

396

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

P - 396

А.В. Богомолов, В.Г. Вовченко, В.В. Святковский,
Л.М. Сороко, И.А. Штыря

МИШЕНЬ ДЛЯ ЖИДКОГО ВОДОРОДА
И ДЕЙТЕРИЯ

Дубна 1959 год

P - 396

А.В. Богомолов, В.Г. Вовченко, В.В. Святковский,
Л.М. Сороко, И.А. Штыри

МИШЕНЬ ДЛЯ ЖИДКОГО ВОДОРОДА
И ДЕЙТЕРИЯ



А н н о т а ц и я

Описываемая конструкция мишени для жидкого водорода и дейтерия обеспечивает хранение сжиженных газов в течение 40-50 часов.

Мишень предназначена для исследования процессов взаимодействия быстрых заряженных частиц с ядрами водорода и дейтерия в условиях хорошо ограниченной геометрии.

К моменту составления данного отчета на одной из таких мишеней были выполнены опыты по исследованию реакции $p+p \rightarrow d+\pi^+$ на поляризованном пучке протонов при энергиях 536, 616 и 654 Мэв; на другой мишени проведены эксперименты по образованию заряженных π -мезонов в pd -столкновениях при $E_p = 660$ Мэв.

1. Общие требования к мишени

Использование в качестве мишени сжиженных газов можно считать наиболее целесообразным приемом в экспериментах по исследованию процессов взаимодействия протона с протоном и дейтроном. Конструкции таких мишеней должны обеспечивать: хранение жидкого водорода или дейтерия в течение длительного времени, малую толщину стенок контейнера для сжиженного газа при условии выполнения хорошей геометрии, незначительное количество постороннего вещества на пути протонов пучка, и, наконец, наличие необходимых удобств при измерении фона от пустого контейнера.

Известны следующие классы конструкций мишеней:

- 1/ мишень в виде дьюара с двойными стеклянными стенками;
- 2/ мишень в виде контейнера из пенополистирола с азотным тепловым экраном /14/;
- 3/ мишень в виде металлического контейнера, помещенного в откачиваемый объем /12/;
- 4/ мишень с принудительным охлаждением газообразного водорода жидким гелием /10/.

Выбранная нами конструкция мишени в виде металлического контейнера уже была описана в литературе /13/ и по полноте выполнимости требований, предъявляемых к мишени, может считаться одной из наиболее удобных.

Хранение жидкого дейтерия в металлическом контейнере определяется временем нахождения жидкого водорода в мишени, так что мы остановимся на приемах хранения последнего.

Приемы длительного хранения жидкого водорода

При хранении жидкого водорода в контейнере, помещенном в откачиваемый объем, подвод тепла к контейнеру может происходить за счет:

- 1/ теплопроводности деталей, соединяющих контейнер с наружным кожухом;
- 2/ теплопроводности откачиваемого пространства благодаря наличию остаточного газа;
- 3/ температурного излучения через откачиваемое пространство;
- 4/ конвективного переноса тепла внутри сосуда и горловины.

Для того, чтобы подвод тепла за счет этих процессов уменьшить, обычно применяют следующие приемы.

Резервуар с жидким водородом помещают в объем, откачиваемый до высокого вакуума. Теплопроводность газа благодаря этому существенно уменьшается, а конвективный перенос прекращается совсем. С целью уменьшения потока температурного излучения вводят азотный экран. Установка теплоизолированного экрана с полированными стенками приводит к уменьшению потока температурного излучения дополнительно в два раза.

Горловину резервуара изготавливают из металла с низкой теплопроводностью. Подвеску экрана к горловине осуществляют в таком месте, где расчетные значения температур экрана и точки подвеса в стационарном состоянии совпадают. Увеличение длины горловины приводит дополнительно к тому, что подводимое по горловине тепло расходуется не на испарение жидкости, а на нагрев выходящего газа.

В результате получается следующая схема конструкции /рис. 1/. Сосуд с жидким азотом также находится в вакууме, а его наружная поверхность полируется. Горловину азотного сосуда изготавливают из металла с низкой теплопроводностью.

Для сосуда с жидким азотом практическое значение имеют теплопроводность остаточного газа, температурное излучение, а также подвод тепла к горловине. Для сосуда с жидким водородом тепло подводится главным образом за счет температурного излучения и теплопроводности горловины. Оба эти процесса необходимо рассматривать в расчетах совместно. Выходящий по горловине газ благодаря теплообмену со стенками отбирает от стенок тепло и этим уменьшает поток тепла, достигающего жидкость. В случае обеспечения хорошего теплообмена подводимое тепло удается уменьшить почти в десять раз

по сравнению с тем, что имеет место при отсутствии теплообмена между стенкой и газом^{/16/}.

Из совместного рассмотрения процессов температурного излучения и теплопроводности по горловине следует^{/16/}, что количество тепла Q_R от температурного излучения целесообразно уменьшать только до тех пор, пока $Q_R \gg Q_1$, где Q_1 - тепло, подводимое по горловине. На рис. 2 приведена расчетная величина суммарной скорости испарения $(Q_R + Q_1)$ в зависимости от Q_R . Видно, что если $Q_R \approx Q_1$, например, $Q_R \sim 1,5 Q_1$, то дальнейшее уменьшение Q_R в два раза с помощью экранов или путем улучшения полировки наружных стенок, даст только незначительное уменьшение полного потока. Причина неизменности потока тепла при $Q_R \sim 0$ связана с тем, что количество газа, проходящего через горловину, уменьшается и соответственно уменьшается его экранирующая способность.

При хранении жидкого водорода возникает дополнительный источник тепла, который связан с переходом ортоводорода в параводород.

В равновесном состоянии при комнатной температуре водород состоит из 75% орто- и 25% параводорода. При температуре кипения водорода равновесной является смесь из 0,3% орто- и 99,7% параводорода. Поэтому, если газообразный водород, взятый при комнатной температуре, превратить в жидкость, то в жидкости будет происходить конверсия ортоводорода в параводород, сопровождаемая выделением тепла в 337,2 кал/моль. Такое тепловыделение примерно в 1,5 раза больше, чем теплота испарения жидкого водорода. В нормальных условиях скорость конверсии составляет около 1,25% в час.

Весьма выгодно конвертировать ортоводород в параводород и перед заливкой в мишень. Это можно осуществить путем пропускания газообразного водорода через древесный уголь, охлаждаемый жидким азотом. В результате такой операции концентрация ортоводорода снижается до 50%, и соответственно уменьшается скорость конверсии в $\frac{0,75}{0,50} \approx 2,2$ раза по сравнению с обычной смесью.

