



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Э. Фишер

P-767

СВЕРХВЫСОКИЙ ВАКУУМ

Сообщение на научном семинаре  
Лаборатории высоких энергий 14 июля 1961 года

Дубна 1961

Э. Фишер<sup>x/</sup>

P-767

СВЕРХВЫСОКИЙ ВАКУУМ

Сообщение на научном семинаре  
Лаборатории высоких энергий 14 июля 1961 года

1139/3 мр.

<sup>x/</sup> ЦЕРН, Женева

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БНБ ЛИНЦ

## ВВЕДЕНИЕ.

За последнее время современная техника сделала доступной экспериментаторам новую область вакуума: это так называемый "сверхвысокий вакуум". Это слово обозначает вакуум в диапазонах  $10^{-8}$ ,  $10^{-9}$  и  $10^{-10}$  торр. Еще несколько лет тому назад такой вакуум был получен только в маленьких стеклянных установках, но техника так развилась, что сверхвысокий вакуум теперь стал возможным в таких больших металлических установках, как в вакуумной камере ускорителя, с внутренней поверхностью в несколько квадратных метров или несколько десятков квадратных метров.

Сильнейшим стимулом для развития этой новой техники были жесткие требования к чистоте газов в экспериментах по термоядерным реакциям. Но совершенно естественно, что скоро нашлись еще другие применения. В качестве примера можно привести вакуумное осаждение полупроводников в тонких слоях и искусственное создание условий верхней атмосферы для испытания аппаратуры для космических исследований.

Все системы сверхвысокого вакуума имеют те общие черты, что для вакуумных камер почти исключительно употребляется нержавеющей сталь, что все фланцевые соединения уплотняются металлическими прокладками и что вся камера и верхние части насосов нагреваются для выделения газов в течение суток или больше при температурах от 300 до 400<sup>0</sup>С. В других вопросах, например, о том, какой насос наиболее эффективен, имеются еще разногласия.

Мы в ЦЕРН'е интересуемся сверхвысоким вакуумом в ускорительной физике для экспериментов с накоплением пучков, так как

время жизни частиц в обыкновенном вакууме — около  $10^{-6}$  торр — слишком коротко.

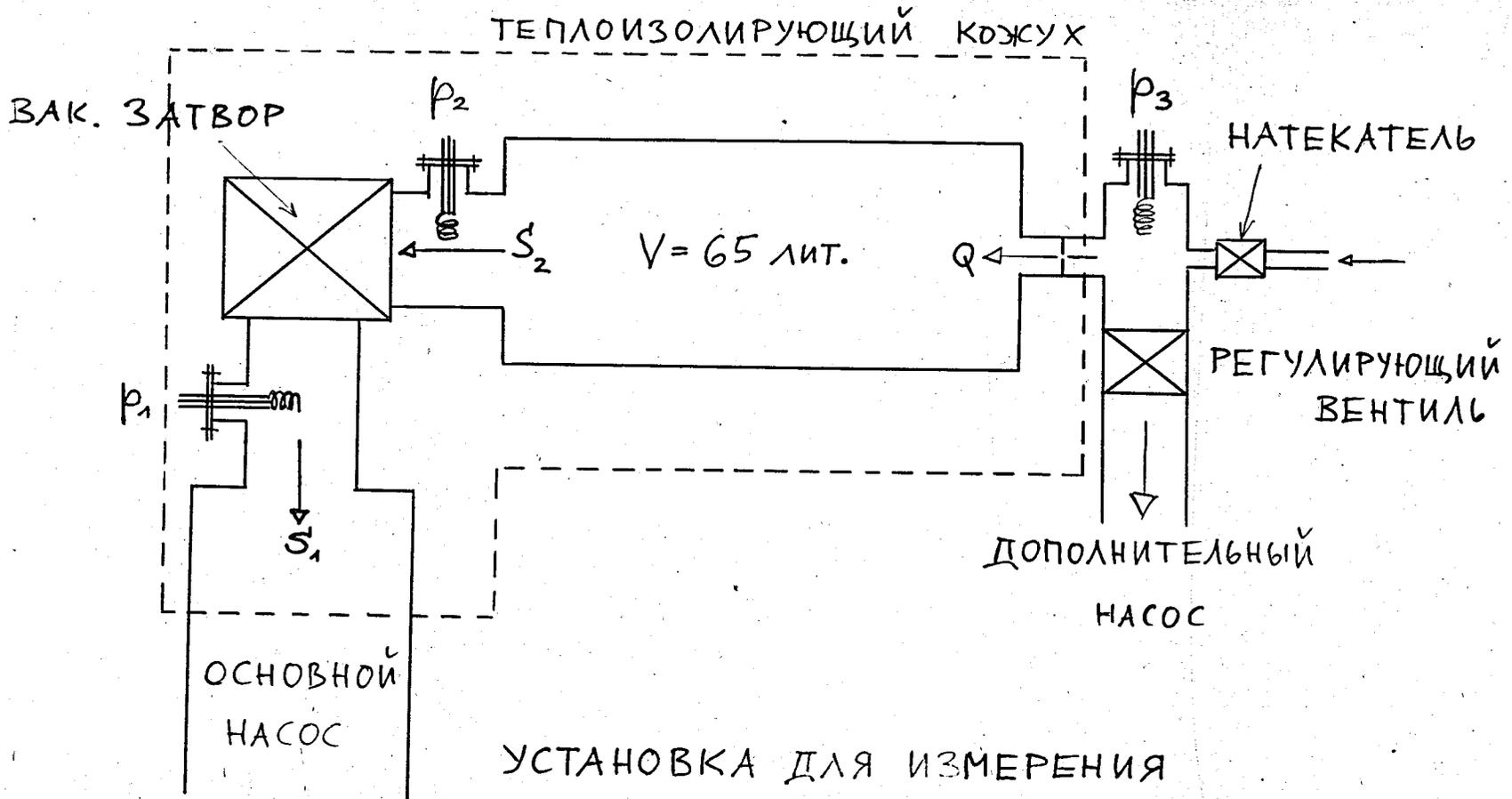
С 1958 года мы изучали в маленькой группе всевозможные вопросы создания сверхвысокого вакуума. Кроме наших собственных опытов, мы пользовались результатами опытов, сделанных в разных европейских лабораториях, например во французском Центре ядерных исследований в Сакле под Парижем, в Институте им. Макса Планка по физике и астрофизике в Мюнхене и в лаборатории "ДЕЗИ" в Гамбурге, где строится электронный синхротрон на энергию 7 Бэв.

Мы посещали все крупнейшие фирмы, занимающиеся вакуумным оборудованием, во Франции, в Германии и в Англии и знакомились с их производством и проектами в области сверхвысокого вакуума. Затем, когда окончательно было принято решение о постройке модели накопительного кольца для электронов с энергией в 2 Мэв, мы занялись разработкой вакуумной системы этой модели, т.е. камеры, насосных установок и измерительных приборов.

Я собираюсь вам рассказать сначала, каким методом мы измеряли скорость откачки разных насосов в области  $10^{-9}$  торр. Затем я опишу самые интересные из исследованных насосов и объясню, какую систему откачки мы решили применить для нашей модели. Наконец, я буду говорить о некоторых технических подробностях (сварка, фланцевые соединения и электрические вводы). При этом я затрону все важные технические проблемы, возникающие перед экспериментатором, занимающимся сверхвысоким вакуумом.

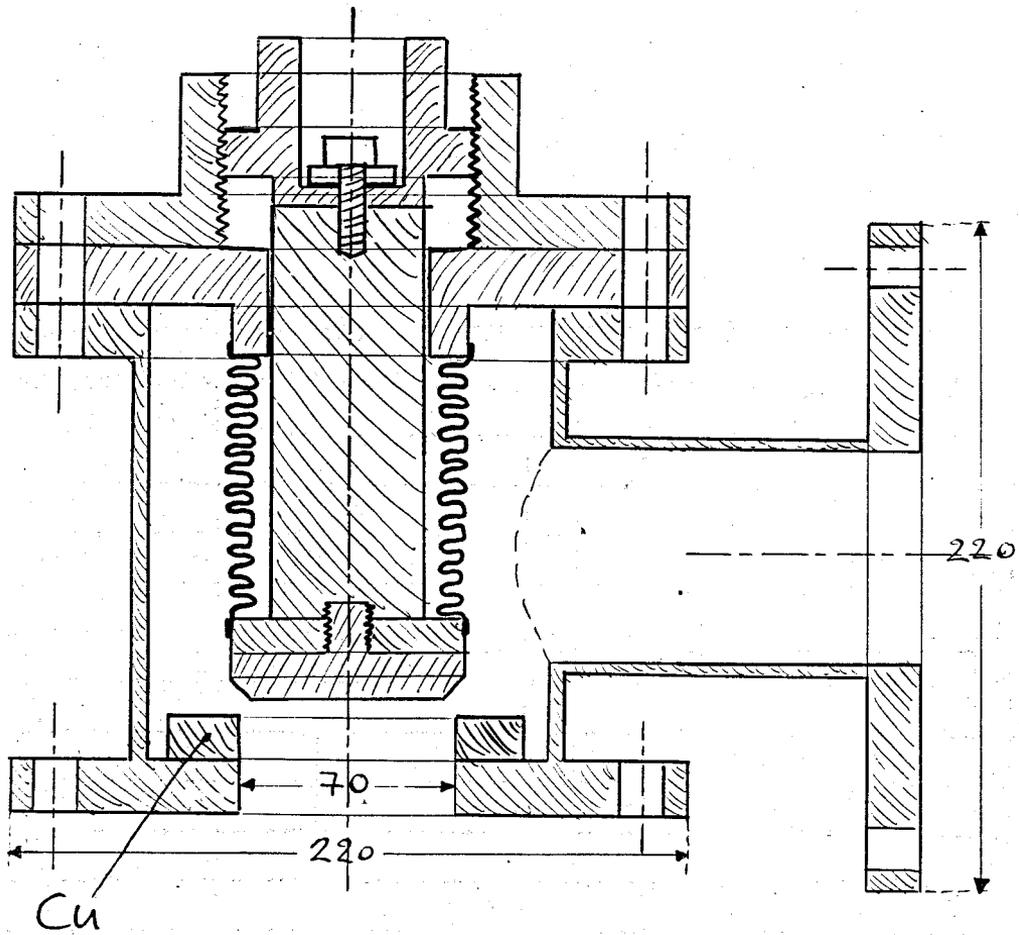
#### ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ОТКАЧКИ

Скорость откачки разных насосов в области сверхвысокого вакуума измерялась с помощью установки, показанной на рисунке I.



УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
 СКОРОСТИ ОТКАЧКИ

РИСУНОК 1



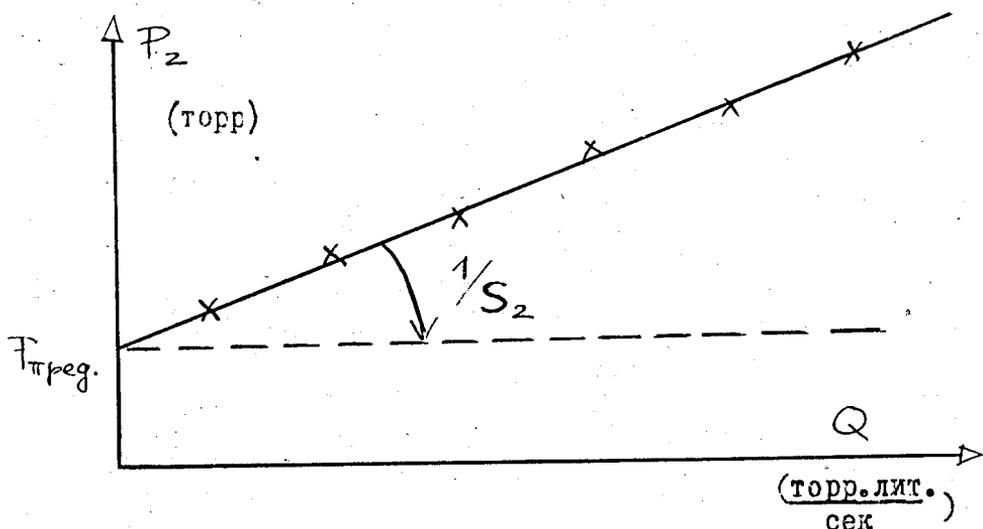
ВСЕ ОСТАЛЬНОЕ:  
НЕРЖ. СТАЛЬ

ВАКУУМНЫЙ ЗАТВОР  
РИСУНОК 2

Насос, который исследуется, откачивает вакуумную камеру с емкостью в 65 литров. Между насосом и камерой находится вакуумный затвор с проводимостью в 70 литров в секунду. Затвор показан на рисунке 2. Когда затвор закрывается, конический клапан из нержавеющей стали опирается на край медного кольца. Двигающийся стержень затвора уплотняется сильфоном из нержавеющей стали. Медное кольцо и промежуточный фланец уплотняются прокладкой из золота. На конце камеры, противоположном затвору, находится диафрагма с небольшим отверстием, проводимостью в 0,08 лит./сек. для натекания газов. Скорость натекания в камеру, которую принято измерять в торр.литр в секунду, регулируется с помощью дополнительного насоса, натекателя и вентиля. Вся установка сделана из нержавеющей стали. Область сверхвысокого вакуума, от основного насоса до диафрагмы, может нагреваться до 400 градусов. Давление измеряется в трех местах, на обеих сторонах затвора и у диафрагмы со стороны дополнительного насоса, с помощью ионизационных манометров.

Принцип измерения следующий: При открытом вакуумном затворе создается с помощью натекателя некоторое давление  $P_3$ , которому соответствует некоторая скорость натекания  $Q$ . Измеряется давление  $P_1$  и  $P_2$  при установленной скорости натекания. Затем закрывается вакуумный затвор и измеряется скорость изменения давления во времени  $\frac{dP_2}{dt}$ . Из этого значения вычисляется скорость натекания  $Q = V \cdot \frac{dP_2}{dt}$ , где  $V$  - емкость камеры в литрах. Эти операции повторяются при разных давлениях  $P_3$ , то есть при разных скоростях натекания.

Результаты сводятся в график: давления  $P_2$  в зависимости от скорости натекания.



Получается прямая. Скорость откачки  $S_2$ , т.е. в месте измерения давления  $P_2$ , является обратной величиной наклона этой прямой

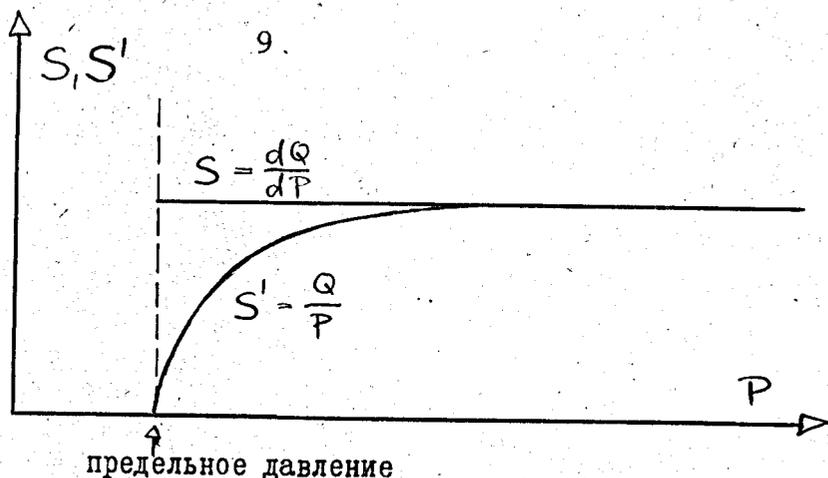
$$S_2 = \frac{dQ}{dP_2}$$

Или лучше сказать, скорость откачки определяется данным уравнением.

Необходимо отметить, что в литературе встречается другое определение скорости откачки, именно

$$S' = \frac{Q}{P}$$

В последнем случае скорость откачки имеет нулевое значение при предельном давлении данного насоса, между тем как скорость, определяемая с помощью дифференциального выражения, является практически постоянной, даже вблизи предельного вакуума.



Мы предпочитаем определение  $S = \frac{dQ}{dP}$ . Преимуществом описываемого метода измерения является тот факт, что и давление и скорость натекания измеряются тем же самым манометром, так что градуировка манометра не влияет на измерение скорости откачки. Лишь требуется, чтобы манометр был линейным в интервале двух порядков величины давлений. Является известным фактом, что чувствительность ионизационного манометра в области сверхвысокого вакуума очень плохо определяется, так как градуировка возможна только при вакууме  $\sim 10^{-5}$  торр. А в области  $10^{-9}$  торр можно верить манометру в самом лучшем случае в пределах  $\pm 20\%$ . Поэтому неудобно, если эта ошибка входит в измерения скорости откачки. В отличие от этого описанный метод позволяет измерять скорость откачки с ошибкой  $\pm 3\%$ .

Недостатком метода является то, что измеряется не непосредственно скорость откачки насоса, а скорость откачки насоса в комбинации с затвором. Но проводимость затвора можно измерять в области обычного высокого вакуума. Скорость откачки самого насоса вычисляется из известной формулы

$$\frac{1}{S_k} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{L}$$

где  $S_k$  - скорость комбинации,  $S_H$  - скорость насоса и  $L$  - проводимость затвора.

Скорость откачки самого насоса можно определять кроме того из измерения давления  $P_1$ , которое измеряется между затвором и насосом, из формулы

$$S_H = S_1 = \frac{Q}{\Delta P_1}$$

$\Delta P_1$  - разница давления  $P_1$  при открытом и закрытом затворе и  $Q$  скорость натекания, которая измеряется с помощью скорости повышения давления  $P_2$ . Однако этот метод является из-за отмеченных ранее причин менее точным чем другой метод, где давления измеряются тем же самым ионизационным манометром.

Кроме областей со сверхвысоким вакуумом на каждом испытуемом насосе мы измеряли скорость откачки в областях  $10^{-5}$  торр. При этом мы употребляли обыкновенный метод натекания воздуха через игольчатый вентиль, где давление на входной стороне вентиля является атмосферным. Измеряется давление и скорость натекания, которая определяется повышением уровня масла в градуированной стеклянной трубочке во времени.

$$Q = P_{\text{атм.}} \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

где  $\Delta V$  - объем натекаемого воздуха в литрах и  $\Delta t$  - интервал времени в секундах.

Следует сказать, что все измерения скоростей и разработка метода были сделаны у нас молодым французским физиком М.Тери.

ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИЙ  
КОЖУХ

$N_2$  (ИЛИ ФРЕОН  
ИЛИ  $H_2O$ ).

$H_2O$

800

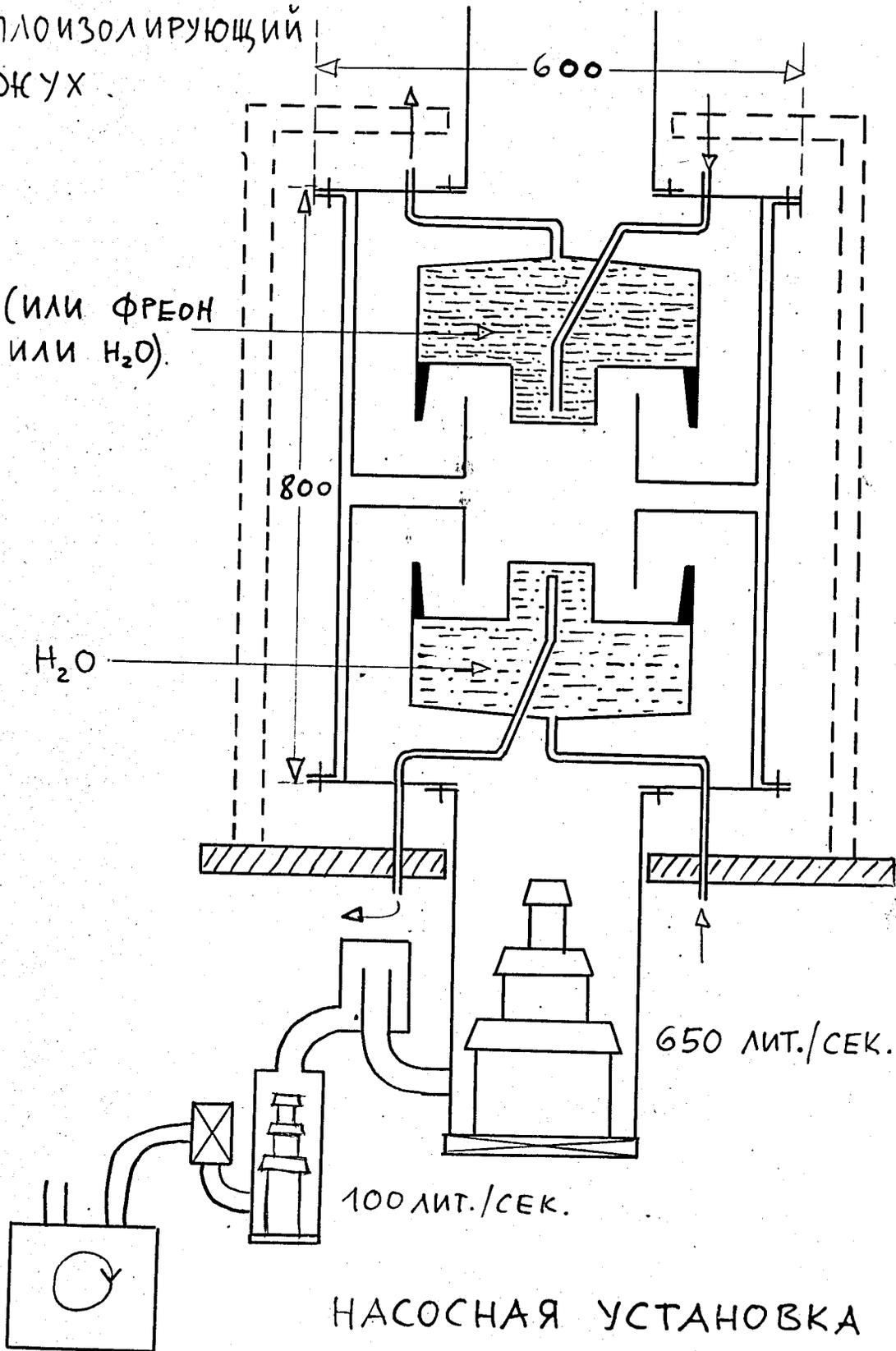
600

650 ЛИТ./СЕК.

100 ЛИТ./СЕК.

НАСОСНАЯ УСТАНОВКА

"БАЛЬЦЕРС", ЛИХТЕНШТЕЙН  
РИСУНОК 3



УСТАНОВКА "БАЛЬЦЕРС" (Рис.3).

Первая насосная установка, с которой мы получили вакуум менее чем  $10^{-9}$  торр, была установка, сделанная Лихтенштейнской фирмой "Бальцерс". В основе установки лежит обыкновенный масляный диффузионный насос со скоростью откачки в 650 литров в секунду.

Предельный вакуум, который можно получить с масляным диффузионным насосом, зависит от масляных паров попадающих из насоса в вакуумный объем. Поэтому основные условия получения сверхвысокого вакуума с масляным диффузионным насосом состоят в том, чтобы препятствовать парам попасть в объем. При этом самую важную роль играют не пары самого масла, а продукты распада масла вследствие окисления и в особенности вследствие крекинга на горячих частях насоса.

