



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР

ВАКУУМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Рекомендации для конструкторов  
Института ядерной физики СО АН СССР

Составитель : Э.М.Трахтенберг



"УТВЕРЖДАЮ"

Главный инженер ИЯЭ СО АН СССР

В. П. Приходько

" 9 / ноября 1981 г.

## ВАКУУМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Рекомендации для конструкторов  
Института ядерной физики СО АН СССР

Составитель: Э. М. Трахтенберг

Настоящая работа продолжает серию "Рекомендации для конструкторов", в которой ранее выпущены рекомендации Б. З. Перова "Учет тепловых нагрузок при конструировании".

В данной работе рассмотрены основные требования к вакуумным и высоковакуумным конструкциям и приведены практические рекомендации по их расчету и конструированию с учетом специфики работы вакуумных систем электрофизических установок.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
I. Основные понятия в вакуумной технике .....	5
I.1. Единицы измерения вакуума .....	5
I.2. Виды вакуума .....	5
I.3. Поток газа и проводимость .....	5
I.4. Удельное газотделение поверхности .....	7
I.5. Натекание и газопроницаемость .....	10
I.6. Некоторые примеры для прикладных расчетов .	12
2. Присоединение систем с различным вакуумом друг к другу .....	13
2.1. Присоединение через устройства для дифферен- циальной откачки .....	13
2.2. Присоединение через тонкую фольгу .....	14
2.3. Перепуск через негерметичную заслонку .....	15
3. Стыковые уплотнения в вакуумных системах .....	17
3.1. С уплотнителями из резины .....	17
3.2. С уплотнителями из полимерных материалов ...	20
3.3. С индиевым уплотнителем .....	21
3.4. Уплотнения стыковые прогретые .....	22
3.5. Сварные разборные соединения .....	23
4. Откачные средства .....	24
4.1. Основные типы откачных средств .....	24
4.2. Конструктивные и эксплуатационные особенности широко применяемых в ИЯФ насосов .....	25
4.3. Некоторые указания по конструированию рас- пределенных магнетронных насосов .....	30
5. Особенности вакуумных систем накопителей заряжен- ных частиц .....	32

6. Основные типы приемников излучения .....	33
7. Особенности конструирования высоковакуумных систем .....	34
Список литературы .....	37

## I. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ В ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ

### I.1. Единицы измерения вакуума

Традиционной, наиболее часто используемой единицей измерения вакуума является ТОР.

Давление в I TOR - это давление ртутного столба высотой I мм.

В системе СИ давление и вакуум измеряют в Н/м<sup>2</sup> (Паскаль), причем:

$$1 \text{ тор} = 1 \text{ мм рт.ст.} = 1,33 \text{ Н/м}^2.$$

### I.2. Виды вакуума

Виды вакуума установлены ГОСТ 3197-70, который уже заметно устарел, и несмотря на то, что он не отменен, в новейшей литературе и в практике приняты другие градации, которые, как и любые границы, достаточно условны:

низкий вакуум (форвакуум)	1 мм рт.ст. + 10 <sup>-3</sup> тор
средний вакуум	10 <sup>-3</sup> тор + 10 <sup>-6</sup> тор
высокий вакуум	10 <sup>-6</sup> тор + 10 <sup>-9</sup> тор
сверхвысокий вакуум	10 <sup>-9</sup> тор + и выше.

### I.3. Поток газа и проводимость

Поток газа Q через сечение (имеется ввиду количество молекул) равен объемной скорости течения, умноженной на давление:

$$Q = P \frac{dV}{dt}$$

Размерность Q - тор.л/сек.

Проводимость трубопровода, соединяющего две части вакуумной системы, - C - это отношение потока газа к разности давлений:

$$C = \frac{Q}{\Delta P} \quad \text{л/сек.}$$

Отсюда:

$$Q = C \Delta P = C(P_2 - P_1)$$

Если:  $P_2 \geq P_1$ , то

$$Q \approx C \cdot P_2$$

Проводимость в вакуумной технике является главной характеристикой трубопроводов и отверстий и в вышеприведенной формуле видна аналогия с электрическим током:  $C$  соответствует электропроводности, а  $P$  - разности потенциалов; тогда  $Q$  - ток. Как и в электрической цепи, здесь применимы правила для параллельного и последовательного соединения проводников, а именно:

$$C = C_1 + C_2 \quad \text{для параллельного соединения;}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{для последовательного соединения.}$$

Проводимость круглой трубы длиной  $l > 10d$  для азота равна:

$$C = \frac{12,2 d^3}{l}$$

где  $C$  - в л/сек;  
 $d$  - в см;  
 $l$  - в см.

Проводимость отверстия (диафрагмы) для азота

$$C \approx 12 F$$

где  $C$  - в л/сек;  
 $F$  - в см<sup>2</sup>.

В табл. I приводятся значения проводимости некоторых газов по отношению к азоту. Данные значения справедливы при молекулярном течении газа.

Таблица I

Относительная проводимость некоторых газов

Газ	$C_{\text{газа}}/C_{N_2}$	Газ	$C_{\text{газа}}/C_{N_2}$
O <sub>2</sub>	0,86	CO <sub>2</sub>	1,2
H <sub>2</sub>	2	H <sub>2</sub> O	1,9
Az	0,79	Hg	0,75

#### I.4. Удельное газоотделение поверхности

Всякая поверхность, смотрящая в вакуум, является источником газа. Основные причины газоотделения следующие:

- 1) различные загрязнения поверхности (физическая и химическая адсорбция);
- 2) растворимость газов в материалах;
- 3) испарение материалов.

Газоотделение поверхности равно:

$$Q = q_0 \Sigma F,$$

где  $Q$  - в тор.л/сек;

$q_0$  - удельное газоотделение, в  $\frac{\text{л.тор}}{\text{см}^2 \text{сек}}$ ;

$\Sigma F$  - суммарная поверхность, смотрящая в вакуум, в см<sup>2</sup>.

При отсутствии течей и неплотностей газоотделение с поверхности является, практически, основной величиной, определяющей вакуум в данном объеме. Отсюда следуют важные практические выводы:

I.4.1. При конструировании электрофизической аппаратуры, работающей в вакууме, выбор исходных материалов, способов их обработки, назначение классов чистоты поверхностей и видов очистки поверхностей необходимо проводить с учетом причин газоотделения. Например, поверхности, смотрящие в вакуум, должны быть чистыми для уменьшения загрязнений, однако, шлифовка и полировка для обработки не годятся - они заменяются алмазным точением или электрохимической полировкой.

I.4.2. Рассмотрим как сказываются причины газоотделения на процесс гажения во времени при откачке (вакуумной тренировке).

Кривая изменения удельного газоотделения со временем показана на рис. I.

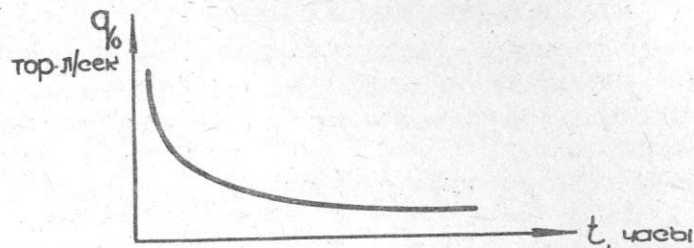


рис.1. Кривая изменения удельного газоотделения в процессе откачки.