Конверсию ортоводорода в параводород можно осуществить также в процессе сжижения, если использовать каталитический метод конверсии^{/20/}.

11. Описание конструкции мишени

Мишень /рис. 3/ состоит из тонкостенного цилиндрического контейнера, который содержит жидкий водород или дейтерий, облучаемый ускоренными частицами. Основное количество жидкого водорода находится в резервуаре, с которым контейнер имеет тепловой контакт. Резервуар и контейнер окружены экраном, охлаждаемым жидким азотом, а вся конструкция помещена в откачиваемый объем.

Наружный кожух

Наружный кожух ограничивает замкнутый объем, в котором находится внутренняя конструкция, подвешенная к его верхнему фланцу. К этому же фланцу через вакуумное уплотнение прикреплена основная наружная труба кожуха диаметром 210 мм и толщиной стенок 3 мм, к которой приварен верхний и нижний фланцы. Нижний фланец соединен с барабаном, к которому приварена труба внутренним диаметром 48 мм, а также трапециевидное удлинение, располагаемое вдоль оси пучка. Окна для входа и выхода ускоренных частиц закрыты латунной фольгой толщиной 80 микрон или фольгой из нержавеющей стали толщиной 100 микрон. Фольга расположена на большом расстоянии от центра мишени, что обеспечивает более низкое значение фона, чем в случае, когда фольга расположена в непосредственной близости к стенкам водородного контейнера. Окна в виде широких щелей на боковой поверхности барабана для выхода вторичных частиц закрыты листовой жстью толщиной 0,35 мм, которая припаяна к барабану припоем ПОС-40. Во второй мишени для этой цели использовалась фольга из нержавеющей стали толщиной 100 микрон. На рис. 4 приведены разрезы мишеней в плоскости пучка с указанием возможных углов наблюдения для каждой мишени.

Нижний фланец барабана переходит в систему откачки, состоящую из соединительного патрубка, форвентиля, глухой азотной ловушки, диффузионного насоса ЦВЛ-100 и форвакуумного насоса РВН-20. Наилучшее значение вакуума в замкнутом объеме составляет $4 - 5 \cdot 10^{-7}$ мм ртутного столба. Скорость натекания системы равна 1 микрону ртутного столба за сутки.

Наружный кожух установлен на опоре, скрепленной с поворотным столом, на котором размещена измерительная аппаратура. Стол второй мишени скреплен с магнитом спектрометра. К основной трубе фланцы припаяны ПОС-40. Сварка всех узлов барабана произведена электродами ВН-48.

Азотный резервуар и азотный экран

Подвеска внутренней конструкции осуществлена на четырех трубках. Три трубы диаметром 12 мм и толщиной стенок 0,2 мм, расположенные по кругу диаметром 120 мм, изготовлены из листового монель-металла НМЖМЦ-28-2,5-1 путем обработки давлением. К верхнему фланцу наружного кожуха и к верхней крышке азотного резервуара эти трубы припаяны ПОС-40. Одна труба заканчивается сквозными отверстиями в верхних фланцах наружного кожуха и азотного резервуара. В остальных двух глухих трубках сделаны небольшие отверстия для откачки.

Центральная труба диаметром 38 мм, толщиной стенок 0,6 мм и длиной 500 мм изготовлена из листового монель-металла той же марки. К верхнему фланцу наружного кожуха труба припаяна ПОС-40. Соединение с азотным резервуаром осуществлено через переходное кольцо с помощью того же припоя. К водородному резервуару центральная труба припаяна ПСР-45. Внутренняя стенка центральной трубы обработана на пескоструйном аппарате, а наружная - отполирована до блеска.

Наружный цилиндр азотного резервуара переходит в азотный экран, состоящий из тонкостенного цилиндра диаметром 158 мм и толщиной стенок 1 мм, и нижнего фланца, которые изготовлены из латуни. Наружная поверхность азотного экрана обвита медными трубками диаметром 1 см и толщиной стенок 2 мм. Трубка расположена в виде змеевика. В своей нижней части змеевик соединен с тонкой, изготовленной из мельхиора, выхлопной трубкой диаметром 2,7 мм, которая имеет выход в верхнем фланце наружного кожуха. Выхлопная трубка служит для продувки и очистки азотного резервуара. Наружные стенки азотного резервуара и азотного экрана хромированы и отполированы. К нижнему фланцу азотного экрана прикреплен съемный экранный барабан, из-

готовленный из листовой меди. Экранный барабан предназначен для отвода тепла к азотному экрану. Стенки экранного барабана отполированы. В экранном барабане для пропускания ускоренных частиц и выхода вторичных частиц имеются окна, расположенные в соответствии с окнами наружного барабана. Окна эти закрыты алюминиевой фольгой толщиной около 15 микрон. Экранный барабан имеет внизу смотровое окно для откачки, закрытое диском с отверстиями.

Внутренняя конструкция центрируется в своей нижней части относительно наружного барабана с помощью трех юстировочных винтов, изготовленных из органического стекла.

Водородный резервуар

Водородный резервуар изготовлен из нержавеющей стали марки ЭП-448. Толщина стенок - 1 мм. В своей верхней части водородный резервуар соединен с трубой, на которой подвешена вся конструкция. Труба из монель-металла диаметром 38 мм, припаяна к резервуару припоем ПСР-45. Крышки резервуара первой мишени припаяны к цилиндру также ПСР-45. Во второй мишени крышки резервуара приварены к цилиндру электродами. Прочность и вакуумплотность мест сварки и пайки водородного резервуара испытывалась путем охлаждения его до температуры азота. После первых испытаний возникали трещины, которые заделывались повторной сваркой и пайкой. Места сварок залуживались ПОС-40.

Наружные стенки цилиндра и крышек тщательно отполированы до блеска. Объем водородного резервуара равен 3,25 литра.

Дно резервуара закрыто тарелкой, изготовленной из нержавеющей стали марки ЭП-448. Алюминиевые прокладки обеспечивают вакуумное уплотнение в условиях резких переходов от нормальной температуры к низкой. Конструкция уплотнения соответствует рекомендациям, содержащимся в руководстве В.А.Ланис и Л.Е.Левинной /1955г./^{33/}.

Внутри резервуара, в верхней и нижней части, установлены конденсаторы /рис. 5/, предназначенные для измерения уровня жидкого водорода. Проводники от этих конденсаторов выведены наружу.