Поэтому первая цель состоит в уменьшении крекинга. Было выбрано масло, которое очень устойчиво относительно крекинга: кремниевое масло DC 704 (США). Во-вторых нужно как можно быстрее откачивать продукты крекинга. Для этой цели ставится небольшой дополнительный масляный диффузионный насос со скоростью откачки в 100 литров в секунду между основным насосом и форвакуумным насосом. Одновременно этот насос препятствует масляным парам из форвакуумного насоса попадать в основной диффузионный насос и портить там масло.

Главной частью установки является большая комбинированная ловушка. Она сделана из нержавеющей стали и охлаждается в нижней части водой и в верхней части жидким азотом или фреоном или просто водой. Чтобы препятствовать маслу мигрировать вдоль стенки в объем, тонкие промежуточные стенки вмонтированы так, что края их находятся приблизительно при температуре охлаждающей жидкости. Вся ловушка вместе с верхней частью насоса и с вакуумным объемом прогревается в течение суток или больше при температуре  $350 + 400^{\circ}\text{C}$ . Все фланцы уплотнены золотом. Скорость откачки насоса уменьшается ловушкой до 100 лит/сек.

На установке получается вакуум  $3 + 5 \times 10^{-10}$  торр приблизительно через сутки после окончания прогрева. Но самым неожиданным на этой установке оказался факт, что тот же самый вакуум получается даже без охлаждения ловушки жидким азотом, а просто водой. И в этом случае вакуум поддерживался на значении  $3 + 5 \times 10^{-10}$  торр в течение всего опыта (шесть недель). При этом опыте к установке был присоединен объем в 65 литров.

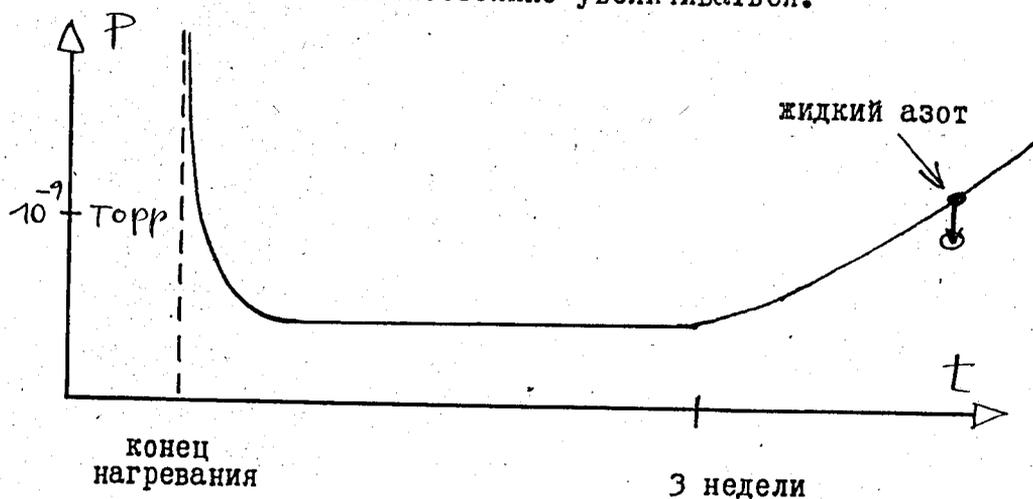
Опыт показывает, что отполированная поверхность нержавеющей стали после продолжительного откачивания при температуре выше 300 градусов имеет хорошие абсорбирующие свойства для масляных паров.

Этот факт подтверждается рядом других опытов. Вот один пример: Мы откачивали в качестве модели вакуумной камеры для ускорителя трубу из нержавеющей стали с длиной в 3 метра и с внутренним диаметром в 80 миллиметров. Мы нагревали камеру, т.е. трубу, с помощью переменного тока в 800 ампер, между тем как остальная часть установки не была нагрета. После суточного нагревания на  $300^{\circ}$  и охлаждения мы получили вакуум  $3 \times 10^{-8}$  торр на ближайшем к насосу конце трубы и  $3 \times 10^{-9}$  торр на другом конце. Это как раз обратное явление чем в обыкновенной ненагретой системе, где давление всегда тем выше чем больше расстояние от насоса. Это явление сохранялось в течение суток, после чего мы прекратили опыт.

Кроме того мы неоднократно замечали, что в вакуумной камере из нержавеющей стали, после того, как насос перекрылся с помощью вакуумного затвора, давление увеличилось лишь незначительно, до стабильного значения между  $10^{-9}$  и  $10^{-8}$  торр. Это конечно возможно только при абсолютной плотности камеры, так как по всем указаниям азот почти не абсорбируется нержавеющей сталью.

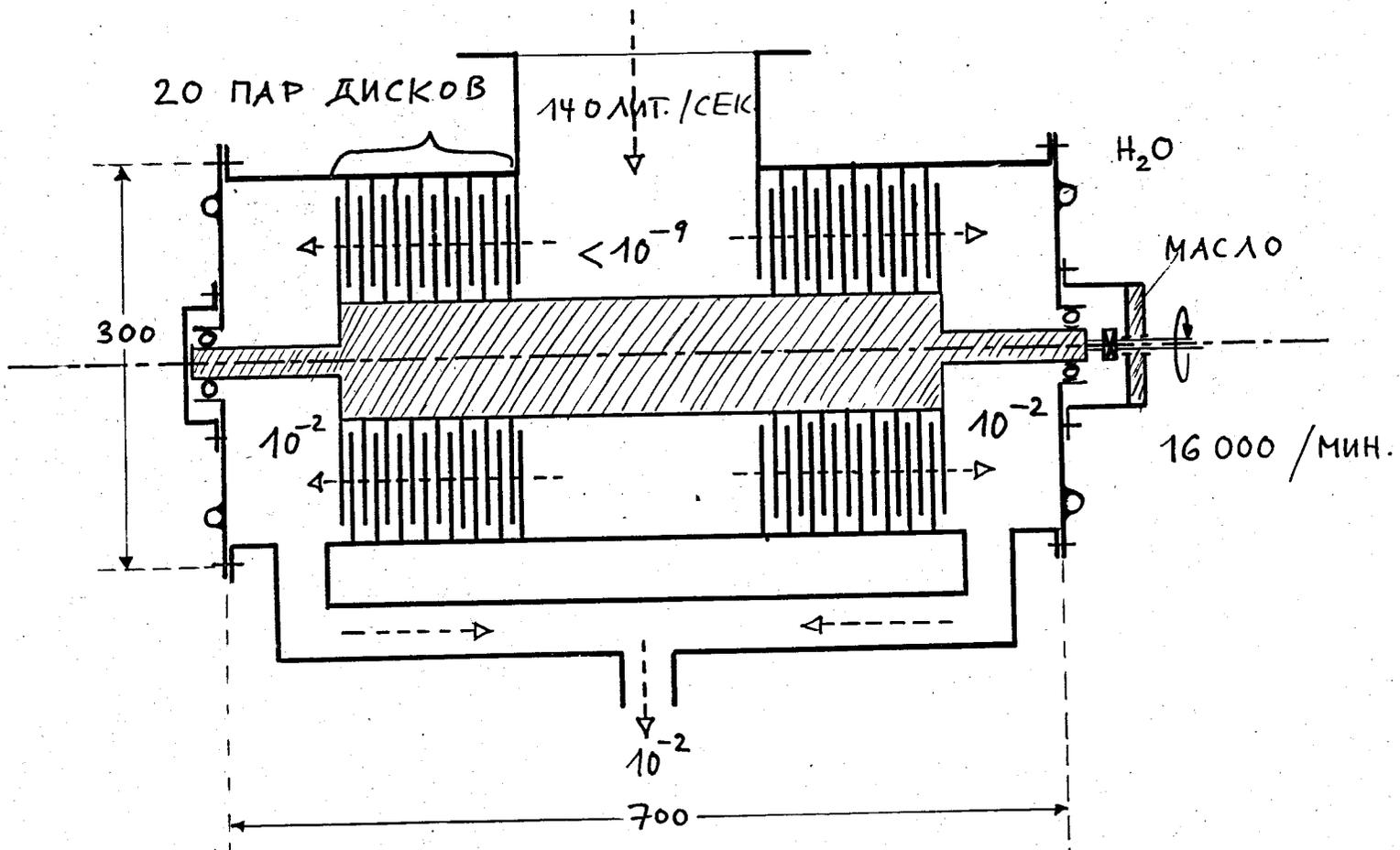
НАСОС "LBP".

Другая установка с масляным насосом с ловушкой, которую мы испытали, была сделана французской фирмой "LBP". Установка похожа на установку "Бальцерс", только ловушка из нержавеющей стали меньше по размеру. Мы на этой установке тоже получили вакуум  $5 \times 10^{-10}$  торр без жидкого азота, но оказалось, что через 3 недели давление стало постоянно увеличиваться.



Предполагается, что "время жизни сверхвысокого вакуума" пропорционально поверхности ловушки. Интересно, что после увеличения давления даже при заливке жидкого азота в ловушку вакуум не достигает старого уровня. Предполагается, что виновата в повышении давления больше всего окись углерода,  $\text{CO}$ , потому что  $\text{CO}$  не вымораживается при температуре жидкого азота. Это наглядно демонстрирует, что на хорошо сделанной вакуумной установке охлаждение жидким азотом совершенно неэффективно и также мало полезно после ухудшения вакуума.

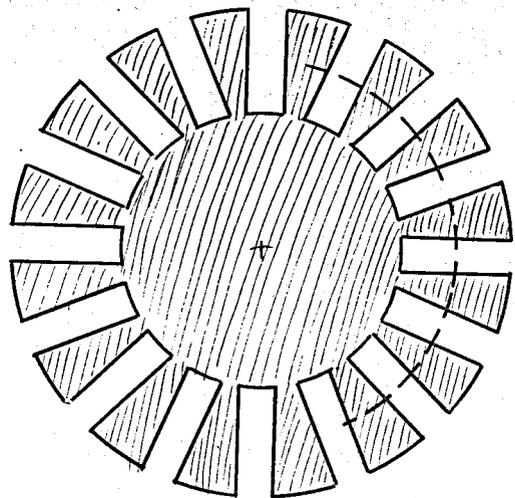
В заключение можно сказать, что масляный насос с большой ловушкой из нержавеющей стали является хорошим прибором для