Отсюда видно, что первоначально газоотделение быстро уменьшается за счет скачивания влаги и летучих фракций загрязнений. Затем процесс начинает носить асимптотический характер. Главной причиной газоотделения становятся газы, растворенные в материале, которые начинают поступать из толщины материала к его обезгаживаемой поверхности. Процесс этот практически бесконечен.

Например, периоды работы накопителей заряженных частиц между напусками атмосферы иногда больше года при постоянной интенсивной очистке внутренней поверхности камеры синхротронным излучением, но тем не менее после двух-трех недель тренировки дальнейшее улучшение вакуума почти незаметно. Отсюда следует второй главный вывод - получение высокого вакуума (выше  $10^{-7}$  тор) практически невозможно без прогрева объема до сравнительно высоких температур (максимально  $400^{\circ}+450^{\circ}$ , иногда до  $150^{\circ}+200^{\circ}$ ).

Прогрев обеспечивает полное удаление влаги, ускорение десорбции загрязнений, испарение летучих окисных пленок и т.д.

Данные по газоотделению для некоторых материалов приведены в табл.2.

Предельные данные, которые можно получить для высококачественных металлов при оптимальной обработке, высокотемпературном прогреве и полном соблюдении всех требований вакуумной гигиены, составляют  $10^{-11} + 10^{-12} \frac{\text{л.тор}}{\text{см}^2 \text{сек}}$  (иногда до  $10^{-13} \frac{\text{л.тор}}{\text{см}^2 \text{сек}}$ ).

Таблица 2

Ориентировочные данные по газоотделению для некоторых металлов

Материал	Обработка	Газоотделение, в $\frac{\text{л.тор}}{\text{см}^2 \text{сек}}$		
		при		
		$20^{\circ}$	$200^{\circ}$	$400^{\circ}$
<b>Сталь 12Х18Н10Т:</b>				
необезгаженная	необработан.	$6 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$
после 6 час.откачки	- " -	$6 \cdot 10^{-9}$	-	-
после 15 час.откачки при $400^{\circ}$	- " -	-	-	$2 \cdot 10^{-8}$
<b>Медь М3:</b>				
необезгаженная	необработан.	$6 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-6}$
после 6 час.откачки	- " -	$2 \cdot 10^{-8}$	-	-
после 15 час.откачки при $400^{\circ}$	- " -	-	-	$1 \cdot 10^{-8}$
<b>Д16Т после 3 часов откачки</b>				
	необработан.	$2 \cdot 10^{-8}$	-	-
<b>Нерж.сталь ЭИ225 жаропрочная</b>				
	необработан.	$8 \cdot 10^{-9}$	-	-
- " -	полировка	$6 \cdot 10^{-10}$	-	-
- " -	электрохимическая полировка	$2 \cdot 10^{-10}$	-	-

Неметаллические материалы: стекло, керамика, вакуумные резины, фторопласт при комнатной температуре - мало отличаются от металлов по газоотделению (остальные материалы имеют большие начальные газоотделения), но прогрев их до предельных температур невозможен (кроме керамики).

### 1.5. Натекание и газопроницаемость

Значение даже микротечей и микропор в вакуумной технике очень существенно. При этом картина полностью отличается от сосудов, работающих под давлением. Например, имеется баллон объемом  $V = 40$  литров с давлением внутри 150 атм. За 1 час из него вытекает 1 см<sup>3</sup> газа. При этом давление упадет на

$\frac{I}{40 \cdot 150 \cdot 10^3} = \frac{I}{6 \cdot 10^6}$  или на 0,000017%. Если же в баллон объемом  $V = 40$  литров с вакуумом  $10^{-6}$  тор за 1 час надет 1 см<sup>3</sup> газа, то вакуум изменится (ухудшится) в  $\frac{1 \cdot 760 \cdot 10^6}{40 \cdot 10^3} = 19 \cdot 10^3$  раз и давление в баллоне будет  $2 \cdot 10^{-2}$  тор, т.е. кардинально изменится.

Поэтому для высоковакуумных систем даже микротечи недопустимы. Следует учитывать и такой фактор, как газопроницаемость материалов. Газопроницаемость измеряется в

$$\frac{\text{см}^3 \cdot \text{см}}{\text{сек} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{атм}}$$

Т.е. газопроницаемость — количество газа в см<sup>3</sup>, проникающее через данный материал в 1 см толщины на каждый см<sup>2</sup> поверхности за 1 сек при разности давлений в 1 атм.

Основными причинами газопроницаемости материалов являются: неплотность материалов, диффузия газов сквозь материал, испарение материалов.

Газопроницаемость очень сильно зависит от температуры.

В табл.3 даны значения газопроницаемости для металлов в зависимости от температуры нагрева.

Наиболее проникающими газами являются гелий и водород. Из-за взрывоопасности водорода для теческания используется гелий.

Зная газопроницаемость различных металлов, мы можем использовать их в качестве фильтров для получения химически чистых газов. Так серебро можно использовать как фильтр для получения кислорода, палладий и никель — для получения водорода, а железо также обладает заметной проницаемостью для водорода.

Газопроницаемость неметаллических материалов представлена в табл.4.

Таблица 3

Газопроницаемость металлов

Металл	Газ	температура				
		20°	100°	400°	600°	800°
Малоуглер. сталь	водород	$10^{-10}$	$10^{-7}$	$0,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Никель	водород	-	-	$0,2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Медь	водород	-	-	$1 \cdot 10^{-8}$	$0,4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
Алюминий	водород	-	-	$0,5 \cdot 10^{-7}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$	-
Серебро	кислород	-	-	$0,4 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	-
Палладий	водород	-	-	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$
Платина	водород	-	-	$0,4 \cdot 10^{-7}$	$0,8 \cdot 10^{-6}$	$0,6 \cdot 10^{-5}$
Малоуглер. сталь	азот	-	-	-	-	$0,2 \cdot 10^{-6}$

Таблица 4

Газопроницаемость для неметаллов

Материал	t°С	количество газа, в $\frac{\text{см}^3 \cdot \text{см}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{атм}}$			
		$\text{H}_2$		$\text{He}$	
		$\text{H}_2$	$\text{O}_2$	$\text{H}_2$	$\text{He}$
Резина 7889	20°	$5 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Резина 9024	20°	$0,5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-8}$
Полиэтилен	20°	$0,6 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Эп.смола ЭД-5	20°	-	-	-	$6,5 \cdot 10^{-9}$
Стекло С49-2	300°	-	-	$0,2 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-9}$

Из таблицы видно, что и по газопроницаемости применение резин, полиэтилена и т.п. материалов в высоковакуумных установках невозможно.