Цилиндрический контейнер /аппендикс/

Цилиндрический контейнер /аппендикс/, который заполняется жидким водородом или дейтерием, состоит из латунной трубки диаметром 42 мм и длиной 100 мм, верхняя часть которой соединена с фланцем. К нижней части трубки приклеен цилиндр диаметром 40 мм, который изготовлен из холоднокатанной латунной фольги толщиной 40 - 50 микрон. Фольга склеена в цилиндр клеем на основе эпоксидной смолы ЭД-6 /типа аральдит/. Тем же клеем цилиндр склеен с латунной трубкой, а также с дном контейнера. Один из контейнеров, используемых во второй мишени выточен из латунной болванки. Толщина стенок такого контейнера равна 80 микрон.

Вакуумное уплотнение между фланцами аппендикса и водородного резервуара обеспечивается алюминиевой прокладкой.

На рис. 6 показан разрез цилиндрического контейнера и нижней части водородного резервуара.

В нижней тарелке водородного резервуара имеются два отверстия, выходящие в аппендикс. От одного отверстия до верхней крышки распределительной головки тянется труба из мельхиора марки МН-70/30 диаметром 8 мм и толщиной стенок 0,25 мм. Второе отверстие соединяет водородный резервуар и контейнер посредством игольчатого клапана, который управляется мельхиоровой трубкой диаметром 6 мм и толщиной стенок 0,35 мм. Трубка приварена к штоку игольчатого клапана ПОС-40. Верхний ее конец выведен через крышку распределительной головки. Вниз от игольчатого клапана идет никелевая трубка - сифон диаметром 1,5 мм и толщиной стенок 50 микрон, которая оканчивается у самого дна аппендикса и служит для заполнения аппендикса жидким водородом и последующего выпуска. Детали этой конструкции видны на рис. 6.

Система контейнера была испытана на прочность и утечки при избыточном давлении 4 атмосферы.

Радиационные экраны

Один из радиационных экранов, изготовленный из латуни, расположен между азотным экраном и водородным резервуаром. Наружная и внутренняя

поверхности его хромированы и отполированы. Радиационный экран установлен на водородном резервуаре с помощью изолирующих опор из органического стекла /см. рис. 3/. Нижнее кольцо с вырезами, изготовленное из тефлона, играет роль центрирующего устройства и теплового изолятора.

Второй радиационный экран, изготовленный из латунной фольги, толщиной 0,1 мм, окружает азотный экранный барабан. От экранного барабана экран изолирован стойками из тефлона диаметром 5 мм и высотой 20 мм.

Указатель уровня

Указатель уровня изготовлен по принципу емкостного датчика, использующего различие в диэлектрических постоянных жидкости и газа. Датчиком являются два неподвижных конденсатора в виде пластин /рис. 5/. Преимущество емкостного метода определения уровня по сравнению с остальными методами состоит в отсутствии подвижных частей, а также в устойчивости показаний в процессе заливки, когда из-за быстрого охлаждения и бурного кипения жидкого водорода возникает нестационарность всех термодинамических процессов.

Проводники ~~конденсатора~~ конденсаторов выведены наружу через уплотнения в распределительной головке и подсоединены к клеммам Q -метра, с помощью которого производятся измерения величины емкости.

Изоляторы конденсатора и проводников испытаны на пробой при напряжении 300 вольт. Соединения проводников с клеммами Q -метра произведены не непосредственно, а через два последовательно включенных разделительных конденсатора, рассчитанных на рабочее напряжение 500 вольт. Эта мера предосторожности полностью исключает возможность подвода сетевого напряжения от Q -метра к конденсаторам в случае пробоя входной лампы Q -метра.

Распределительная головка и пульт управления

Распределительная головка /рис. 7/ присоединена к верхнему фланцу наружного кожуха через уплотнение. Фланец распределительной головки имеет сверху направляющую трубку для заливочного сифона, управляющую трубку

игольчатого клапана контейнера, а также уплотняющую систему дейтериевой трубки. К боковой стенке распределительной головки подходит трубка для откачки водородного резервуара, а также система выхлопа газообразного водорода, состоящая из соединительных трубок и выхлопного вентиля. В боковой стенке распределительной головки имеется также два стеклянных изолятора, через которые выходят проводники от конденсаторов.

На пульт управления /рис. 8/ вынесены мановакуумметры, измеряющие давление в водородном резервуаре и в контейнере. Три игольчатых вентиля обеспечивают управление всеми подготовительными операциями, а также процессами заливки водорода, сжижения дейтерия и завершающими операциями после окончания опыта. Четвертый игольчатый вентиль установлен в выхлопной системе.

При работе с мишенью используется второй форвакуумный насос, а также баллон с гелием. Все соединения в распределительной головке и на пульте управления - вакуумплотные.

Конструкция сифона, используемого для заливки жидкого водорода, обеспечивает возможность перекрытия заливочной трубки, а также уплотнения в направляющей трубке распределительной головки.

Дейтериевый регенератор

Конструкция мишени позволяет производить сжижение дейтерия, которое осуществляется в дейтериевой трубке. Хранение газа и регенерация жидкого дейтерия происходит в системе, состоящей из баллона емкостью 40 литров и сосуда емкостью 5,8 литра, заполненного активированным углем /рис. 9/. Сосуд с активированным углем охлаждается в процессе регенерации до температуры жидкого азота. Сосуд содержит 1,6 кг активированного угля, способного при температуре жидкого азота при нормальном давлении поглотить 200 литров газообразного дейтерия. Регенератор заполняется газообразным дейтерием до давления около 5 атмосфер, что соответствует 49 г дейтерия. Баллон и сосуд соединены непосредственно. На выходе системы баллона и сосуда имеется игольчатый вентиль. Давление в сосуде измеряется манометром на 10 атмосфер.

111. Тепловой расчет мишени

Азотный резервуар и азотный экран

В тепловом расчете азотной системы достаточно учесть:

а/ теплопроводность остаточного газа; б/ температурное излучение через вакуумное пространство; в/ теплопроводность поддерживающих труб и центрирующих винтов.