ТУРБО-МОЛЕКУЛЯРНЫЙ НАСОС "ПФАЙФФЕР", ФРГ

РИСУНОК 4

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

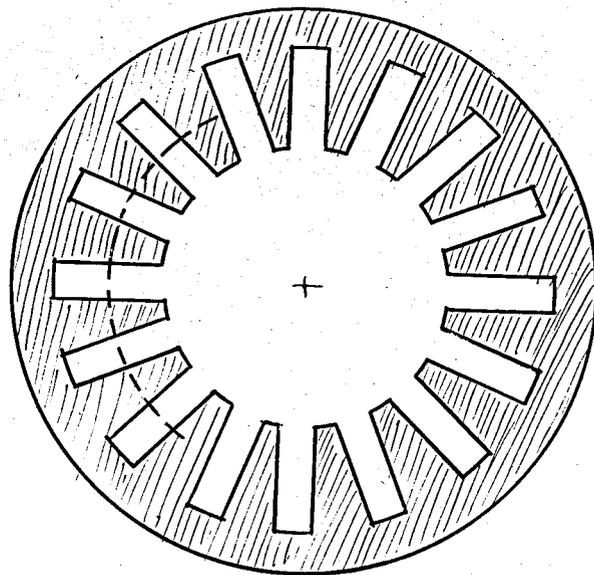


РОТОРНЫЙ ДИСК



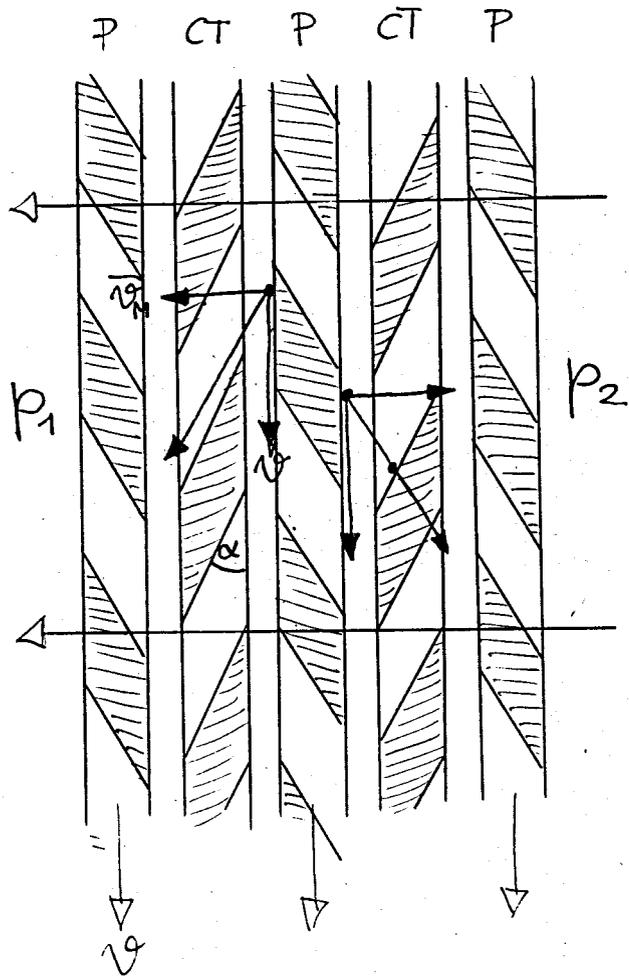
СЕЧЕНИЕ ПО ----

1139/5 чр



СТАТОРНЫЙ ДИСК

НАСОС "ПФАЙФФЕР"  
РИСУНОК 5



$$\varphi \approx \overline{\varphi}_M \cdot \tan \alpha$$

$$\frac{P_1}{P_2} = e^{n\varphi}$$

$$C = C(\alpha, M, \varphi)$$

$$\alpha_1 = 30^\circ \quad \alpha_2 = 45^\circ$$

$$n = 20$$

$$\frac{P_1}{P_2} \approx 10^8 \text{ для } N_2$$

$$\frac{P_1}{P_2} \approx 10^5 \text{ для } H_2$$

НАСОС "ПФАЙФФЕР"

РИСУНОК 6

вакуума  $10^{-9}$  торр. и выше. Такие установки успешно работают во многих лабораториях в Западной Европе и в США.

### НАСОС "ПФАЙФФЕР"

Другим насосом, который мы исследовали, является турбомолекулярный насос, сделанный немецкой фирмой "Пфайффер". Схематическое сечение этого насоса изображено на рисунке 4. Насос состоит в основном из статора и ротора, вращающегося со скоростью 16 тысяч оборотов в минуту. На статоре и на роторе попеременно смонтированы диски. В дисках выфрезерованы радиальные щели под некоторым углом с плоскостью дисков, как показано на рисунке 5. Толщина дисков 2 мм и их расстояние друг от друга 1 мм.

Можно рассмотреть каждую пару состоящую из роторного и статорного дисков как турбину, транспортирующую газ от центра насоса к его концам. Посмотрим поближе, как действует эта турбина. На рисунке 6 показано сечение нескольких дисков. Щели в роторных дисках вырезаны под обратным углом по отношению к статорным. Роторные диски двигаются со скоростью  $v$  относительно к статорным. Посмотрим на молекулу, которая находилась на роторном диске и отлетает в среднем перпендикулярно к поверхности диска, если рассматривать это в системе покоя ротора. В системе покоя статора, однако, приходится учитывать скорость ротора. Результирующий вектор скорости молекулы, которая отлетает от ротора, направлен вперед по вращению ротора. Угол  $\alpha$ , под которым диски вырезаны, выбран так, что приблизительно

$$v \approx \bar{v}_m \cdot \tan \alpha$$

где  $\bar{v}_m$  — средняя тепловая скорость молекулы. Таким образом молекула, которая отлетает на левую сторону, имеет вероятность приблизительно в пятьдесят процентов перелетать через щель статорного диска на следующий роторный диск. Однако молекула, которая отлетает в правую сторону, непременно попадет на статор. Подобным образом можно рассматривать молекулы отлетающие от статорного диска. Молекулам, отлетающим налево, вращение ротора помогает перелетать через роторный диск на следующий диск статора. Молекула отлетающая направо непременно падает на ротор. Учитывая все эти вероятности получаем

$$\frac{P_1}{P_2} = e^{nc}$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — давления на обеих сторонах группы дисков,  $n$  — число пар дисков и  $c$  постоянная, зависящая от молекулярного веса, скорости  $v$  и угла  $\alpha$ . В исследованном насосе было  $n=20$  и  $\alpha$  в первых 10 парах (со стороны высокого вакуума)  $45^\circ$  и в других 10 парах  $30^\circ$ . Соотношение давлений получается

$$\frac{P_1}{P_2} \approx 10^8 \quad \text{для } N_2$$

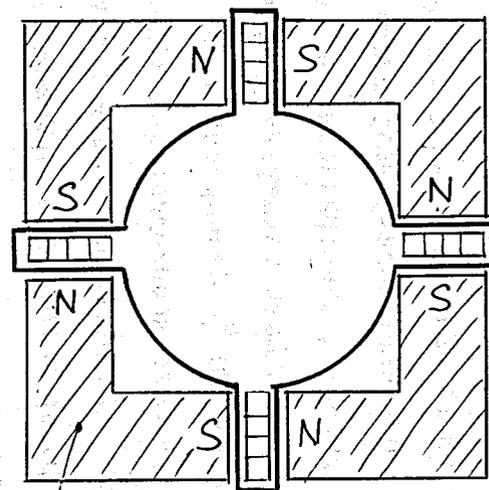
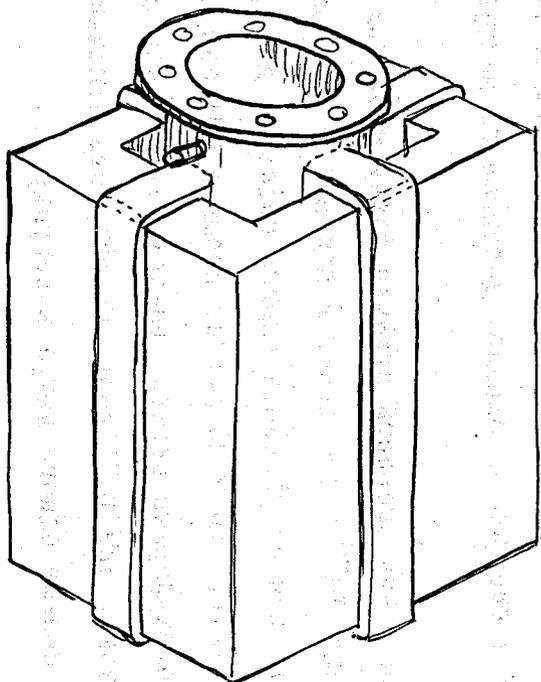
$$\frac{P_1}{P_2} \approx 10^5 \quad \text{для } H_2$$

Плохое соотношение для водорода объясняется тем, что средняя молекулярная скорость для водорода так велика что скорость ротора слабо влияет на результирующую скорость водородных молекул.

Концы оси ротора вращаются в шарикоподшипниках, которые смазываются и в то же время охлаждаются циркулирующим маслом. Подсоединение ведущего вала к ротору осуществляется через карданную муфту. Вал уплотняется двойной резиновой манжетой с масляным наполнением. Небольшой диаметр ведущего вала, порядка  $2 + 3$  мм, для уменьшения окружной скорости, облегчает задачу вакуумного уплотнения. Снаружи на насосе смонтированы электрические нагревательные элементы которые позволяют повышать температуру средней части насоса до  $150^{\circ}\text{C}$  и фланца до  $200^{\circ}$ . Одновременно оба конца насоса охлаждаются водой. Нагревание необходимо как и при каждой системе сверхвысокого вакуума для выделения газов с внутренних поверхностей. К сожалению, ротор нагревается приблизительно только до  $60^{\circ}$ . Поэтому приходится при первом запуске насоса нагревать его очень долго, неделю приблизительно, чтобы получить вакуум лучше, чем  $10^{-9}$  торр. Однако после непродолжительной остановки насоса прогревание занимает не более суток. Мы довольно часто получали вакуум  $5 \times 10^{-10}$  торр. На новом усовершенствованном насосе, который я смотрел на заводе, достигается вакуум  $2 \times 10^{-10}$  торр.

Результаты измерения скорости откачки следующие: при  $10^{-5}$  торр. - 140 л/сек; при  $10^{-8}$  - 120 л/сек и при  $8 \times 10^{-10}$  торр - 100 л/сек. Неизвестно почему скорость слегка падает с давлением.

Интересно отметить, что в последнее время в США построены быстровращающиеся молекулярные насосы, на которых получается предельный вакуум лучше, чем  $10^{-11}$  торр. Но скорость откачки этих насосов очень мала, меньше одного литра в секунду.



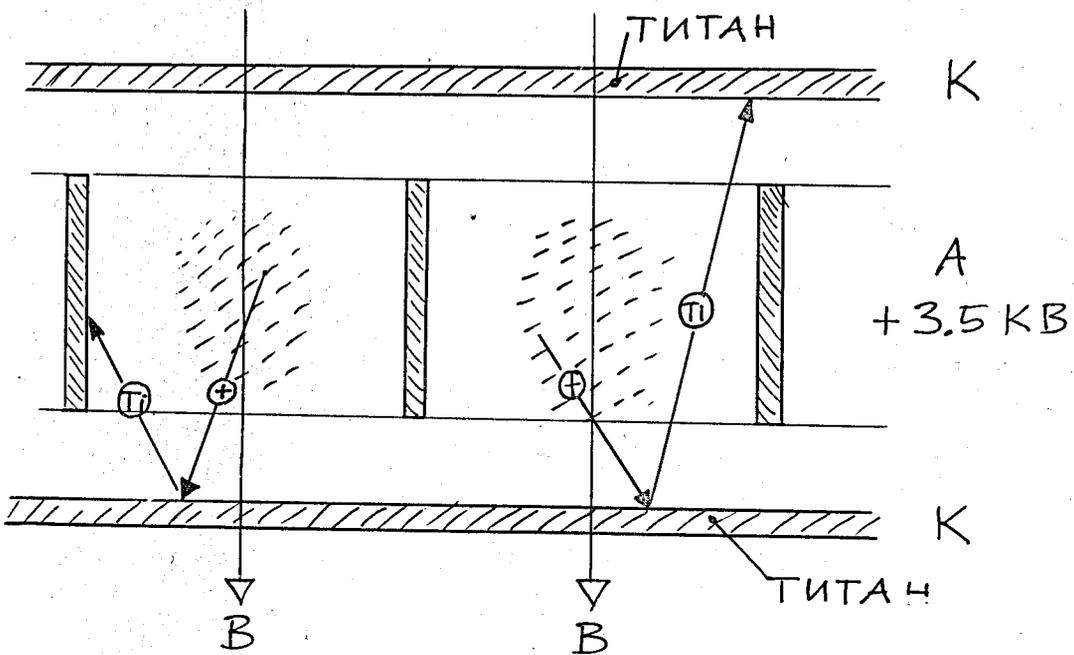
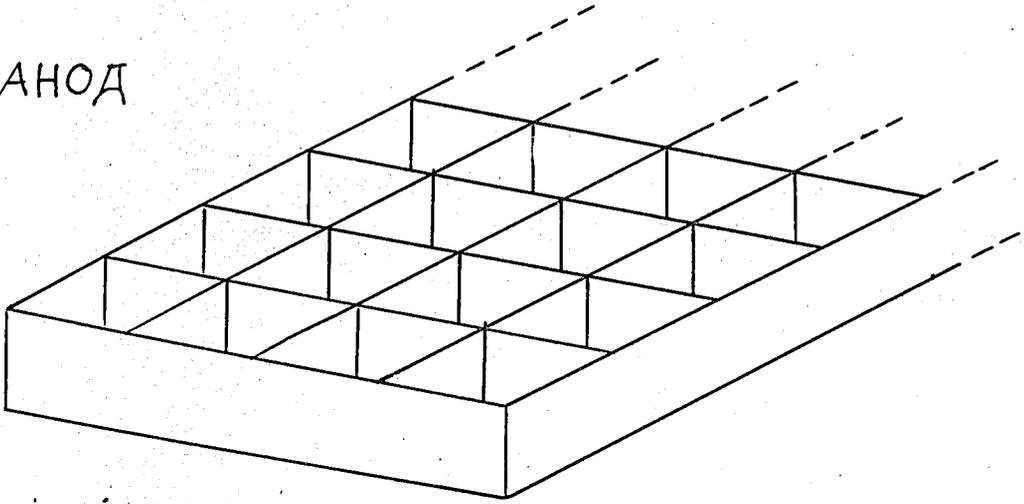
ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ (АЛЬНИКО)