### 1.6. Некоторые примеры для приближенных расчетов

1) Определить с какой скоростью надо откачивать объем с суммарной поверхностью, равной  $10000 \text{ см}^2$ , с ориентировочным удельным газением  $10^{-8} \frac{\text{л.тор}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$ , если необходимо иметь в этом объеме давление  $p \approx 10^{-6} \text{ тор}$ .

$$P = \frac{Q}{C} = \frac{q_0 \cdot F}{C} \quad \text{отсюда } C = \frac{q_0 \cdot F}{P} = \frac{10^{-8} \cdot 10^4}{10^{-6}} = 100 \text{ л/сек.}$$

2) Если в предыдущей задаче насос будет подключен не непосредственно к объему, а через трубу диаметром 10 см и длиной 100 см, как изменится вакуум в объеме?



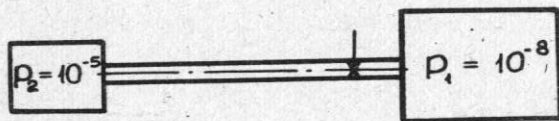
$$C_{\text{трубы}} = \frac{12,2 d^3}{L} = \frac{12,2 \cdot 10^3}{10^2} = 122 \text{ л/сек.}$$

$$\frac{1}{C_{\text{эф}}} = \frac{1}{C_{\text{тр}}} + \frac{1}{C_n} = \frac{1}{122} + \frac{1}{100} \quad C_{\text{эф}} \approx 50 \text{ л/сек.}$$

При этом

$$P = \frac{q_0 \cdot F}{C_{\text{эф}}} = \frac{10^{-8} \cdot 10^4}{50} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ тор.}$$

3) Имеется накопитель с вакуумом  $10^{-8} \text{ тор}$ , который откачивается насосами, имеющими  $\sum C_n = 1000 \text{ л/сек}$ . Этот объем накопителя соединен каналом диаметром 2 см и длиной, равной 1 м, со спектрометром, вакуум в котором  $10^{-5} \text{ тор}$ , через шиббер. Как изменится вакуум в накопителе, если шиббер открыть?



Количество газа, выделяющееся в накопителе, равно:

$$Q = P_1 \cdot C_n = 10^{-8} \cdot 10^3 = 10^{-5} \text{ л.тор/сек.}$$

Проводимость трубы составляет:

$$C_{\text{тр}} = \frac{12,2 d^3}{L} = \frac{12,2 \cdot 8}{100} \approx 1 \text{ л/сек.}$$

Количество газа, которое будет поступать из спектрометра в накопитель при открытом шибере:

$$Q_1 = (P_2 - P_1) \cdot C_{\text{тр}} \approx P_2 \cdot C_{\text{тр}} = 10^{-5} \text{ л.тор/сек,}$$

т.к.  $P_2 \gg P_1$ .

При этом после открытия шибера вакуум в накопителе изменится до:

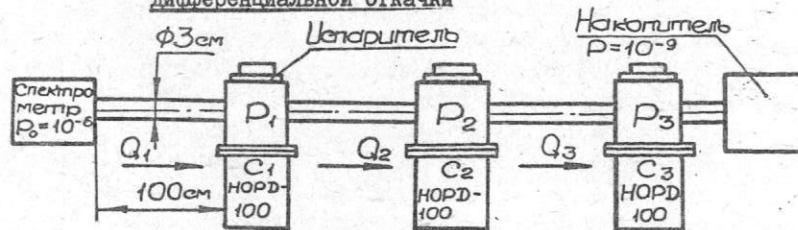
$$P_1' = \frac{Q + Q_1}{C_n} = \frac{10^{-5} + 10^{-5}}{10^3} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ тор.}$$

Т.о. расчет показал, что при открытии шибера вакуум падает вдвое и, следовательно, такое подключение невозможно.

## 2. ПРИСОЕДИНЕНИЕ СИСТЕМ С РАЗЛИЧНЫМ ВАКУУМОМ ДРУГ К ДРУГУ

Этот вопрос имеет большое практическое значение для таких случаев, как проводка пучка заряженных частиц из одного ускорителя или накопителя в другой через электронно-оптические каналы в фольших комплексах, системах для вывода синхротронного излучения и т.п.

### 2.1. Присоединение через устройства для дифференциальной откачки





На рисунке показан канал с дифференциальной откачкой, через который СИ выводится из накопителя с  $P_I = 10^{-9}$  в спектрометр с  $P_0 = 10^{-6}$ . Определим, какой перепад давления обеспечивается в этом канале.

Проводимость секции:

$$C_{\text{секц.}} = \frac{12,2 d^3}{L} \approx 3,3 \text{ л/сек};$$

$$Q_I = 10^{-6} \cdot 3,3 = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ л.тор/сек};$$

$$P_I = \frac{Q_I}{C_I} = \frac{3,3 \cdot 10^{-6}}{100} = 3,3 \cdot 10^{-8} \text{ тор};$$

$$Q_2 = P_I \cdot C_{\text{секц.}} = 3,3 \cdot 10^{-8} \cdot 3,3 = 10^{-7} \text{ л/сек};$$

$$P_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{10^{-7}}{100} = 10^{-9} \text{ тор}.$$

#### Вывод:

При таких размерах для получения вакуума  $10^{-9}$  тор достаточно двух станций дифференциальной откачки. Если же длина канала лимитируется, то можно сократить длины секций и задействовать все три станции.

При малых проводимостях канала и больших скоростях откачки в каждой секции натекание газа в накопитель будет лимитироваться газоотделением стенок последней секции и соединяющим ее с накопителем участком. Конструкция должна обеспечивать возможность прогрева этих элементов.

#### 2.2. Присоединение через тонкую фольгу

Чаще используется тонкая вакуумно-плотная бериллиевая фольга.

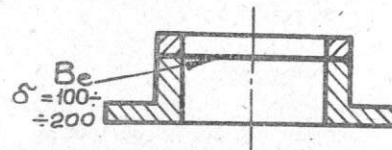
Такой способ достаточно часто встречается при присоединении электронно-оптических каналов к накопителям. Вакуум в этих каналах из-за того, что речь идет об однократном пролете частиц, может быть весьма низким (до  $10^{-3}$ ). И если нужно провести пучок с большим фазовым объемом, то вполне допустимо применение бериллиевой фольги толщиной  $\delta = 100+200$  мкм.

Бериллий дает весьма незначительное дополнительное рассеивание частиц из-за малого удельного веса и малого

(атомный номер), и поэтому с небольшим увеличением фазового объема можно смириться.

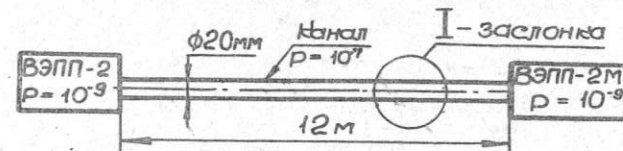
Если речь идет о проводке пучка частиц из накопителя в накопитель (ВЭПП-2  $\rightarrow$  ВЭПП-2М, ВЭПП-3  $\rightarrow$  ВЭПП-4), т.е. когда имеется затухший пучок с очень малым фазовым объемом, то применение фольг возможно, но менее желательно, т.к. то же самое абсолютное приращение фазового объема в % будет гораздо большим.

Бериллиевая фольга может быть вакуумно-плотно приварена к медным переходным деталям.