А. Теплопроводность остаточного газа

Коэффициент теплопроводности газа при нормальном давлении и температуре - постоянная величина. Для воздуха коэффициент теплопроводности равен $\lambda_0 = 6,1 \cdot 10^{-5}$ кал/град.см.сек при $T = 300^\circ\text{K}$ и $\lambda_0 = 1,775 \cdot 10^{-5}$ кал/град.см.сек при $T = 80^\circ\text{K}$. Если откачки не производить, то при среднем значении $\bar{\lambda}_0 = 4 \cdot 10^{-5}$ кал/град.см.сек в этом интервале температур поток тепла на азотный резервуар площадью $S = 6,1 \cdot 10^3 \text{ см}^2$ составит

$$Q_0 = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{220}{5} \cdot 6,1 \cdot 10^3 \cdot 36 \cdot 10^3 = 3,88 \cdot 10^4 \text{ кал/час.}$$

Скорость испарения жидкого азота при этом будет равна $\frac{3,88 \cdot 10^4}{38,5 \cdot 10^3} = 1$ литр/час.

Конвекция не была учтена в этом расчете и фактическая скорость испарения будет значительно больше.

Откачка рубашки приводит к снижению эффективности конвекции, а также к уменьшению теплопроводности, так как для разреженных газов теплопроводность пропорциональна давлению. Граница раздела области постоянного коэффициента и его линейной зависимости определяется давлением p_0 , при котором длина свободного пробега молекул сравнивается с характерными размерами откачиваемого объема, т.е. когда $\lambda_{cp}(p_0) \approx d_{cp}$, где d_{cp} - среднее расстояние между стенками, равное около 5 см в данной конструкции. В первом приближении можно принять $d_{cp} = \lambda_{cp}(p_0) = \frac{7 \cdot 10^{-8} \cdot 760}{p_0} = 5$ см, откуда

$$p_0 \approx 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$$

Если давление в рубашке равно $p \sim 10^{-4}$ мм.рт.ст., то $\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{p}{p_0} \sim 0,1 \lambda_0$, а $Q = 0,1 Q_0 = 3880$ кал/час. Скорость испарения

составит 0,1 литра/час.

Нарушение вакуума при охлажденном азотном резервуаре приведет к увеличению теплопроводности и вызовет конвекцию. Однако основной эффект будет состоять в том, что на поверхности резервуара сконденсируется влага и углекислота. Это в очень сильной степени скажется на отражающей поверхности наружных стенок резервуара, приведет к увеличению интенсивности температурного излучения, которое, как будет показано ниже, создает основной поток тепла к азотному резервуару.

Б. Температурное излучение через вакуумное пространство

Поток температурного излучения между двумя концентрическими сферами или длинными цилиндрами равен

$$Q = \frac{A_i e_i e_\sigma \sigma}{e_\sigma + e_i (1 - e_\sigma) \rho} (T_\sigma^4 - T_i^4),$$

где индекс i относится к внутренней поверхности, σ - к внешней поверхности, A_i - площадь внутренней поверхности, $\sigma = 4,9 \cdot 10^5$ кал/м² час град⁴ - постоянная Стефана-Больцмана, e_i и e_σ - испускательные способности поверхностей, T_i и T_σ - установившиеся температуры поверхностей, $\rho = A_i/A_\sigma$ - отношение площадей. Для азотного резервуара в данной конструкции имеем $T_\sigma = 300^\circ\text{K}$; $T_i = 77^\circ\text{K}$; $A_i/A_\sigma \sim 1,7$; $e_i = 0,1$; $e_\sigma = 0,3$; $\frac{e_i e_\sigma}{e_\sigma + e_i (1 - e_\sigma) \rho} = 0,07$. Значение $e_i = 0,1$ соответствует хорошо отполированной хромированной поверхности азотного резервуара. В результате получим:

$$Q = 0,61 \cdot 0,07 \cdot 8,1 \cdot 10^9 \cdot 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ кал/час} = 17000 \text{ кал/час.}$$

Скорость испарения азота под действием этого потока равна 0,45 литра/час.

Рассмотрим возможные пути уменьшения температурного излучения.

В. Радиационный экран

С этой целью можно использовать радиационный экран. При отсутствии экрана плотность потока температурного излучения равна

$$\frac{d^2 Q_{12}}{dS dt} = \alpha (T_1^4 - T_2^4),$$

где T_1 и T_2 - температуры поверхностей. Если поместить экран, в котором установится температура T_3 , то потоки температурного излучения от первой поверхности к экрану и от экрана ко второй, более холодной, поверхности в установившемся режиме будут равны, т.е.

$$\frac{d^2 Q_{13}}{dS dt} = \alpha (T_1^4 - T_3^4) = \alpha (T_3^4 - T_2^4) = \frac{d^2 Q_{32}}{dS dt},$$

откуда $T_1^4 - T_3^4 = T_3^4 - T_2^4$ или $T_3^4 = \frac{1}{2}(T_1^4 + T_2^4)$.

Поток температурного излучения при наличии экрана будет равен

$$\frac{d^2 Q_{32}}{dS dt} = \frac{1}{2} \frac{d^2 Q_{12}}{dS dt},$$

т.е. установление одного экрана приводит к уменьшению потока в два раза.

При наличии n - экранов поток уменьшится в $(n+1)$ раз.

В конструкции мишени предусмотрен радиационный экран, охватывающий боковую поверхность экранного барабана, площадь которого $0,2 \text{ м}^2$.

В результате поток тепла уменьшается на величину

$$\Delta Q = 1/2 \cdot 0,2 \cdot 0,07 \cdot 8,1 \cdot 10^9 \cdot 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ кал/час} = 2 \cdot 800 \text{ кал/час.}$$

Результирующий поток температурного излучения составит

$$Q_0 = Q - \Delta Q = 13.200 \text{ кал/час.}$$

Г. Теплопроводность через поддерживающие трубы и центрирующие винты

Коэффициент теплопроводности нержавеющей стали, монель-металла и других сплавов, используемых в криогенной технике, уменьшается с уменьшением температуры. При вычислении потока тепла необходимо учитывать эти зависимости. В первом приближении можно принять, что коэффициент теплопроводности зависит от температуры линейно, т.е.

$$k = \alpha + \beta (T - T_1).$$

Если воспользоваться условием постоянства потока тепла во всех сечениях трубы, то

$$q = [\alpha + \beta(T - T_1)] \frac{dT}{dx}.$$

Интегрируя это выражение, получим:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{q}{(\alpha - \beta T_1) + \beta T} \quad q x + C_1 = (\alpha - \beta T_1) T + \frac{\beta}{2} T^2.$$

Подставив граничные условия:

$$T = T_1 \quad x = 0$$

$$T = T_2 \quad x = \alpha,$$

где α - длина трубы, находим:

$$q\alpha = (\alpha - \beta T_1)(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2}(T_2^2 - T_1^2).$$

Эта формула будет часто применяться в дальнейшем.