ТИТАНОВЫЙ НАСОС

"ВАРИАН", США

РИСУНОК 7

АНОД



НАСОС "ВАРИАН"

РИСУНОК 8

### НАСОС "ВАРИАН".

В последнее время мы успешно испытали совершенно другой насос для достижения сверхвысокого вакуума: титановый ионно-сорбционный насос, сделанный американской фирмой "Вариан". Он тоже дает предельный вакуум  $3 + 5 \times 10^{-10}$  торр.

Рисунок 7 показывает общий вид и поперечное сечение этого насоса. Вокруг общего вакуумного провода размещены 4 насосных камеры. 4 угловых постоянных магнита смонтированы снаружи таким образом, что в каждой насосной камере имеется приблизительно однородное магнитное поле с напряженностью 1500 гаусс. Более подробно одна из насосных камер показана на рисунке 8. В камере находятся три электрода: два катода, которые присоединены к массе и между катодами решетчатый анод, который находится под электростатическим потенциалом 3,5 кв. Анод сделан из нержавеющей стали, а катоды из чистого титана. В отличие от других титановых насосов катоды не накаливаются. Но все-таки вследствие сильного поля некоторое число электронов выделяется катодами. Эти электроны зажигают в каждой секции решетчатого анода газовый разряд типа Пеннинга. Разряд поддерживается самостоятельно, потому что электроны разряда отталкиваются от катодов, но из-за сильного магнитного поля не могут попадать и на анод. Однако, положительные ионы бомбардируют катод. Вследствие этого от катода выделяются нейтральные атомы титана и образуют на аноде пленку титана.

Эта пленка титана является очень активным геттером и абсорбирует все газы, кроме благородных газов. При этом атомы газов вступают в прочное химическое соединение с титаном. Химическая активность титана хорошо иллюстрируется тем фактом, что титан

является единственным металлом, который горит в атмосфере чистого азота. Исключение составляет откачка водорода. Он не входит в химическое соединение с титаном, а просто адсорбируется и затем хоронится под новой пленкой титана.

Атомы благородных газов не абсорбируются титаном. Но все-таки насос имеет небольшую скорость откачки благородных газов. Механизм откачки благородных газов выясняется, если исследовать катод после продолжительного откачивания. При этом можно обнаружить в середине каждой секции воронкообразное углубление, а на краях, в тени решетчатого анода, небольшое осаждение титана как и на аноде. На эти места попадают ионы и вследствие этого выделяется титан, но одновременно большее количество титана осаждается с противоположного катода, так что здесь все ионы в том числе и благородных газов прочно хоронятся. Все-таки скорость откачки для благородных газов значительно меньше чем для других газов. Она составляет для аргона и гелия только 3% от скорости откачки азота. Для модели накопительного кольца это вполне достаточно. Нужно отметить, что насос в описанном виде не годится, если продолжительное время откачивается воздух при давлении  $10^{-5}$  торр или больше, так как воздух содержит 1% аргона. Но недавно фирма Варриан выпустила вариант титанового насоса, при котором скорость откачки для аргона составляет 10% по сравнению с азотом.

Насос можно включить после предварительной откачки форвакуумным насосом до вакуума  $10^{-2}$  торр. Через сутки после первого пуска мы получили вакуум  $6 + 8 \times 10^{-10}$  торр. При этом насос прогревался 10 часов при температуре 300 градусов. (магнит из "альнико" не выдерживает температуры выше  $320^{\circ}$ ).

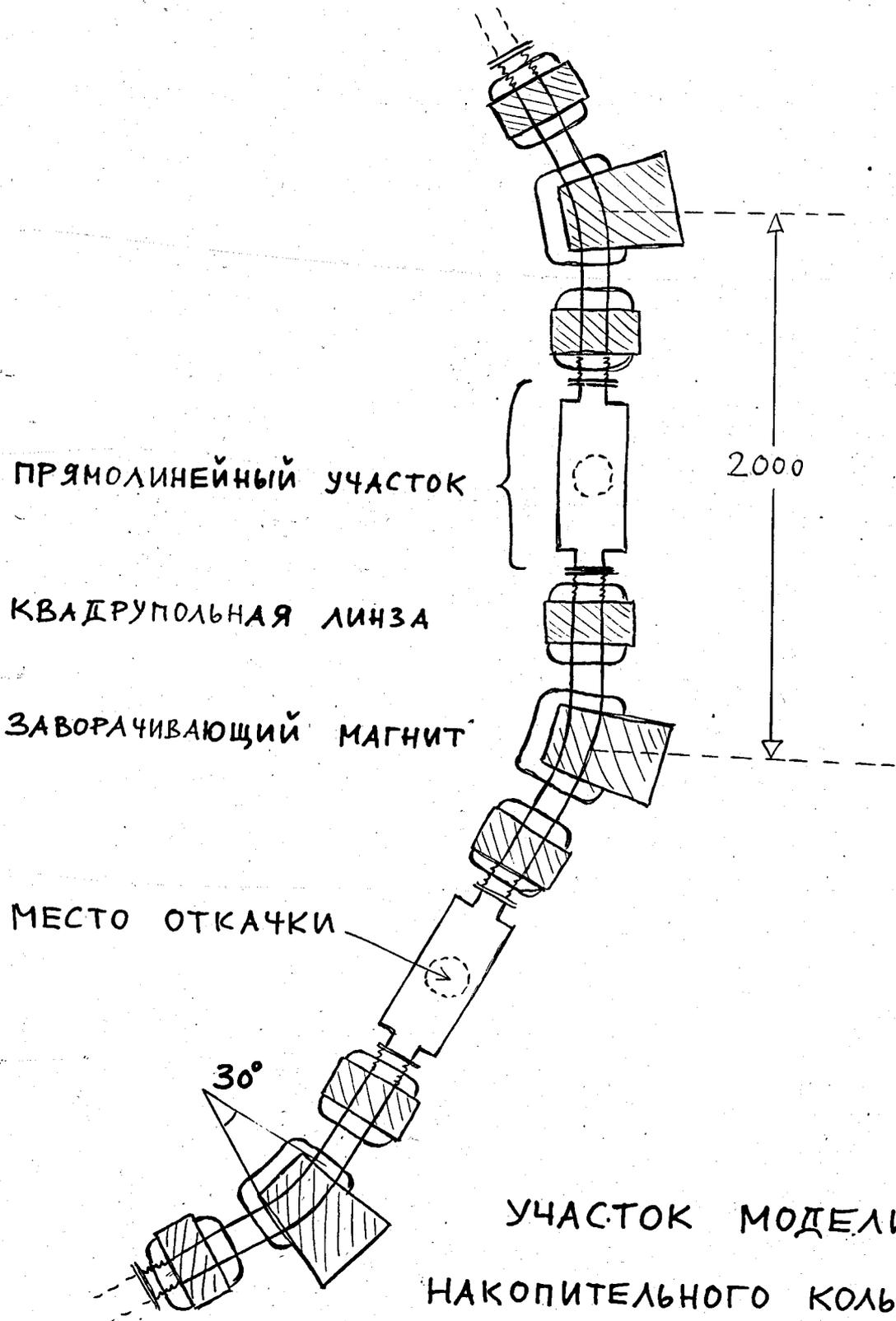


РИСУНОК 9

Номинальная скорость откачки насоса для воздуха составляет 140 л/сек. Мы измеряли скорость и получили 120 л/сек при  $10^{-5}$  торр и 60 л/сек при  $10^{-9}$  торр. По данным фирмы скорости откачки должны быть независимы от давления. Нам не удалось объяснить это разногласие до моего отъезда в Дубну.

Преимуществом является то обстоятельство, что насос служит одновременно манометром. Ионный ток насоса пропорционален давлению. Ток измеряется с помощью прибора в блоке питания насоса. Мы экспериментально убедились в том, что показания этого прибора хорошо совпадают с показаниями ионизационного манометра.

#### ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОДЕЛИ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА.

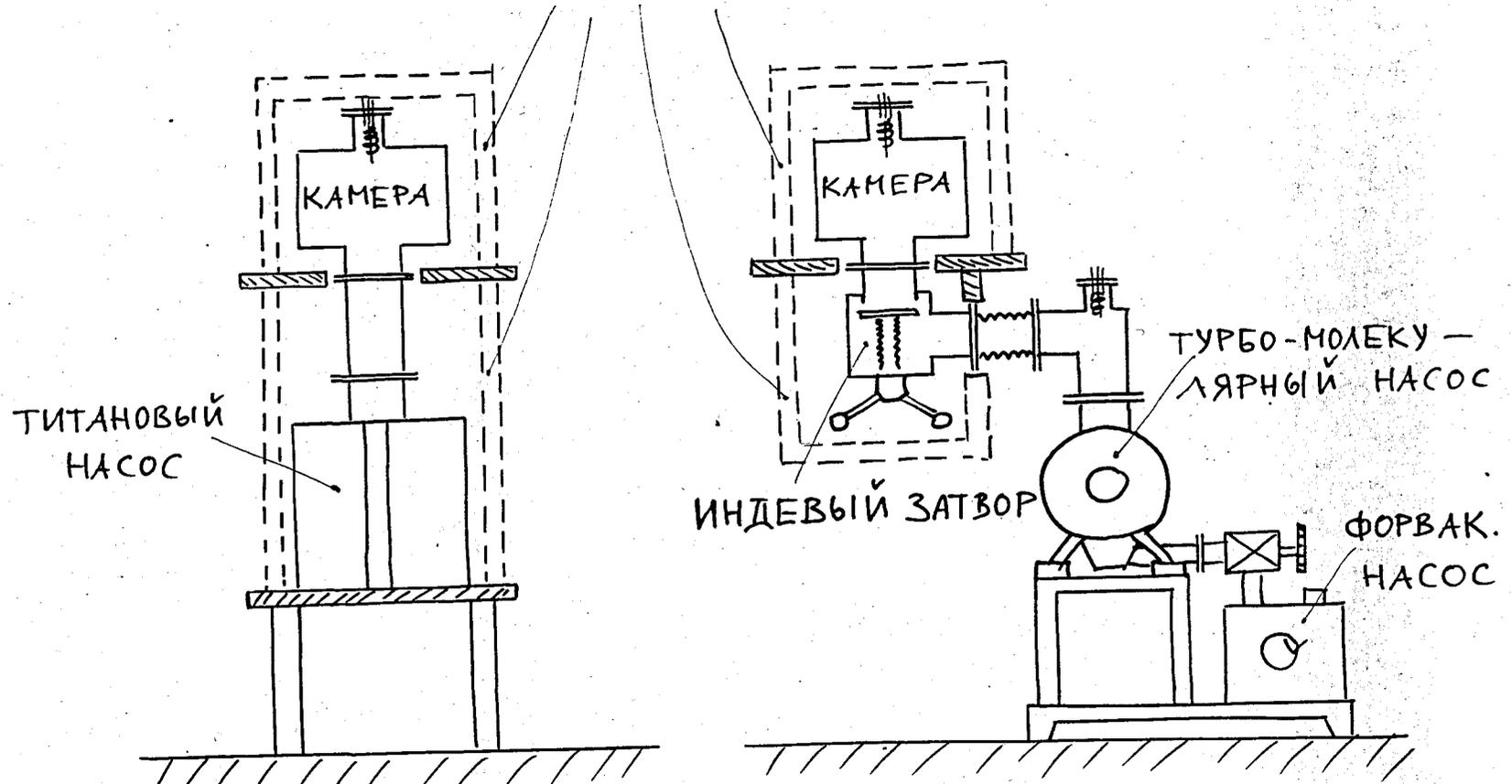
В середине прошлого года было решено построить в ЦЕРНе модель накопительного кольца для электронов с энергией 2 Мэв. В камере этой модели требуется вакуум  $10^{-9}$  торр.

