P_{\text{нач}}^{\text{осн}}, P_{\text{вып}}^{\text{осн}}. \quad (5.15)$$

$$S_{\text{н}}^{\text{осн}} \geq S_{\text{н}}^{\text{всп}} \cdot \text{расч.}$$

5. Определение принципиальной схемы вакуумной системы.

6. Расчет времени предварительной откачки вакуумной камеры и объема форвакуумного баллона, т.е. промежутка времени  $t$ , в течение которого форвакуумный баллон может быть изолирован от вспомогательного насоса.

Для механических насосов:

$$t = \frac{V}{S_{\text{н}}^{\text{всп}}} \ln \frac{P_{\text{нач}}}{P_{\text{кон}}}, \quad (5.16)$$

где  $V$  – объем вакуумной камеры;  $P_{\text{нач}}$  и  $P_{\text{кон}}$  – начальное и конечное давления для вспомогательного насоса.

Для механических насосов  $P_{\text{нач}} \sim 10^5$  Па;  $P_{\text{кон}} = 2 P_{\text{пред}}^{\text{всп}} = 2$  Па.

Обычно рекомендуется принимать двух-, трехкратный запас для времени использования форбаллона:  $t_{\text{ф.б.}} = 3t$ .

7. Расчет объема форвакуумного баллона из условия

$$Q'_{\text{max}} \cdot t_{\text{ф.б.}} = V_{\text{ф.б.}} (P_{\text{max}} - P_{\text{min}}), \quad (5.17)$$

где  $Q'_{\text{max}}$  – максимальный поток газа, поступающий в форбаллон во время предварительной откачки вакуумной камеры.

Таким образом,  $Q'_{\max}$  – суммарный поток газов, обусловленный потоком газов в выпускном патрубке основного насоса и потоком газов, выделяющихся со стенок форвакуумного баллона и трубопровода, соединяющего его с основным насосом.

Обычно принимается площадь внутренней поверхности форбаллона  $A_{\text{ф.б.}} = 0,5 \text{ м}^2$ ; площадь всех поверхностей трубопроводов  $A = 2 \text{ м}^2$ , тогда

$$Q'_{\max} = (A + A_{\text{ф.б.}}) g_{\text{газ}}^{\text{ст}}, \quad (5.18)$$

где  $g_{\text{газ}}^{\text{ст}}$  – удельная скорость газовыделения стали;  $P_{\max} \leq P_{\text{вып}}^{\text{осн}}$ . Обычно принимается  $P_{\max} = (0,3 - 0,8) P_{\text{вып}}^{\text{осн}}$ ;  $P_{\max}$  – максимальное давление в форбаллоне;  $P_{\min}$  – минимальное давление в форбаллоне.

Ввиду большой проводимости давление в форбаллоне будет весьма близким к предельному давлению вспомогательного насоса. Обычно берется двукратный запас по  $P_{\min}$ :  $P_{\min} = 2 P_{\text{пред}}^{\text{всп}}$ .

Тогда

$$V_{\text{ф.б.}} = \frac{Q'_{\max} \cdot t_{\text{ф.б.}}}{P_{\max} - P_{\min}} = \frac{Q'_{\max} \cdot 3t}{0,5 P_{\text{вып}}^{\text{осн}} - 2 P_{\text{пред}}^{\text{всп}}} \quad (5.19)$$

### Контрольные вопросы

1. Принципиальные схемы вакуумных систем для нанесения тонких пленок.
2. Вакуумная система «вакуум в вакууме».
3. Безмасляные системы откачки.
4. Методика проектного расчета вакуумной системы.
5. Методика согласования насосов.
6. Порядок работы на установке.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника [Текст]: учебник для вузов по специальности «Электронное машиностроение» направления «Электроника и микроэлектроника» / Л.Н. Розанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2007. – 391 с.

2. Вакуумная техника [Текст]: справочник / К.Е. Демидов и др.; под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – 590 с.

3. Шешин Е.П. Вакуумные технологии [Текст]: учеб. пособие / Е.П. Шешин. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 504 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Элементы вакуумных систем. Проводимость сложного трубопровода	1
2. Физические процессы в вакууме. Перенос тепла	9
3. Исследование газовой выделенности из материалов	13
4. Сорбционные средства очистки	23
5. Принцип построения вакуумных систем. Проектный расчет вакуумных систем	44
Библиографический список	57

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических занятий по дисциплине  
«Вакуумная техника»  
для студентов направления подготовки  
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
(направленность «Электронное машиностроение»)  
очной формы обучения

Составители:

Николаева Елена Петровна  
Николаева Светлана Олеговна

В авторской редакции

Компьютерная верстка О.А. Ивановой

Подписано к изданию 10.07.2017.

Уч.-изд. л. 3,6.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14