Зависимость коэффициента теплопроводности монель-металла, испытывавшего обработку давлением, определяется следующими крайними значениями:

$$k^{300} = 0,06 \text{ кал/град.см.сек}; \quad k^{17} = 0,034 \text{ кал/град.см.сек.}$$

Отсюда $\alpha = 3,4 \cdot 10^{-2}$; $\beta = 1,17 \cdot 10^{-4}$. Подставляя эти значения в формулу, получим

$$q\alpha = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 223 + \frac{1,17 \cdot 10^{-4}}{2} / 9 \cdot 10^4 - 0,6 \cdot 10^4 / = 5,6 + 4,9 = 10,5.$$

Длина подвесных труб азотного резервуара равна $\alpha = 16$ см, а площадь сечения $S = 0,97$ см² /всех четырех труб/.

Количество тепла, передаваемое по этим трубам, равно:

$$Q = 0,97 \cdot \frac{10,5}{16} = 0,64 \text{ кал/сек} = 2300 \text{ кал/час.}$$

Если пренебречь температурной зависимостью коэффициента теплопроводности органического стекла и принять его равным $k_0 = 6 \cdot 10^{-4}$, то количество тепла, передаваемого через центрирующие винты составит $/ S = 1,5$ см² ;

$\alpha = 1,5$ см/:

$$Q = 1,5 \text{ см}^2 \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{223}{1,5} = 0,134 \text{ кал/сек} = 480 \text{ кал/час.}$$

Таким образом, поток тепла к азотной системе складывается из следующих частей:

- 1/ теплопроводность остаточного газа - 3880 кал/час.
- 2/ температурное излучение через вакуумное пространство при наличии радиационного экрана вокруг азотного экрана - 13200 $\frac{\text{кал}}{\text{час}}$.
- 3/ теплопроводность подвесных труб - 2300 кал/час
- 4/ теплопроводность центрирующих винтов - 4800 кал/час.

Всего на азотный резервуар $Q^{N_2} \sim 19.860$ кал/час.

Все это тепло идет на испарение жидкого азота, скрытая теплота испарения которого равна $38,5 \text{ кал/см}^3$ жидкости. Скорость испарения жидкого азота составит

$$\frac{19,860}{38,5 \cdot 10^3} = 0,5 \text{ литра/час.}$$

Учитывая, что объем азотного резервуара равен 4,25 литра, найдем эффективную длительность хранения жидкого азота

$$\tau_0^{N_2} = \frac{4,25}{0,5} = 8,5 \text{ часов.}$$

Расчетная величина скорости испарения жидкого азота находится в согласии с наблюдаемой, так как при установившемся режиме в азотный резервуар приходится доливать ~ 1 литр азота через каждые 4 часа.

Водородный резервуар

А. Теплопроводность поддерживающей трубки с учетом теплообмена между выходящим газом и стенками

Вычислим поток тепла через основную поддерживающую трубку. Исходим опять из линейной зависимости коэффициента теплопроводности от температуры

$$k = \alpha + \beta(T - T_1).$$

Используя значения $k^{37} = 3,4 \cdot 10^{-2}$; $k^{20} = 1 \cdot 10^{-2}$, находим $\alpha = 1 \cdot 10^{-2}$; $\beta = 4,22 \cdot 10^{-4}$, а $\alpha - \beta T_1 = 0,16 \cdot 10^{-2}$. Тогда

$$q\alpha = 0,16 \cdot 10^{-2} \cdot 57 + \frac{4,22 \cdot 10^{-4}}{2} \cdot 0,56 \cdot 10^4 = 0,09 + 1,18 = 1,27.$$

При длине трубы на участке до азотного резервуара $a = 32$ см и площади сечения $S = 0,72$ см², получаем

$$Q = 0,72 \cdot \frac{1,27}{32} = 0,0286 \text{ кал/сек} = 103 \text{ кал/час.}$$

При движении выходящего газа по трубе происходит теплообмен между газом и стенками трубы. Этому способствуют медные диски, установленные на дейтериевой трубе, которые имеют отверстия для выхода газа.

Решить задачу о теплообмене в этих условиях очень трудно. При оценке эффекта теплообмена мы исходили из результатов расчета и измерений для более простого случая. В нашем случае следует ожидать уменьшение потока тепла приблизительно в 3 раза. Таким образом, поток тепла через трубу с учетом теплообмена, будет равен $Q_0 \sim \frac{103}{3} \sim 35$ кал/час.

Б. Теплопроводность управляющей трубки и трубки дейтериевой системы.

Если на трубках не устанавливать медных дисков, один из которых обеспечивает тепловой контакт с азотным резервуаром, то:

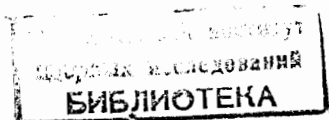
$$\alpha = 1 \cdot 10^{-2}; \quad \beta = 1,79 \cdot 10^{-4}; \quad \alpha - \beta T_1 = 0,64 \cdot 10^{-2};$$

$$a = 50 \text{ см}; \quad \Delta T = 280.$$

$$q\alpha = 0,64 \cdot 10^{-2} \cdot 280 + \frac{1,79 \cdot 10^{-4}}{2} / 9 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^2 / = 1,8 + 8,1 = 9,9$$

$$Q = \frac{9,9}{50} \cdot 0,18 \text{ см}^2 = 0,026 \text{ кал/сек} = 94 \text{ кал/ час.}$$

Установка дисков приводит к тому, что градиент температуры на участке, примыкающем к водородному резервуару, понизится. При этом



$$qa' = 1,27 ; \quad a' = 30 \text{ см, а}$$

$$Q = \frac{1,27 \cdot 0,13}{30} = 0,0055 \text{ кал/сек} = 20 \text{ кал/час.}$$

Теплообмен выходящего газа с трубками уменьшит этот поток до

$$Q \sim \frac{20}{3} \sim 7 \text{ /кал/час.}$$

Дополнительно к азотному резервуару поступит тепло, равное

$$qa = 10,5 \quad a = 20 \text{ см} \quad S = 0,13 \text{ см}^2.$$

$$Q = \frac{10,5}{20} \cdot 0,13 = 0,068 \text{ кал/сек} = 245 \text{ кал/час,}$$

которое почти не изменит условия хранения жидкого азота в резервуаре.