Рисунок 9 показывает участок модели. Камера будет состоять из 24 участков: 12 криволинейных участков с эллиптическим поперечным сечением с апертурой 5x10 сантиметров — (эти участки будут находиться между полюсными наконечниками заворачивающих магнитов и квадрупольных линз) — и 12 прямолинейных участков. Каждый из прямолинейных участков может иметь любое сечение в зависимости от аппаратуры, размещаемой в нем.

Самыми удобными местами для откачки является середина прямолинейных участков, так как там будут находиться разные приспособления: электроды, изолирующие материалы, сцинтилляторы и т.д. с повышенным выделением газов.

Предусматриваются и уже заказаны девять насосных установок.

ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИЙ КОЖУХ



ОПЕРАТИВНАЯ ВАКУУМНАЯ  
УСТАНОВКА

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРЕДВАРИ-  
ТЕЛЬНОЙ ОТКАЧКИ

РИСУНОК 10

На шести из 12 прямолинейных участков будут работать титановые насосы и на трех из остальных участках — установки для предварительной откачки с турбо-молекулярными насосами. Три прямолинейных участка остаются свободными. Но, если в дальнейшем окажется, что общая скорость откачки недостаточна, то в любое время на этих участках можно установить три дополнительных насоса.

Рисунок 10 показывает расположение насосов. Патрубки откачки на всех прямолинейных участках направлены вниз и одинаковы, что обеспечивает взаимозаменяемость насосов.

Титановый насос подсоединяется прямо к камере, между тем как установка для предварительной откачки состоит из индийского вакуумного затвора, турбо-молекулярного насоса, форвакуумного затвора и форвакуумного насоса.

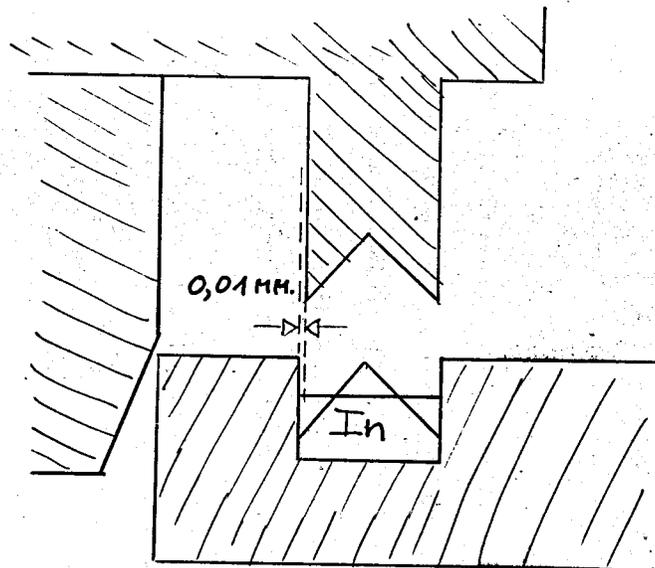
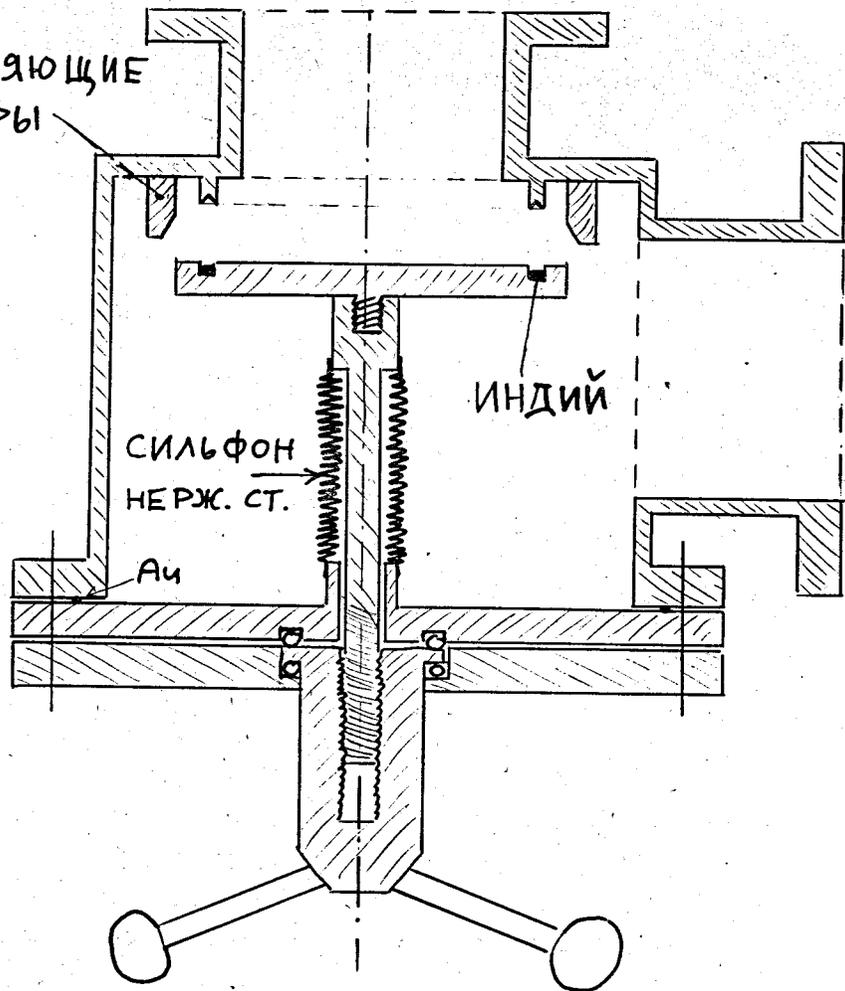
Под камерой и под титановыми насосами находятся плиты из теплоизолирующего материала, которые всегда остаются на месте. Остальные части теплоизолирующего кожуха, обозначенные на рисунке пунктиром, монтируются только для прогрева и демонтируются после этого. Положение ионизационных манометров видно из рисунка. Во время нормальной работы кольца откачку будут производить только титановые насосы при закрытых индийских затворах. Три установки с молекулярными насосами включаются лишь временно для следующих целей: во-первых для предварительной откачки перед запуском титановых насосов, во-вторых, во время прогрева для удаления газов из всей системы и, в-третьих, для определения течей, причем гелиевый течеискатель подключается к форвакуумной стороне молекулярного насоса. Кроме того, всегда остается возможность использовать молекулярные насосы для увеличения скорости откачки во время работ с пучком.

Почему мы склонились в пользу описанной системы откачки? Для этого имеется ряд финансовых и технических соображений. Устав ЦЕРНа требует, чтобы сдача всех крупных заказов решалась путем конкурса. В результате конкурса, объявленного нами на все вакуумное оборудование, кроме камер, оказалось, что самое дешевое из одиннадцати поступивших предложений было основано на описанной системе. По уставу мы должны принимать самое дешевое предложение, которое соответствует техническим требованиям. И на самом деле мы убедились, что система вполне удобна для нашего проекта. Система имеет целый ряд преимуществ над более стандартной системой с масляными диффузионными насосами; часть этих преимуществ и объясняет выгодную цену.

Одним из преимуществ является то, что нет необходимости иметь вакуумный затвор над титановыми насосами, между тем как такие затворы почти необходимы, если бы кольцо откачивалось диффузионными насосами. Эти затворы тогда должны были бы выдерживать температуру до 300 градусов и закрываться полностью автоматически в случае неправильной работы насосной установки. В данной схеме на титановом насосе автоматический затвор и блокировочный шкаф, управляющий его работой, заменяются простым предохранителем в цепи питания насоса. Конечно, необходимо иметь вакуумные затворы на установках предварительной откачки, но их всего три и они не нуждаются в автоматическом управлении, так как в отсутствии обслуживающего персонала затворы закрыты.

Важно также и то, что можно уменьшить число ионизационных манометров, потому что титановый насос одновременно является и индикатором вакуума.

НАПРАВЛЯЮЩИЕ  
УПОРЫ



ИНДИЕВЫЙ ЗАТВОР  
"ГРЕЗИЛЬОН", ФРАНЦИЯ

РИСУНОК 11

Молекулярные насосы хорошо пригодны и как вспомогательные насосы, потому что они работают без масла на стороне высокого вакуума.

Следует отметить, что выбранная нами система откачки не уникальна. До нас сотрудники "ДЕЗИ" при конструировании электронного синхротрона с энергией в 7 Бэв в Гамбурге, также приняли решение в пользу той же самой системы.

### ИНДИЕВЫЙ ЗАТВОР.

Мне еще следует сказать несколько слов об индиевом затворе. Его схематическое сечение показано на рис. II. Аппертура затвора 100 мм и проводимость 350 лит/сек. Название затвора объясняется тем, что он уплотняется индием. Индий - это металл, химически сходный с алюминием, но мягче его и в отличие от алюминия не окисляется воздухом или водой. Точка плавления индия 156°.

В затворе индий находится в кольцеобразном углублении в крышке. При закрывании затвора крышка поднимается таким образом, что кольцеобразный край с сечением в виде латинского "W" входит в углубление и сжимает индий. Три направляющих упора обеспечивают то, что уплотняющий край аккуратно входит в углубление с индием.

Весь затвор сделан из нержавеющей стали. Вакуумное уплотнение движущихся частей затвора осуществляется с помощью сальфона из нержавеющей стали и фланцевого соединения с прокладкой из золота. Открытый затвор можно нагревать под вакуумом до 450°С при условии, что затвор смонтирован строго горизонтально.

Иначе жидкий индий будет вытекать из углубления. В нашем случае во время прогревания турбо-молекулярные насосы работают и затворы открыты.

### НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ, СВАРКА, ФЛАНЦЕВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ.