#### 2.3. Перепуск через негерметичную заслонку

Такой принцип присоединения особенно хорош при перепуске частиц из накопителя в накопитель, когда этот процесс происходит сравнительно редко; один раз в несколько минут (от 1 до 10)



Заслонка открывается при включении тока в катушку на время  $\sim (0,5+1)$  сек. Этого времени более чем достаточно для пролета пучка, причем ввиду кратковременности работы катушки ее можно форсировать по питанию.

Рассмотрим натекание газа через такую негерметичную катушку, которая показана на рис.2.

Проводимость плоской щели размерами  $a \times b$ , если  $a \gg b$  определяется по формуле:

$$C_{\text{щ}} = 3I \frac{a b^2}{L} \Gamma'' \text{ л/сек},$$

где  $a \approx 2$  см - высота щели, равная диаметру трубы;  $b = 5 \cdot 10^{-3}$  см - ширина щели (полузазор);  $\Gamma''$  - коэффициент, пред-

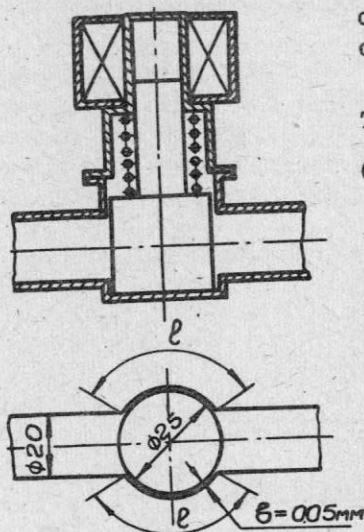


Рис.2.

ставяющий собой некую функцию от  $l/b$ , при  $l/b > 10$   $f'' = 1$ .

$$l = 1,5 \text{ см.}$$

Т.о.

$$C_{\text{щ}} = \frac{31 \cdot 2 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{1,5} \cdot 1 =$$

$$= 10^{-3} \text{ л/сек.}$$

Тогда общая проводимость хлопушки равна:

$$C_{\text{хл}} = 2 \cdot C_{\text{щ}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ л/сек.}$$

Если хлопушка вышеприведенных размеров находится на расстоянии 100 см от места впуска и открывается на 1 сек раз в 100 сек, то среднее поступание газа в накопитель из канала с вакуумом  $10^{-7}$  тор составит:

$$Q_{\text{газа}} = 4 p \cdot C_{\text{хл}} + \frac{4 p \cdot C_{\text{тр}}}{100} = 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-3} +$$

$$+ \frac{10^{-7} \cdot 12 \cdot 8}{100 \cdot 100} = 2 \cdot 10^{-10} + 10^{-9} = 1,2$$

$$Q_{\text{газа}} = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ л.тор/сек.}$$

Если же хлопушка отсутствует, натекание газа в накопитель равно:

$$Q_1 = 4 p \cdot C_{\text{тр}} = 10^{-7} \cdot \frac{12 \cdot 8}{100} \approx 10^{-7} \text{ л.тор/сек,}$$

т.е. на два порядка больше.

Отсюда следует очень важный вывод о целесообразности выполнения двойного вакуума в ответственных или ненадежных местах, таких как, например, изоляторные вводы. Причем выполнить это можно очень компактно, локально. Примером может служить конструкция коаксиального ввода импульсного безжелезного магнита в высокий вакуум (рис.3).

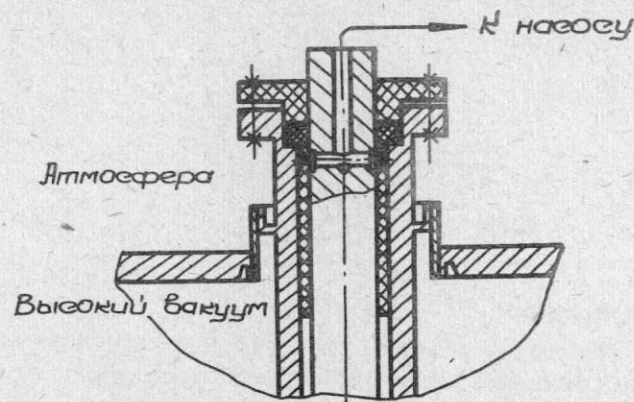


Рис.3. Коаксиальный ввод импульсного безжелезного магнита в высокий вакуум.

### 3. СТЫКОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ

#### 3.1. Стыковые уплотнения с уплотнителями из резины

3.1.1. В качестве уплотнителя используются: резина марки 7889; 9024; силиконовая резина; витон.

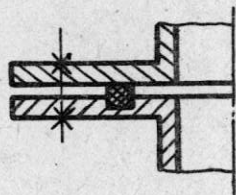
При выборе материала необходимо учитывать следующие особенности:

резина марки 9024 - более жесткая, маслостойкая, применяется во вводах типа Вильсон, в специальных случаях (например, в уплотнениях вода-вакуум);

силиконовая резина имеет термостойкость около  $100^{\circ}$ ; несколько более мягкая, чем другие сорта; обладает сильной газопроницаемостью по отношению к гелию, который используется для гечейскания;

термостойкость витона около  $200^{\circ}$ .

3.1.2. Вариантов конструкции уплотнения много, рассмотрим достоинства и недостатки лишь некоторых из них.

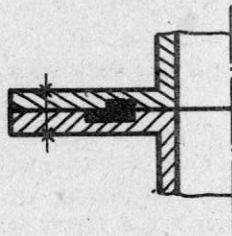


**Достоинства:**

1) простота и дешевизна конструкции, т.к. допуски на все элементы уплотнительного соединения могут быть очень грубыми.

**Недостатки:**

- 1) не обеспечивается центрирование и соосность соединяемых деталей;
- 2) уплотнитель редко можно использовать при последующих сборках, т.к. резина "жуйтса";
- 3) необходима периодическая замена уплотнителя, т.к. он высыхает и уменьшается в размерах, при этом уплотнение начинает подтекать.



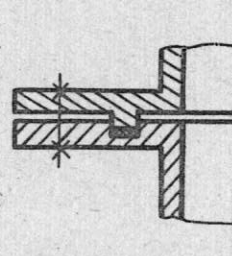
**Достоинства:**

- 1) стыковка уплотняемых поверхностей - металл на металл;
- 2) возможность плоскостной базировки соединяемых деталей;
- 3) возможность повторного использования уплотнителя.

**Недостатки:**

- 1) соединение более дорогое, т.к. необходимо значительно точнее выполнять размеры уплотнителя и канавки под него;
- 2) не обеспечивается центрирование и соосность соединяемых деталей, для этого необходимы дополнительные конструктив-

ные элементы.



**Достоинства:**

- 1) обеспечивается центрирование соединяемых деталей и соосность при качественной сборке;
- 2) соединение стабильно при длительной эксплуатации, т.к. уплотнитель находится в замкнутом объеме.

**Недостатки:**

- 1) самое дорогое и трудоемкое по выполнению соединение.

Размеры всех приведенных вариантов конструкции указаны в нормалн НВ.01.00.00 "Фланцевые соединения с резиновым уплотнителем".

3.1.3. Общие требования и рекомендации к выполнению стыковых уплотнений с уплотнителями из резины:

1. Усилие на разжим уплотнителя должно быть не менее 20 кгс/см<sup>2</sup>.