В. Теплопроводность через полистироловые и тефлоновые изоляторы радиационного экрана

Считаем коэффициент теплопроводности полистирола величиной постоянной, равной $k_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ кал/град.см.сек. Тогда при $S = 0,6 \text{ см}^2$; $a = 2 \text{ см}$; $\Delta T = 40^\circ$ /так как температура радиационного экрана равна около 60°K /

$$Q = 3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,6 \cdot \frac{40}{2} = 13 \text{ кал/час.}$$

Аналогично для тефлона $k_0 = 6 \cdot 10^{-4}$ кал/град.см.сек.

$$S = 0,21 \text{ см}^2 ; \quad a = 2 \text{ см} ; \quad \Delta T = 40^\circ.$$

$$Q = 6 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot 0,21 \cdot 1/2 \cdot 10^{-3} \cdot 3,6 \cdot 10^3 = 9 \text{ кал/час. Общий поток } Q = 22 \text{ кал/час.}$$

Г. Температурное излучение

Для водородного резервуара и аппендикса имеем:

$$T_0 = 77^\circ ; \quad e_i = 0,1 ; \quad e_0 = 0,3 ; \quad A_0/A_i \sim 1,5 ;$$

$$\frac{e_0 e_i}{e_0 + e_i (1 - e_0) \rho} = \frac{0,1 \cdot 0,3}{0,3 + 0,1 \cdot 0,7 \cdot 1,5} = 0,075 ; \quad S = 0,2 \text{ м}^2$$

Поток температурного излучения составит

$$Q = 0,2 \cdot 0,075 \cdot 0,36 \cdot 10^8 \cdot 4,9 \cdot 10^{-5} = 26,5 \text{ кал/час.}$$

Радиационный экран охватывает площадь около $0,1 \text{ м}^2$, что приводит к уменьшению потока на величину

$$\Delta Q = \frac{0,1}{2} \cdot 0,075 \cdot 0,36 \cdot 10^8 \cdot 4,9 \cdot 10^{-5} = 6,6 \text{ кал/час,}$$

в результате : $Q_0 \approx 20 \text{ кал/час.}$

Предварительное испытание мишени было проведено с открытыми окнами в азотном экране. Температурное излучение, проникающее через эти окна от наружного кожуха равнялось

$$Q = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2 \cdot 0,3 \cdot 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ кал/м}^2 \text{ час град. } 4,9 \text{ град}^4 = 3 \cdot 10^3 \text{ кал/час.}$$

Учитывая эффективный угол захвата температурного излучения и закон испускания $\sim \cos \theta$, находим долю поглощаемого излучения:

$$\gamma = 1/2 \cdot 2 \cdot 7,5/13 \cdot 0,8 = 0,14 \text{ или } Q'_0 = 420 \text{ кал/час.}$$

Если эти окна закрыть отражающими фольгами, что было сделано позднее, то $Q_0 = 5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3 \cdot 4,9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,36 \cdot 10^8 = 26 \text{ кал/час, а } Q'_0 = 4 \text{ кал/час.}$

Д. Тепловыделение при конверсии ортоводорода в параводород.

Скорость конверсии ортоводорода определяется соотношением:

$$\frac{1}{N_0} \frac{dN_0}{dt} = k N_0,$$

где N_0 - доля ортомoleкул, k - постоянная конверсия. В нормальных условиях $k \sim 0,012 \text{ }^1/\text{час}$. Тепло, выделяющееся при конверсии в жидком водороде, приводит к дополнительной скорости испарения, равной

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dt} = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v} \frac{dN_0}{dt}$$

где n - объем жидкости, ΔH_c - теплота конверсии, ΔH_v - теплота испарения / $\frac{\Delta H_c}{\Delta H_v} = 1,43 \pm 0,04\%$. Постоянная конверсии существенно зависит от присутствия различных примесей, играющих роль катализатора. В частности,

присутствие кислорода в концентрации 0,01% увеличивает скорость конверсии приблизительно в 3 раза.

При объеме жидкого водорода в 3,5 литра скорость испарения в начальный момент времени, когда доля ортомолекул наибольшая, равна

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=0} = 1,43 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,75 \cdot 3,5 \cdot 10^3 = 34 \text{ см}^3/\text{час},$$

а

$$Q^{\text{эф}} = 34 \cdot 7,6 = 260 \text{ кал/час.}$$

Таким образом, поток тепла к водородному резервуару складывается из следующих частей:

- 1/ Теплопроводность поддерживающей трубки и дейтериевой трубки - 42 кал/час
- 2/ Теплопроводность тепловых изоляторов - 22 кал/час.
- 3/ Температурное излучение через вакуумное пространство при наличии радиационного экрана - 24 кал/час.
- 4/ Тепловыделение за счет конверсии ортоводорода в параводород в начальный момент времени - 260 кал/час.

Всего на водородный резервуар $Q^{\text{H}_2} = 348 \text{ кал/час.}$

Скорость испарения жидкого водорода в начальный момент времени должна составлять

$$\frac{348}{7,6} = 46 \text{ см}^3/\text{час.}$$

Эффективная длительность хранения жидкого водорода равна

$$\tau_0^{\text{H}_2} = \frac{3,5 \cdot 10^3}{46} = 75 \text{ часов, т.е. около 3 суток.}$$

Расчетная скорость испарения жидкого водорода с открытыми окнами в азотном экране составляет

$$\frac{348 - 24 + 420}{7,6} = 100 \text{ см}^3/\text{час},$$

а эффективная длительность хранения $\tau_0^{\text{H}_2} = 35 \text{ часов.}$

Фактически наблюдавшаяся скорость испарения жидкого водорода в этих условиях равнялась $108 \text{ см}^3/\text{час}$ в начальный момент, а эффективное время хранения

$$\tau_0^{\text{экспер}} \sim 22 \cdot \frac{3,5}{2,35} = 33 \text{ часа.}$$

Отклонение наблюдаемой скорости испарения от расчетной может быть вызвано неправильным учетом температурного излучения и скорости конверсии, а также пренебрежением теплопроводностью остаточного газа в объеме, непосредственно охватывающем водородный резервуар.