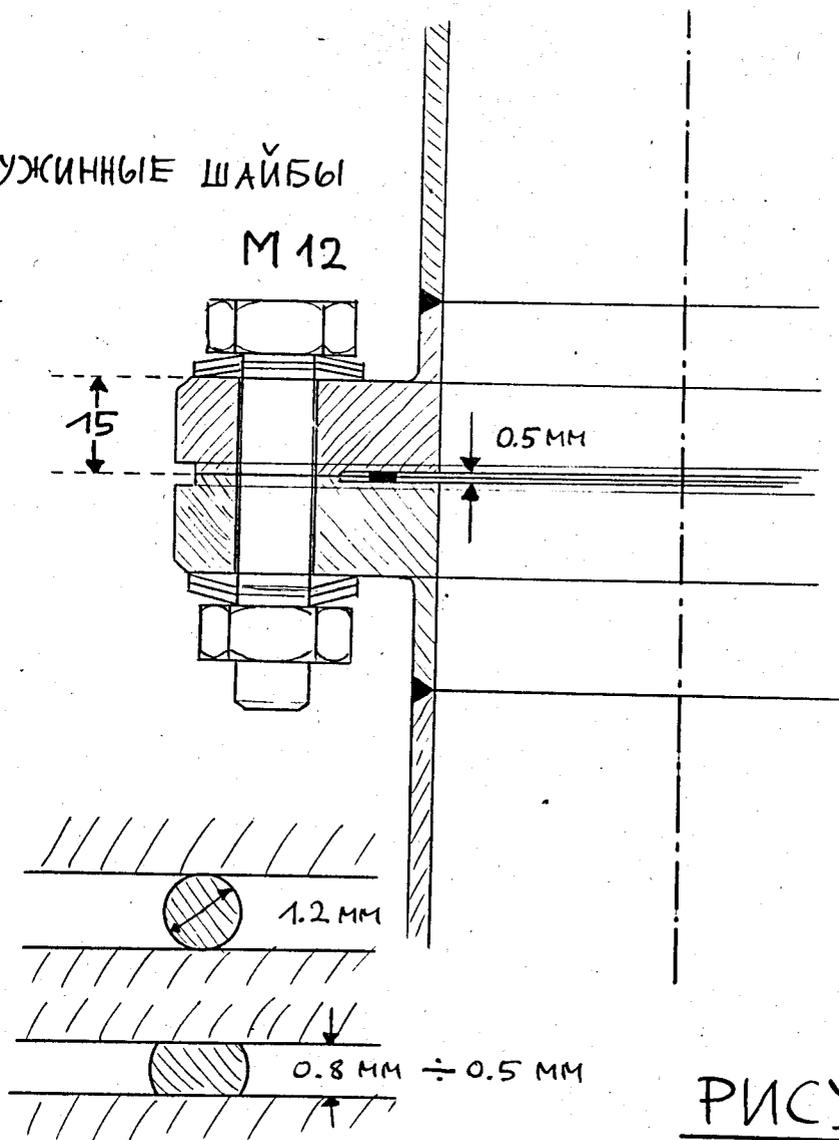
Все нам известные металлические камеры для сверхвысокого вакуума сделаны из нержавеющей стали. Больше всего употребляется следующий сплав: хром 18%, никель 8%, углерод  $< 0,02\%$ , марганец I + 2%. Сталь для нашего накопительного кольца отличается от этого сплава только тем, что содержание никеля увеличено до 14%. Это было необходимо для уменьшения магнитной проницаемости, особенно в сварочных швах. Наш сплав плавится под вакуумом. Это рекомендуется, но не обязательно. Во всяком случае при вакуумной плавке можно получать самое низкое содержание углерода. Если содержание углерода больше чем  $0,02\%$ , то в сварочных швах могут образоваться очень маленькие щели, которые в совокупности ведут к значительному натеканию.

Хорошие результаты показала у нас электролитическая полировка внутренней поверхности всех узлов. Выделение газов опытной камеры уменьшилось после электролитической полировки в 50 раз. Остаточное газоотделение -  $3 \times 10^{-10}$  торр-литров в секунду на квадратный метр.

Для сверхвысокого вакуума у нас применяется исключительно аргоновая сварка, то есть дуговая сварка в атмосфере аргона. Кроме того оказалось необходимым для лучшей плотности вакуумного шва, чтобы сварщик работал без прибавки материала электродов, даже если электрод состоит из той же самой стали, как и узел,

ПРУЖИННЫЕ ШАЙБЫ

M 12

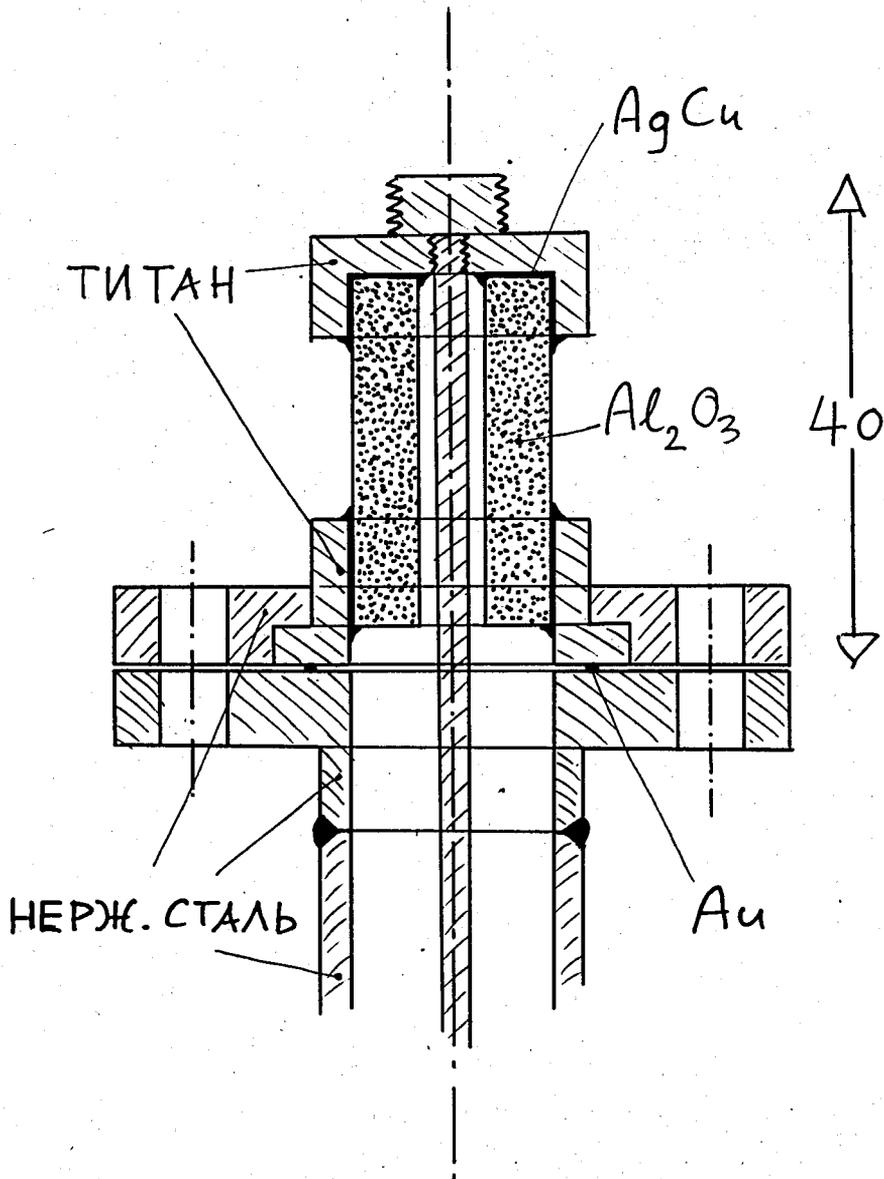


ФЛАНЦОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ  
С УПЛОТНЕНИЕМ ИЗ ЗОЛОТА

находящийся под сваркой. Эта особенность, конечно, должна учитываться уже в конструкторском отделе.

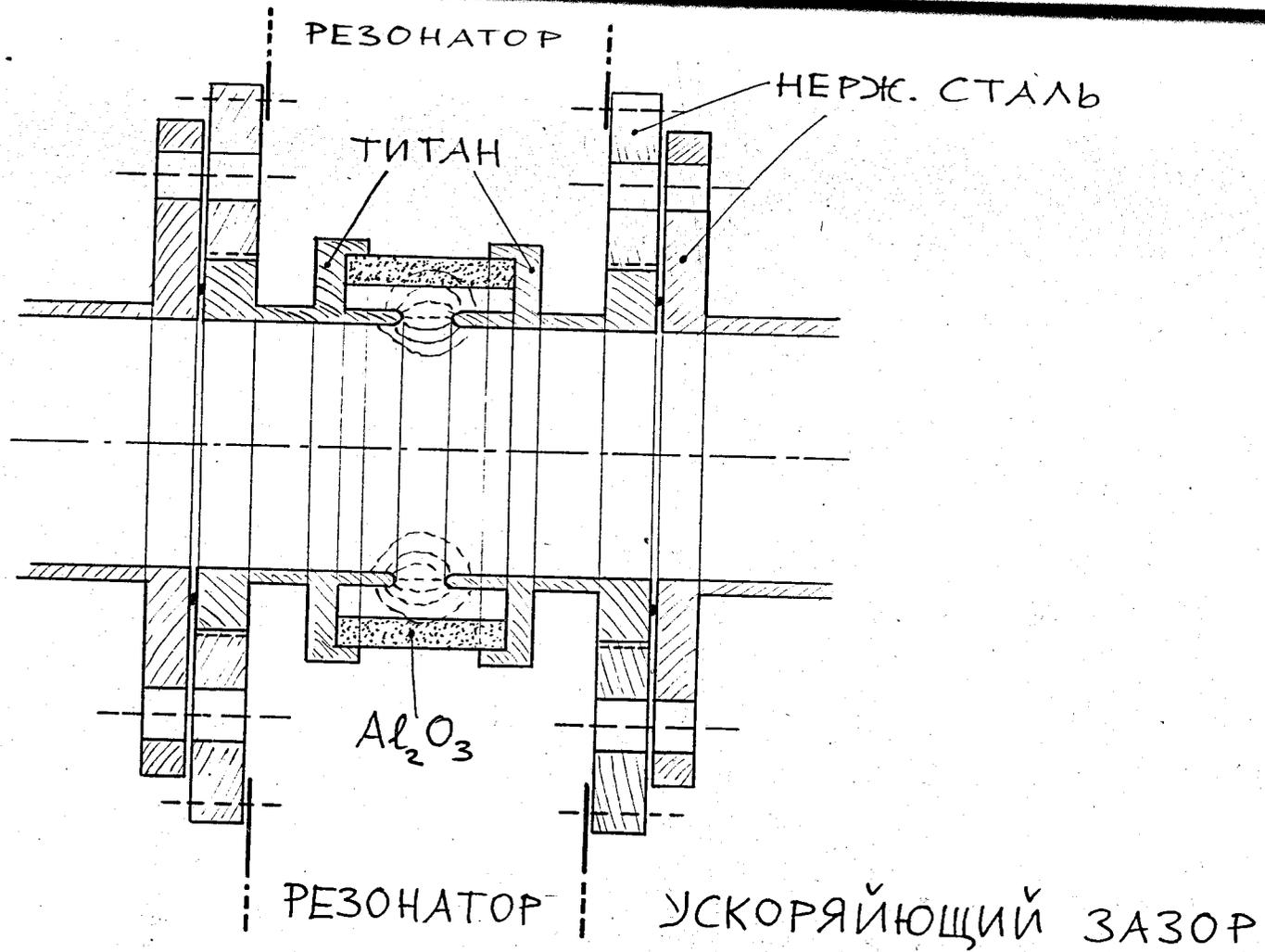
В качестве фланцевого соединения мы применяем только ту систему, которая показана на рисунке 12. Уплотнение состоит из чистого золота. Мы покупаем золото в виде проволоки с диаметром 1,2 или 1,5 мм и свариваем его в кольца соответственно с размером фланца. До установки кольца отжигаются, что значительно увеличивает пластичность золота. Два соединяемых фланца симметричны. Каждый имеет небольшой выступ в 0,25 мм, так что золотое кольцо не может быть сжато больше чем до 0,5 мм. На внешних краях фланцев имеется выточка приблизительно в 2 мм. Эта выточка служит во-первых для разъединения фланцев, если после сильного нагревания фланцы спаяны золотом, и во-вторых для проверки вакуумной плотности. Для этого выточка заклеивается изоляционной лентой и под нее вводится гелий. Индикатором служит гелиевый течеискатель. Поверхность фланцев, где укладывается кольцо, тщательно полируется механическим способом перед каждым монтажом.