2. Толщина фланцев должна быть достаточной для того, чтобы необходимое усилие было передано на уплотнитель.

3. Фаски в канавке и на зубе должны быть не менее (0,2+0,3) x 45°, чтобы не резать уплотнитель.

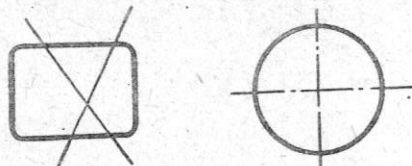
4. Чистота поверхности элементов деталей, соприкасающихся с уплотнителем, должна быть не хуже  $\sqrt{20}$ , причем отдельные риски допускаются только кольцевые, а не поперечные.

5) Допускается склеивать уплотнитель (например клеем 88) по схеме:



Уплотнитель склеивают в случае изготовления его из шнура при необходимости получить большие размеры.

6. При изготовлении прямоугольные уплотнители следует заменять круглыми соответствующего периметра.



7. Если необходим длинный уплотнитель, а шнура нет, то можно вырезать его любой длины из листа спирально, а затем при необходимости склеить.

### 3.2. Стыковые уплотнители с уплотнителями из полимерных материалов

Чаще всего в качестве уплотнителя применяется "Фторопласт-4". Основным его достоинством является то, что он работоспособен при длительном прогреве до 200° и выдерживает кратковременный прогрев до температуры 250°.

Уплотнители из полимерных материалов работают в соединениях, показанных на рис.4.

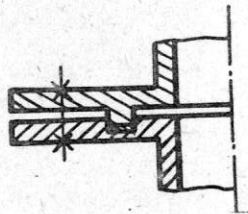


Рис.4. Схема выполнения конструкции стыкового уплотнения с уплотнителем из полимерных материалов.

Особенности конструктивного выполнения уплотнений из фторопласта:

1. Необходимо применять прокладки толщиной  $\delta = (1+2)$  мм.
2. Усилие для разжима уплотнителя должно быть не менее 30 кгс/см<sup>2</sup>.
3. Чистота поверхности деталей, соприкасающихся с уплотни-

телем, должна быть не хуже  $\sqrt{10} \div \sqrt{45}$

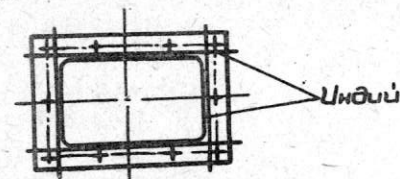
4. Допускаются стыки уплотнителя до 2+3 мест в одном уплотнении, если речь идет о больших размерах. Стыки оформляются как у резиновых уплотнителей, но без проклейки:



### 3.3. Стыковые уплотнения с индиевым уплотнителем

Общие требования и рекомендации к выполнению стыкового уплотнения с индиевым уплотнителем:

1. Усилие на разжим индиевого уплотнителя очень невелико и составляет приблизительно 1 кгс/мм длины.
2. Главный недостаток индия - его чрезвычайно малая упругость, поэтому индиевые уплотнения очень чувствительны к внешним нагрузкам, если не иметь специального компенсатора. В связи с этим болты необходимо использовать с пружинными шайбами или тарельчатыми пружинами.
3. Можно реализовывать уплотнения прямоугольных фланцев с индиевым уплотнителем, причем конструктивно они выполняются следующим образом:



4. Максимально допустимая температура прогрева 100°+110° (температура плавления индия - 157°).

5. Размеры канавок под индиевый уплотнитель 0,3x0,5; 0,4x0,6; диаметр индиевой проволоки  $\phi$  0,6; 0,8; 1 мм - легко получить выдавливанием в ручном винтовом пресса приспособлении через сменный наконечник.

Имеется информация, что в НИИЭФА им.Ефремова освоен выпуск уплотнителя, представляющего собой медную проволоку, гальванически покрытую слоем индия толщиной в несколько  $\mu$ . Эти уплотнения требуют для разжима такого же усилия, как и индиевые

уплотнения, но они гораздо более "упругие" в эксплуатации, чем индиевые. Кроме того, если уплотняющие поверхности выполнены с высокой чистотой, то прогрев допустим до температур  $160^{\circ}\text{--}180^{\circ}$ , т.к. индий, даже расплавляясь, удерживается капиллярными силами и поверхностным натяжением.

Очевидно, если все это так, целесообразно внедрить этот тип уплотнения, освоив сварку или пайку проволоки встык и гальваническое покрытие.

### 3.4. Уплотнения стыковые прогретые

В качестве уплотнителя применяются алюминий, медь, золото, свинец. Наиболее употребительна медь.

Поскольку этот тип уплотнений подробно описан в нормалах, то только несколько специфических замечаний.

3.4.1. Широко употребляемое клиново-канавочное уплотнение имеет следующие недостатки:

- 1) необходимы разные типы фланцев;
- 2) надежность при прогреве гарантируется лишь на малых размерах, с ростом диаметра надежность падает;
- 3) необходимо большое усилие затяжки и, как следствие, предельно большое количество болтов;
- 4) необходимо точное соблюдение допусков для обеспечения равномерного нагружения фланцев при уплотнении и обеспечения разжима уплотнителя в двух местах.

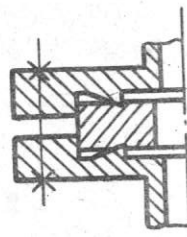


Усилие, необходимое для затяжки уплотнения, около 30 кгс/мм длины.

Поэтому в местах, где происходит уплотнение, должна быть обеспечена высокая чистота уплотняющих поверхностей, что требует высокой квалификации персонала.

3.4.2. Второй, распространенный в ИЯФе тип уплотнителей с металлическим уплотнителем — это уплотнения с плоскими фланцами и круглой медной проволокой, центрируемой по кольцевой детали или по штифтам. Фланцы для этих уплотнений более просты и одинаковы, кроме центрирующего кольца и штифтов. Недостатком является наличие большого усилия затяжки и больших внешних размеров. Однако этот тип уплотнения широко применяется для

отверстий больших диаметров и для прямоугольных окон.  
3.4.3. Металлические уплотнения типа „Conflat“



#### Достоинства:

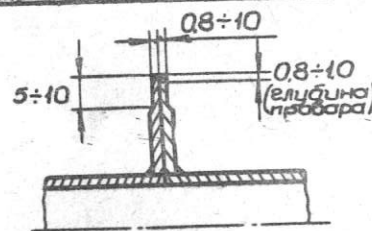
1. Минимальные размеры фланцев.
2. Полностью одинаковые типы фланцев.
3. Минимальные для металлических уплотнений усилия.
4. Высокая надежность при прогреве диаметров до 250 мм.

#### Недостатки:

1. Толстая прокладка.

Во всех случаях высокопрогретного соединения с металлическим уплотнителем необходимо применение нержавеющей крепежа, а не стального из-за большой разности коэффициентов линейного расширения, применение шпилек, а не болтов из-за опасности сваривания в резьбе при прогреве. Кроме того рекомендуется сульфидировать крепеж.