1У. Подготовка мишени к опытам

Для обеспечения длительного хранения водорода в мишени необходимо до заполнения мишени жидким водородом создать хороший вакуум в кожухе и охладить внутренние детали до температуры жидкого азота. С этой целью мишень откачивается до давления $(3 - 2) \times 10^{-5}$ мм рт.ст. Затем, без прерывания откачки, начинается заливка азота в азотный резервуар. Во время заливки ведутся наблюдения за вакуумом, который должен непрерывно улучшаться, поднимаясь до $(1 - 2) \times 10^{-6}$ мм рт.ст. До начала заливки жидкого азота в мишень вставляется водородный сифон, а резервуар для жидкого водорода и контейнер откачиваются вторым форвакуумным насосом и наполняются гелием.

Игольчатый клапан, соединяющий контейнер с резервуаром во время охлаждения, открыт.

По мере охлаждения давление гелия в мишени непрерывно уменьшается. Чтобы не допустить засасывания воздуха внутрь мишени, давление гелия подерживается не ниже 1,2 - 1,3 атмосферы. Охлаждение внутренних деталей мишени необходимо проводить не менее 12 часов. Рекомендуется охлаждать мишень в течение значительно большего времени, например до 1,5 - 2 суток. Откачку при этом не ведут и только перед заливкой жидкого водорода мишень откачивается вновь.

Непосредственно перед заливкой водорода система, заполненная гелием, откачивается. В этих условиях производят измерение начальных емкостей конденсаторов измерителя уровня. Игольчатый вентиль водородного резервуара перекрывается.

Жидкий водород через сифон переливается из переносного дьюара. Запорный вентиль водородного сифона открывают, газообразный водород устремляется в водородный резервуар. Избыточное давление гелия в переносном дьюаре гонит жидкий водород через сифон в водородный резервуар. Перед этой операцией необходимо открыть выхлопной вентиль водородной мишени.

Из-за бурного испарения жидкого водорода в водородном резервуаре избыточное давление в системе достигает 0,2 атмосферы. В процессе заливки производят измерение емкости нижнего, а затем и верхнего конденсаторов. После того, как верхний конденсатор погрузится в жидкий водород, переливание производят еще 2 - 3 минуты, пока не начнется скачкообразное повышение давления. Заполнение мишени на этом заканчивают, вынимают водородный сифон и отверстие распределительной головки закрывают.

У. Измерения с жидким водородом

Если необходимо провести измерения с жидким водородом в аппендиксе, то открывают игольчатый вентиль аппендикса, а выхлопной вентиль для испаряющего водорода перекрывают. Через никелевую трубку жидкий водород поступает в аппендикс. Заполнение ведется до тех пор, пока мановакууметр аппендикса не станет показывать скачкообразное нарастание давления. Игольчатый вентиль аппендикса перекрывается с помощью вентиля на пульте управления.

Для того, чтобы выпустить из аппендикса жидкий водород, открывают игольчатый вентиль аппендикса и через вентиль на пульте управления подают гелий так, чтобы установилось избыточное давление около 400 мм рт.ст. Жидкий водород выходит обратно в резервуар через никелевую трубку. После того как весь водород перелился в резервуар, давление в аппендиксе резко уменьшается, игольчатый вентиль аппендикса перекрывается.

Эти две операции можно производить повторно необходимое количество раз.

У1. Измерения с жидким дейтерием

Дейтерий из регенератора подается в предварительно откачанный аппендикс с помощью вакуумной резиновой трубки внутренним диаметром 2 мм и толщиной стенок 6 мм.

Начальное давление в регенераторе около 5 атмосфер. Игольчатый вентиль на выходе регенератора открывается и газообразный дейтерий поступает в дейтериевую трубку, которая проходит через водородный резервуар. Поскольку при нормальном давлении температура кипения жидкого водорода равна $-252,7^{\circ}\text{C}$ /, а дейтерия $-249,9^{\circ}\text{C}$ /, то происходит сжижение дейтерия на стенках и он стекает в аппендикс. Подача дейтерия происходит под небольшим избыточным давлением около 0,9 - 1.0 атм, что ускоряет сжижение.

Процесс сжижения считают законченным, когда давление в регенераторе упадет до 2 атм. Вентиль на выходе регенератора перекрывается.

У11. Завершающие операции

После окончания опыта производят испарение дейтерия. С этой целью при закрытом кране между баллоном и сосудом регенератора активированный уголь охлаждается жидким азотом. Способность активированного угля поглощать дейтерий возрастает до 180 см^3 на 1 г угля. Таким образом, 1,6 кг угля может поглотить 288 л газообразного дейтерия. В объеме аппендикса находится 240 см^3 жидкого дейтерия, что соответствует 190 л. газа. Поэтому охлажденный активированный уголь не только поглощает весь дейтерий, но и понижает давление в аппендиксе до 500 мм рт.ст. В этих условиях потери газообразного дейтерия за один цикл работы составят не более 200 - 250 см^3 .

Чтобы испарить весь дейтерий, необходимо удалить жидкий водород из водородного резервуара. Это производят с помощью выхлопного сифона, который устанавливают в мишень через распределительную головку. Конец сифона доходит до самого дна водородного резервуара. Если уплотнить этот сифон в распределительной головке и над жидким водородом создать избыточное давление в 0,5 атм, то жидкий водород удаляется и улавливается вентиляционной системой.

После поглощения газообразного дейтерия охлаждение сосуда с активированным углем прекращают, выходной вентиль регенератора перекрывают, а кран между баллоном и сосудом открывают. Давление в регенераторе медленно повышается до 5 атм.

Окончательной завершающей операцией является удаление следов газообразного водорода в тракте: водородный резервуар, игольчатый вентиль аппендикса, никелевая трубка, дейтериевая трубка - с помощью продувания по этому тракту газообразного гелия.

Чтобы нагрев мишени происходил без поломок, необходимо оставить открытыми отверстия для заливки жидкого азота, открыть игольчатый вентиль аппендикса, выхлопной вентиль на пульте. Остальные вентили на пульте перекрывают.

После нагрева мишени через 20 - 40 часов рекомендуется откачать систему водородного резервуара и аппендикса, а затем перекрыть все вентили на пульте управления.

У111. Техника безопасности

Газообразный водород в смеси с воздухом представляет собой взрывоопасную смесь, если объемная концентрация водорода в воздухе находится в пределах от 4,1% до 75%. Температура воспламенения таких взрывоопасных смесей равна $350^{\circ} + 590^{\circ}\text{C}$. Поэтому при работе с жидким водородом необходимо принимать меры, которые предотвращали бы образование открытой взрывоопасной смеси, а если в случае аварии такая смесь и образовалась, создать такие условия, которые полностью исключали бы возможность взрыва.