Под головки винтов и гайки устанавливаются тарельчатые пружинные шайбы. Поэтому во время нагревания соединение остается плотным несмотря на разницу температур между винтами и фланцами. Тем не менее важно, чтобы винты и фланцы имели одинаковые коэффициенты расширения. Для быстрого монтажа - когда мы не хотим нагревать систему - мы применяем вместо золота индиевую проволоку. Прокладки, сваренные из проволоки из чистого алюминия, которые мы в этом случае пробовали по рекомендации



ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ВАКУУМНЫЙ ВВОД

РИСУНОК 13



37

РИСУНОК 14

английских вакуумщиков, уплотняются прочно только после нагревания по крайней мере до  $300^{\circ}$ .

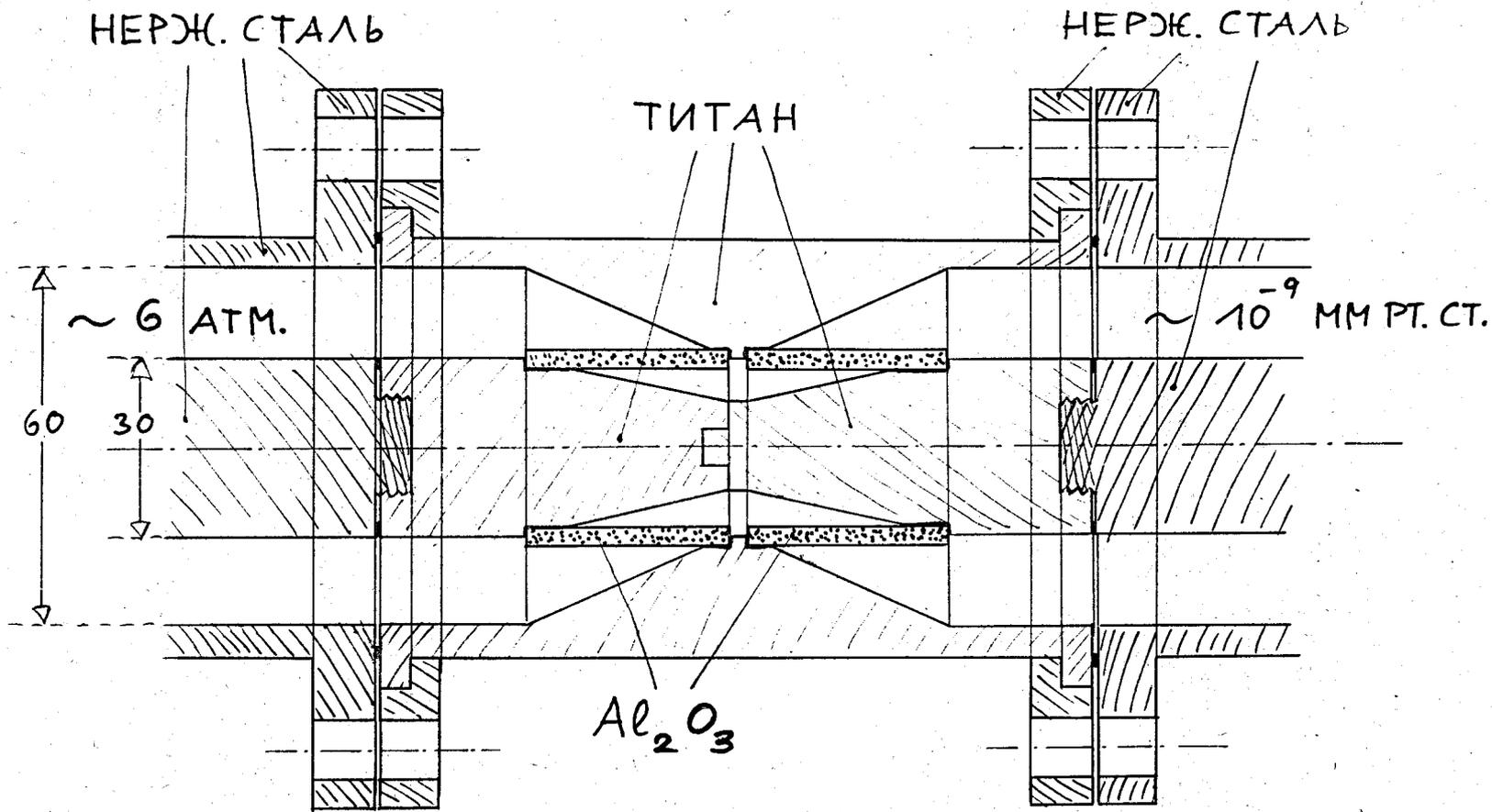
### СОЕДИНЕНИЕ ТИТАН - КЕРАМИКА

Для электрических вводов в камеру и для изолирующего зазора на месте ускоряющего высокочастотного напряжения мы употребляем технику, развитую французской фирмой "CSF" (Compagnie Générale de Télégraphie Sans Fil). В этой технике керамика  $Al_2O_3$  спаивается в вакууме с титаном, причем в качестве припоя служит эвтектический сплав серебра с медью (Ag 79% , Cu 21%). Титановая часть затем присоединяется к камере из нержавеющей стали с помощью фланцевого соединения с прокладкой из золота. Один пример показан на рисунке 13. Коэффициент расширения титана несколько больше, чем коэффициент  $Al_2O_3$ . Поэтому титан, по возможности, должен охватывать керамику.

Процесс спайки в вакуумной печи должен быть хорошо программирован по температуре. Во время спайки титан диффундирует в припой и облегчает ему смачивание керамики. Однако, если слишком много титана диффундирует, механические свойства припоя меняются.

Вводы хорошо выдерживают многократное нагревание до  $400^{\circ}C$  и имеют для нашей модели накопительного кольца то преимущество, что они немагнитны и поэтому не могут возмущать электронный пучок.

Та же самая техника применяется нами для ускоряющего зазора модели, как показывает рисунок 14.

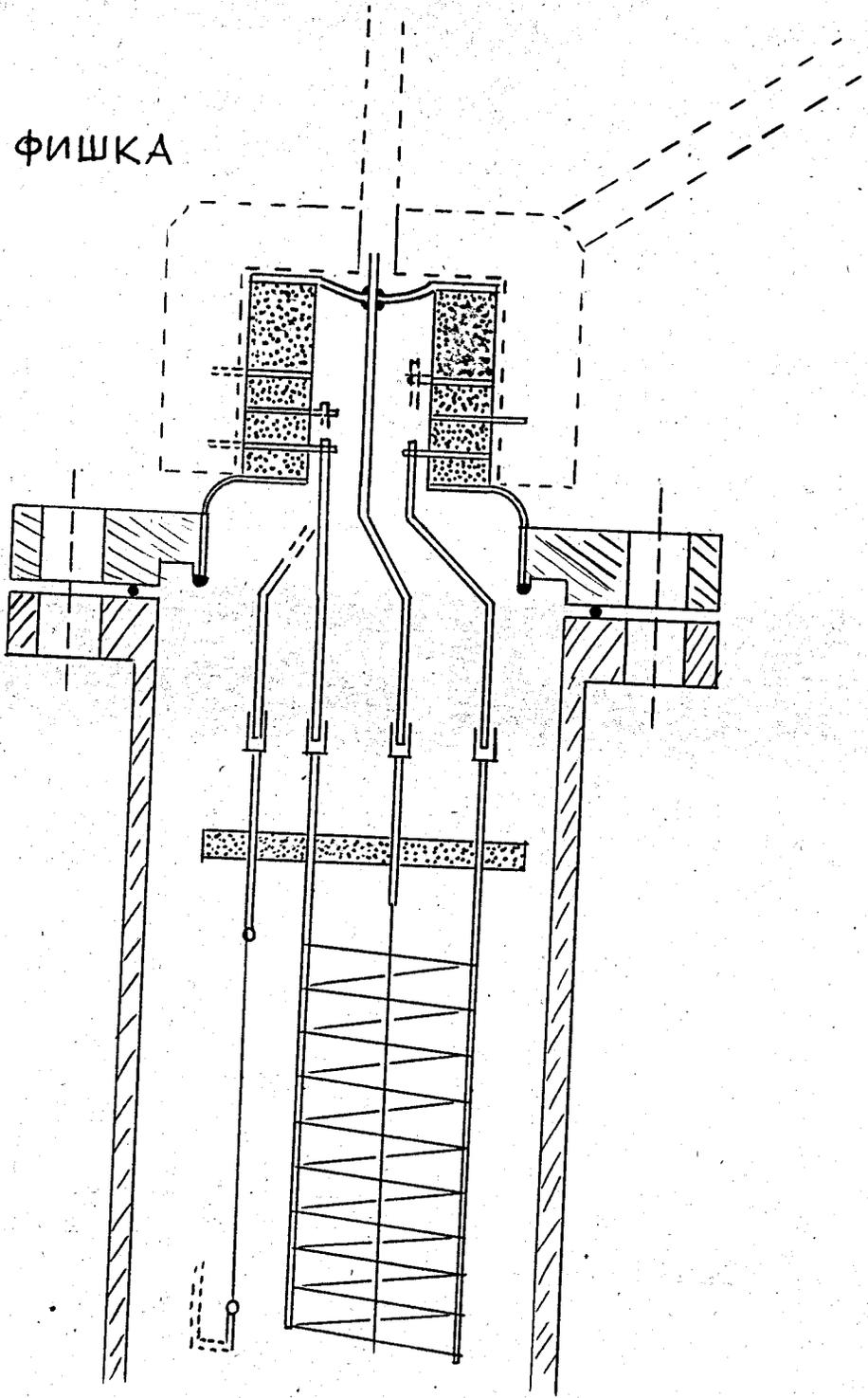


ВВОД КОАКСИАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА В КАМЕРУ

РИСУНОК 15

39

ФИШКА



МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ИОНИЗАЦИОННЫЙ

МАНОМЕТР

РИСУНОК 16

Последний пример титаново-керамического соединения показывает рисунок 15. Изображен ввод коаксиального волновода в вакуумную камеру модели. Весь ввод имеет концентрическую форму.

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.

Для измерения вакуума мы используем ионизационные манометры типа Байарда-Альперта, сделанные французской фирмой "CSF". Система электродов не находится в стеклянной колбе, а монтируется на фланец и висит свободно в вакуумном объеме, как показано на рисунке 16. Известно, что такой "погруженный манометр" более достоверен, чем обыкновенный манометр в стеклянной колбе. Система электродов легко снимается с фланца, чтобы она не повреждалась при полировке фланца перед монтажом, и для замены, когда катод сгорел. Ток эмиссии нормально 100  $\mu\text{A}$  и максимально 1 мА.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Целью моего сообщения было показать, что в настоящее время вакуум  $10^{-9}$  доступен для ускорительной техники. Но я не хотел произвести впечатление, будто это легко достигается. На самом деле мы очень мучились в наших предварительных опытах. Хотя нам пока кажется, что мы нашли решения всех проблем, мы не сомневаемся в том, что нам еще придется мучиться до того, как в вакуумной камере накопительного кольца будет сверхвысокий вакуум.