### 3.5. Сварные разборные соединения



#### Основные достоинства:

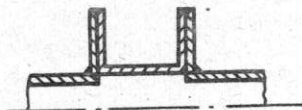
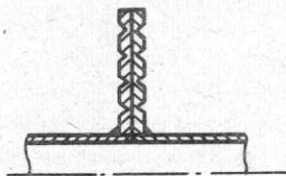
1. Минимальные габариты и вес.
2. Дешевизна.
3. Высокая надежность соединения.
4. Возможность устранения течи после прогрева. (Течь точно

локализуется и заваривается без напуска атмосферы в проверяемый объем).

При необходимости разборки соединения шов спиливается. В настоящее время эту операцию производят вручную напильником. Однако время спиливания не намного превышает время разборки любого другого типа соединений. В принципе же можно сконструировать специальный нож для спиливания шва, что ускорит процесс разборки сварного соединения. Нужны энтузиасты.

Раньше на фланцах пытались делать канавки, но оказалось, что ими плохо пользоваться, т.к. в тонком месте часто возникали течи по цементируемому металлу и, кроме того, облом может произойти не по первой канавке, а по любой другой.

При необходимости частых разборок делают двойные вставки.



#### 4. ОТКАЧНЫЕ СРЕДСТВА

4.1. Поскольку большинство вакуумных насосов способны эффективно работать только в ограниченной области давлений, то обычно процесс откачки, особенно когда речь идет о получении высокого вакуума, состоит из нескольких стадий, каждая из которых предполагает использование разных типов насосов.

Каждое откачное средство характеризуется скоростью откачки, диапазоном давлений, в котором эта скорость откачки реализуется, и предельным минимальным давлением. В табл.5 приведены основные типы откачных средств и их характеристики.

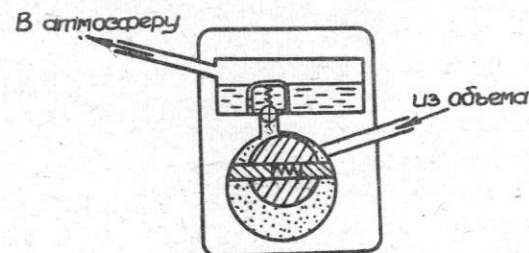
Таблица 5

Основные типы откачных средств

Тип насоса	Диапазон давлений	Ориентировочные скорости откачки, л/сек
Форвакуумные насосы	$1 \text{ атм} + 10^{-3}$	единицы - десятки
Цаолитовые насосы (алюмосиликаты или древесный уголь)	$1 \text{ атм} + 10^{-2}$	единицы
Диффузионные или пароструйные насосы	$10^{-3} + 10^{-6}$	$50 + 10000$
- " - зарубежные	$10^{-3} + 10^{-8}$	$50 + 90000$
Магниторазрядные	$10^{-3} + 10^{-10}$	$5 + 600$
Сорбционные и криосорбционные	$10^{-7} + 10^{-14}$	пропорционально площади
Турбомолекулярные	$10^{-3} + 10^{-9}$	десятки - сотни

#### 4.2. Конструктивные и эксплуатационные особенности широко применяемых в ИЯФ насосов

##### 4.2.1. Форвакуумные насосы



#### Достоинства:

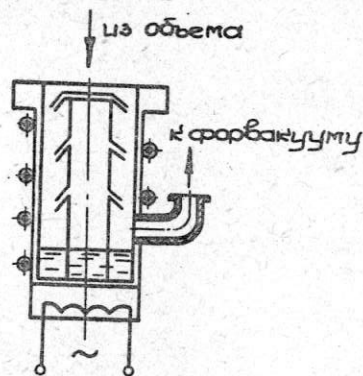
1. Отработанная и надежная промышленно-изготавливаемая кон-

струкция.

**Недостатки:**

1. Необходимость постоянного наблюдения при эксплуатации.
2. Неизбежная миграция паров масла в откачиваемый объем. Для устранения или уменьшения этого эффекта необходимо применение азотных ловушек.
3. Шум, выброс паров масла при работе вблизи атмосферного давления.

4.2.2. Диффузионные насосы



**Достоинства:**

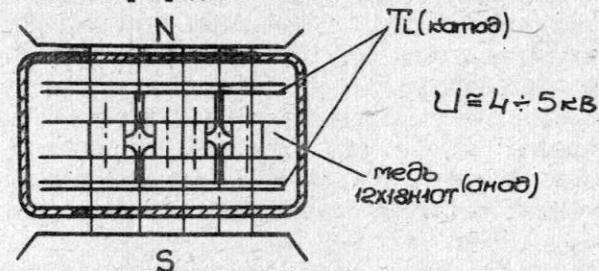
1. Простота конструкции, отсутствие движущихся частей.
2. Промышленное изготовление.
3. Высокая скорость откачки.

**Недостатки:**

1. Миграция паров масла в откачиваемый объем, необходимость применения азотных ловушек.
2. Эксплуатационная ненадежность (мощное электропитание, возможность попадания масла в откачиваемый объем).

В связи с этим диффузионные насосы у нас уступают свое место магниторазрядным. Однако, в последнее время на Западе разработаны новые конструкции диффузионных насосов с улучшенными параметрами.

4.2.3. Магниторазрядные насосы



Механизм работы насоса следующий.

Под воздействием скрещивающегося электрического и магнитного поля в ячейках насоса (ловушка Пеннинга) фоновые электроны начинают участвовать в двух движениях - круговое вокруг силовых линий магнитного поля и поступательное вдоль этих линий (осциллирующее движение). При этом резко возрастает длина свободного пробега и начинается ионизация атомов остаточного газа. Насос имеет два механизма откачки - ионный и геттерный. За счет разности потенциалов ионы устремляются на катоды и прилипают к ним (ионный механизм). При ионной бомбардировке материал катодов (титан) распыляется, осажаясь и на анод, и на стенки камеры, и пленки титана адсорбируют атомы остаточного газа (адсорбционный механизм).

**Достоинства:**

1. Широкий диапазон рабочих давлений.
2. Надежность работы (ненадежным элементом является только ввод).
3. Отсутствие движущихся частей.
4. Удобство эксплуатации.
5. Экономичность.
6. Насос является своеобразной лампой, т.к. разрядный ток пропорционален давлению.
7. Удобство поиска течей.

4.2.4. Сорбционные и криосорбционные насосы.

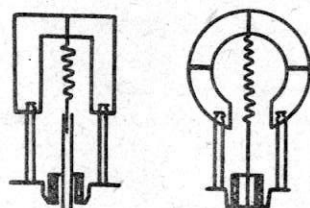
Сорбционной способностью обладают многие материалы: вещества, способные поглощать газы путем химической сорбции и реакции, еще называют геттерами.

В качестве геттеров могут быть использованы титан, тантал, молибден, цирконий и некоторые другие. Наиболее удобно применять титан, т.к. температура распыления его сравнительно не велика ( $\approx 1100^{\circ} + 1250^{\circ}$ ).

Конструкции титановых испарителей могут быть самыми разнообразными. Первоначально использовались титановые проволоки и спирали. В связи с тем, что они очень быстро перегорают, стали использовать сплавы титана с рением, т.к. у рения  $\rho$  меньше, чем у титана.

В настоящее время применяется вольфрам, обмотанный титаном. Возможно также применение твердофазного титанового испарителя.

Первой конструкцией титанового испарителя была конструкция Блинова - ТИБ.



Основные достоинства сорбционных насосов:

1. Чистота насоса.
2. Возможность достижения высоких скоростей откачки простым увеличением сорбирующей поверхности, что особенно важно при сверхвысоком вакууме. Скорость откачки на поверхности, охлаждаемой жидким азотом  $\approx 4$  л/сек.см<sup>2</sup>, а на поверхности, охлаждаемой водой  $\approx 1+2$  л/сек.см<sup>2</sup>.

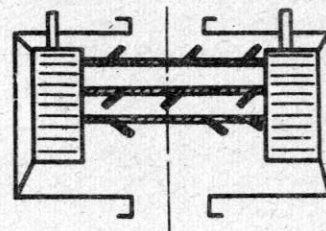
Недостатки:

1. Недопустимы большие газовые нагрузки.
  2. Адсорбирующие пленки должны постоянно обновляться.
  3. Имеется возможность отслоения толстых пленок.
  4. Инертные газы при комнатной температуре адсорбируются плохо.
  5. Необходимо тщательно экранировать все изоляторы.
- 4.2.5. Азотные ловушки.

Применяются азотные ловушки, в основном, двух типов -

проточные и наливные. Первые с большим расходом азота, вторые - с гораздо более умеренным.

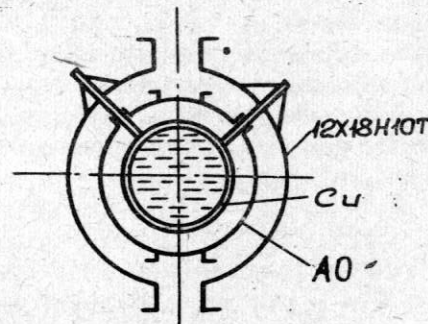
Проточные азотные ловушки, в основном, железного типа и предназначены они для работы с диффузионными и форвакуумными насосами. Их назначение - защищать откачиваемый объем от попадания в него паров масла.



Недостатки:

1. Малая проводимость, т.е. уменьшение эффективной скорости откачки насоса.
2. Большой расход азота.

Наливная азотная ловушка предназначена для увеличения срока работы насосов, для защиты его от остаточного газа объема. В основном применяется вместе с магниторазрядными насосами, особенно если в остаточном газе много водяного пара и органики.



Достоинства:

1. Форма камеры обеспечивает малый расход азота.
2. Высокая проводимость.



#### 4.3. Некоторые указания по конструированию распределенных магниторазрядных насосов

Целью расчета является определение основных размеров насоса (диаметр ячейки, толщина анода, расстояние между катодами, ширина и длина насоса) и выбор анодного напряжения по заданным значениям напряженности магнитного поля, рабочего давления в системе и требуемой скорости откачки.

При расчете прежде всего выбирается минимальное рабочее давление насоса. После этого находят диаметр ячейки из следующего соотношения:

$$\phi = \frac{1}{H} \left[ H \left( \frac{5 \cdot 10^4}{U_a P_{min}} \right)^{1/3} + 3,6 \cdot 10^5 \right]^{1/2}$$

где  $H$  - в эрстедах;

$U_a$  - вольты;

$P_{min}$  - тор.

При распространенных для накопителей значений  $U_a = 5$  кВ и  $P_{min} = 10^{-10}$  тор формула принимает вид:

$$\phi \approx \frac{66}{H^{1/2}}$$

При выборе минимального рабочего давления не следует придерживаться чрезмерно низких значений, т.к. уменьшение минимального давления на порядок приводит к снижению скорости откачки при той же площади на 15+20%.

Следующий этап расчета - определение толщины анода и зазора между анодом и катодом. Если эти размеры ничем не ограничены, то толщину анода надо принимать максимально возможной по условиям зажигания разряда. Причем, отношение толщины анода к диаметру ячейки должно быть равным:

$$\frac{a}{\phi} = 3 + 3,5.$$

При анодном напряжении  $U = (4+5)$  кВ зазор между катодом и анодом -  $\delta$  - надо принимать равным  $(3+5)$  мм в зависимости от площади насоса.

Тогда ширина катода определяется из соотношения:

$$\frac{h}{\delta} \sqrt{S_0} \leq 5$$

где  $h$  - полуширина катода, если газ поступает с двух сторон, и ширина, если газ поступает с одной стороны;

$S_0$  - удельная скорость откачки насоса, определяемая по формуле:

$$S_0 = 32 \cdot 10^6 \frac{a \cdot U_a^{1/2}}{\phi^2} \cdot \eta \left( \frac{H \phi - 3,6 \cdot 10^5}{H \phi} \right) (1 - e^{-25 \eta}) \text{ л/сек см}^2$$

где  $a$  - толщина анода, в см;

$U_a$  - анодное напряжения, в В;

$\phi$  - диаметр ячейки, в см;

$\eta$  - коэффициент заполнения площади насоса ячейками;

$H$  - напряженность магнитного поля, в эрст.

И наконец, по требуемой скорости откачки определяется площадь насоса

$$F = \frac{S}{S_0}$$

Мощность, выделяющаяся при разряде на насосе, можно оценить по следующей формуле:

$$N = (10 \div 30) S_0 P U_a \text{ Вт/см}^2$$

где  $S_0$  - удельная скорость откачки, л/сек·см<sup>2</sup>.

Т.к. удельная мощность на электродах при вакууме  $10^{-6}$  и лучше очень мала, не надо заботиться об охлаждении системы. Поэтому анод можно делать сотовой конструкции с ячейками из тонкой нержавеющей ленты. Для насоса, работающего при худшем вакууме, анод надо делать из меди, а катоды целесообразно прикреплять к корпусу, т.к. они тоже нуждаются в охлаждении, ибо ионная компонента в Пеннинговском разряде по мощности составляет 30+50%. Конструкция насоса должна предусматривать высоко-температурный прогрев, т.е. необходимо учитывать разность коэффициентов линейного расширения (для титана  $\sim (7+8) \cdot 10^{-6}$  и для нержавеющей или меди  $16 \cdot 10^{-6}$ ). Кроме того, должна обеспечиваться надежная экранировка мест крепления потенциального электрода к изолятору, чтобы не было запыления и утечки тока, т.к. тогда измерение давления по разрядному току невозможно.

## 5. ОСОБЕННОСТИ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ НАКОПИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Большинство современных накопителей заряженных частиц, особенно на энергии свыше 1 ГэВ, выполняется с жесткой фокусировкой. Это позволяет уменьшить требуемые размеры апертуры, экономить вес и размеры накопителя, снизить затраты на электропитание.

Требуемый вакуум в накопителе составляет  $10^{-9} + 10^{-10}$  тор, т.к. пучок заряженных частиц должен существовать в нем часами без заметных потерь на рассеивание на остаточном газе. В условиях малых апертур, особенно для накопителей с 0-образным магнитом, применение больших скоростей откачки в промежутках между магнитами перестает быть рациональным, т.к. нельзя получить высокую эффективную скорость откачки, которая будет ограничиваться малой проводимостью вакуумной камеры. Примером могут служить накопители ВЭП-3 и ВЭП-4, где длина магнитов около трех метров, а размер камеры 30x70.

В накопителях электронов и позитронов к обычному гажению стенок вакуумной камеры добавляется так называемая, стимулированная десорбция, т.е. гажение под действием синхротронного излучения. Причем, расчеты показывают, что при достаточно больших токах стимулированная десорбция в 5+10 раз (в зависимости от тока) начинает превышать гажение стенок камеры.

Отсюда следует два важных для конструктора вакуумной камеры выводы:

1. Необходимо в первую очередь стремиться уменьшить стимулированное гажение путем применения специальных устройств - приемников излучения.

2. Целесообразно иметь откачку непосредственно вблизи источника гажения, т.е. в вакуумной камере следует располагать распределенные магниторазрядные насосы, работающие в собственном магнитном поле ускорителя (накопителя).

## 6. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

6.1. Ленточный. Представляет собой тонкую ленту из тантала (или молибдена), расположенную на наружной стенке вакуумной камеры на керамических изоляторах. Ее можно хорошо обезгазить, пропуская ток по ленте.

### Достоинства:

1. Простота конструкции.

### Недостатки:

1. Малые снимаемые мощности.
2. Занята вся наружная стенка.
3. Большое рассеянное излучение.

6.2. Трубчатый. Представляет собой медную трубку с водой, которая иногда может быть позолоченной.

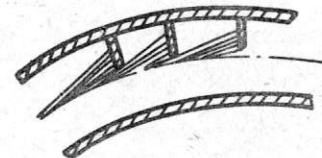
### Достоинства:

1. Возможность снятия больших мощностей.

### Недостатки:

1. Трудность ремонта и замены.
2. Занята вся наружная стенка.
3. Большое рассеянное излучение.

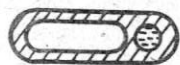
6.3. Стержневые.



### Достоинства:

1. Возможность снятия больших мощностей.
2. Мобильность и легкость выполнения ремонта.
3. В основном свободная передняя стенка вакуумной камеры дает возможность постановки на ней исследовательской аппаратуры, насосов, легкого вывода СИ и т.п.
4. В отличие от двух предыдущих случаев имеет место малое отраженное излучение.

В зарубежных накопителях электронов, предназначенных для работ по физике высоких энергий (исключая работы с СИ), вакуумная камера часто изготавливается из прессованного алюминия следующей формы:



У нас же еще не освоена технология получения надежного вакуумно-плотного соединения алюминия с IZK18H10T.

## 7. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

### 1. Повышенные требования к натеканию и удельному газотделению

Т.е. необходимо тщательно подготавливать материалы: очищать, предварительно прогревать и т.д. Необходимо помнить, что течееискание при изготовлении нужно проводить только после прогрева.

### 2. Конструкция установки должна предусматривать прогрев.

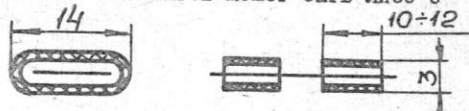
Т.е. возможность прогрева должна быть технически обеспечена применением компенсаторов в виде разного рода упругих элементов, компенсирующих тепловые расширения. Необходимо тщательно учитывать перемещения, деформации и напряжения, вызываемые разностью коэффициентов линейного расширения. Из формулы:

$$\sigma = E \Delta t \alpha$$

где  $E$  взято для того материала, в котором определяются напряжения, видно, что возникающее при прогреве напряжение не зависит от длины.

Особо необходимо учитывать прогрев дуговых элементов, т.к. они при увеличении температуры переходят на больший радиус, а если такая возможность отсутствует, подвергаются дополнительным нагрузкам.

Конструкция нагревательных элементов может быть либо с изоляторами из керамики:



либо с изоляцией из слюды, пропитанной термостойким клеем.



Не рекомендуется помещать нагреватели внутрь вакуумного объема, т.к. это ведет к увеличению газовыделяющей поверхности и устройству дополнительных вводов. В связи с этим их лучше располагать снаружи и экранировать.

Обычно при прогреве прогреваемое изделие экранируется асбестом или стеклотканью. Фирма «Varian» делает готовые накладные печи с тепловой экранировкой.

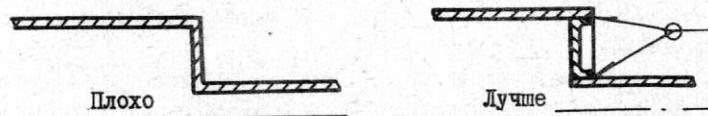
### 3. Необходим тщательный выбор материалов.

Это относится к маркам материалов, сортаменту, способам обработки, методам испытаний.

Рекомендуется не применять обычные стали без крайней необходимости, т.к. они ржавеют и плохо варятся.

Категорически запрещена латунь.

Детали с тонкими стенками изготавливаются только с учетом направления проката и их нужно предварительно прогревать.



Для высоковакуумных прогревных соединений надо стараться, чтобы швы располагались снаружи – вопреки литературным данным, т.к. вопросы простоты эксплуатации и ремонта в сложных установках доминируют.

Надо стараться не применять неметаллических материалов, кроме стекла и керамики, в отдельных специально обоснованных случаях – фторопласт.

### 4. Избегать лишних разъемных соединений.

Необходимо заменять их на сварные соединения.

### 5. В ответственных узлах надо использовать дополнительную вакуумную защиту.

(см. раздел 2 стр.10).

6. Рекомендуется широко использовать распределенную откачку, особенно, когда есть магнитное поле (ускорители, спектрометры, детекторы и т.п.).

7. Превращение всего откачиваемого объема в насос.

Например, помещение в него распылителя-сорбента и т.п.

8. Необходима особая аккуратность в применении пайки.

Нельзя использовать припой ПСР-45 и другие цинкосодержащие припои. Желательно применять только бесфлюсовую пайку (например, пайку в вакууме), особенно для соединений типа "вода - вакуум", т.к. остатки флюса в паяном шве легко разрушаются при прогревах и при всех электрохимических процессах.

9. Вводы должны быть только силиконовые или с разделителями.

10. Необходимо применять высокие скорости откачки, т.е. насосы надо сажать непосредственно на объем для обеспечения минимальной потери проводимости.

II. В состав вакуумной системы установки должны входить:

- Рабочие элементы вакуумной камеры с разделительными шиберами.
- Основные откачивающие насосы - черновые и чистовые. Желательно, чтобы каждый насос отсекался своим шибером.
- Форвакуумная система (насос, магистрали, коммутационные элементы).
- Места для возможного подсоединения течеискателя.
- Места для манометрических ламп.
- Места для установки омегатрона.
- Датчики вакуума.
- Блокировочные устройства (аварийные шибера, выключение питания насосов и т.д.).

#### Список литературы

1. А.В.Балицкий. "Технология изготовления вакуумной аппаратуры". М., 1974.
2. Г.Левин. "Основы вакуумной техники". М., 1969.
3. С.Дэшман. "Научные основы вакуумной техники". М., 1964.
4. М.Д.Малев, Э.М.Трахтенберг. "Конструирование и расчет магниторазрядных насосов". Препринт ИЯФ, Новосибирск 1969 год.