Мишень для жидкого водорода закрыта кожухом, соединенным с мощной вытяжной вентиляцией. Испаряющийся водород удаляется в атмосферу, минуя лабораторное помещение, через газоотводную трубку.

Подробное описание правил работы, транспортировки и всех операций с учетом требований техники безопасности приведено в инструкциях.

Авторы работы выражают благодарность А.Г.Зельдовичу и В.Т.Смолянкину за рекомендацию работы по созданию дейтериевого регенератора, Г.Гель-

феру, О.В.Савченко и Г.Е.Косареву за участие в испытаниях дейтериевого регенератора, а также Н.А.Петухову за помощь в изготовлении водородного резервуара.

Авторы признательны К.А.Байчеру и всему коллективу криогенной группы: В.Н.Дмитриевской, Ю.А.Кузнецову и А.В.Чекменеву за бесперебойную работу водородной станции и помощь при испытаниях.

Рукопись поступила в издательский отдел 29 августа 1959 года.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

Дьюары для длительного хранения жидкого водорода и гелия и сифоны для заливки

1. A.Wexler, H.Jacket. Сосуд для хранения жидкого гелия .
Rev.Sci. Instr., 22, 282, 1951.
2. O.Growzaler, David White, H. Johnston. Простой сосуд для транспортировки гелия. Rev.Sci.Instr., 22, 702, 1951.
3. S.Sydoriak, H.Sommers. Сосуд для хранения жидкого гелия с низкой скоростью испарения. Rev. Sci.Instr., 22, 915, 1951.
4. W. Giauque. Сосуды из пирекс-стекла для жидкого гелия и металлические заливочные трубы. Rev.Sci.Instr., 18, 852, 1947.
5. M.Desirant, W.Horvath. Заливочная трубка для гелиевого криостата. Collins. Rev.Sci. Instr., 19, 718, 1948.
6. R.Scott, J.Cook. Гелиевый сжижитель типа Simon с заправочным сифоном, Rev.Sci.Instr., 19, 889, 1948.
7. R.Mathewson. Гибкая заливочная труба для жидкого водорода. Rev.Sci.Instr., 26, 616, 1955.
8. J.Scott. Заливочная трубка для жидкого водорода и гелия. Rev.Sci.Instr., 25, 929, 1954.

9. M.Fishe. Соединения в трубке для заливки жидкого водорода и гелия. Rev.Sci.Instr., 26, 90, 1955.
10. G.S.Janes, L.G.Hyman, C.J.Strumski. Мишень для жидкого водорода и дейтерия, охлаждаемая гелием. Rev.Sci.Instr., 27, 527, 1956.

Описание водородных мишеней

11. R.White, M.Jacobson, A.Schultz. Образование заряженных фотомезонов от дейтерия и водорода. /Описывается мишень высокого давления/. Phys.Rev., 88, 836, 1952.
12. L.Cook. Мишень с жидким водородом. Rev.Sci.Instr. 22, 1006, 1951.
13. E.Whalin, Ir.R.A.Reitz. Мишень с жидким водородом, дейтерием и гелием для экспериментов на ускорителях. Rev.Sci.Instr., 26, 59, 1955.
14. L.Marshall. Сосуд из стирофома /пено/ для жидкого водорода. Rev.Sci.Instr., 26, 614, 1955.
15. Panofsky, R.Aamodt, J.Hadley. Спектр γ -квантов от захвата π^- -мезонов в водороде и дейтерии. /Описывается сосуд высокого давления/. Phys.Rev., 81, 565, 1951.

Тепловой расчет дьюаров для жидких газов

16. A.Wexler, Скорость испарения жидкого гелия. J.Appl.Phys., 22, 1463, 1951.

Орто - пара-конверсия в жидком водороде

17. E. Grilly. Сжижение и хранение частично конвертированного жидкого водорода. Rev.Sci.Instr., 24, 1, 1953.
18. A.Larsen, F.Simon, C.Swenson. Скорость испарения жидкого водорода в зависимости от орто-пара конверсии. Rev.Sci.Instr., 19, 266, 1948.

19. D.Weitzel, J.White. Непрерывный анализ орто/пара концентрации в во-
Rev.Sci.Instr., 26, 290, 1955. д орде.
20. W.Giauque. Конвертор для получения пара-водорода.
Rev.Sci.Instr., 25, 886, 1954.

Указатель уровня жидкости для водорода и гелия

21. W.Williams, E.Maxwell. Указатель уровня жидкости при низкой темпера-
Rev.Sci.Instr., 25, III, 1954. уре.
22. J.Gaffney, J.Clement. Трубка для обнаружения уровня гелия.
Rev.Sci.Instr., 26, 620, 1955.
23. A.Brown, M.Zemansky, H.Boorse. Чувствительный и устойчивый тер-
мометр в области $2^{\circ} - 20^{\circ}\text{K}$. Phys.Rev., 84, 1050, 1951.
24. W.Kitts, F.Harler. Указатель уровня жидкого гелия для металлических
Rev.Sci.Instr., 25, 926, 1954. дьюаров.
25. J.Dash, H.Bowse. Скорость распространения пленок гелия \bar{l} по разным
поверхностям. /Описание указат.уровня/. Phys.Rev., 82, 851, 1951.
26. A.Wexler, W.Corak. Измерение и контроль уровня жидкостей кипящих
при низкой температуре. Rev.Sci.Instr. 22, 941, 1951.
27. J.Jeldmeier, B.Serin. Указатель уровня жидкого гелия.
Rev.Sci. Instr., 19, 916, 1948.
28. J.Babiskin. Поплавок для жидкого гелия. Rev.Sci.Instr.
21, 941, 1950.

Материалы, применяемые при низких температурах

29. I.Estermann, J.Zimmerman. Теплопроводность сплавов при низкой тем-
J.Appl.Phys. 23, 578, 1952. пературе.
30. C.Swenson. Механические свойства тефлона при низких температурах.
Rev, Sci.Instr., 25, 834, 1954.

31. R.Powell, Don.O.Coffin. Теплопроводность меди при низкой температуре.
Rev.Sci.Instr., 26, 516, 1955.
32. H.Wahlin. Проникновение водорода через металлы.
J.Appl.Phys. 22, 1503, 1951.

Вакуумное уплотнение

33. В.А.Ланис и Л.Е.Левина. Практические основы вакуумных испытаний.1955.
Госэнергоиздат. 1955г.

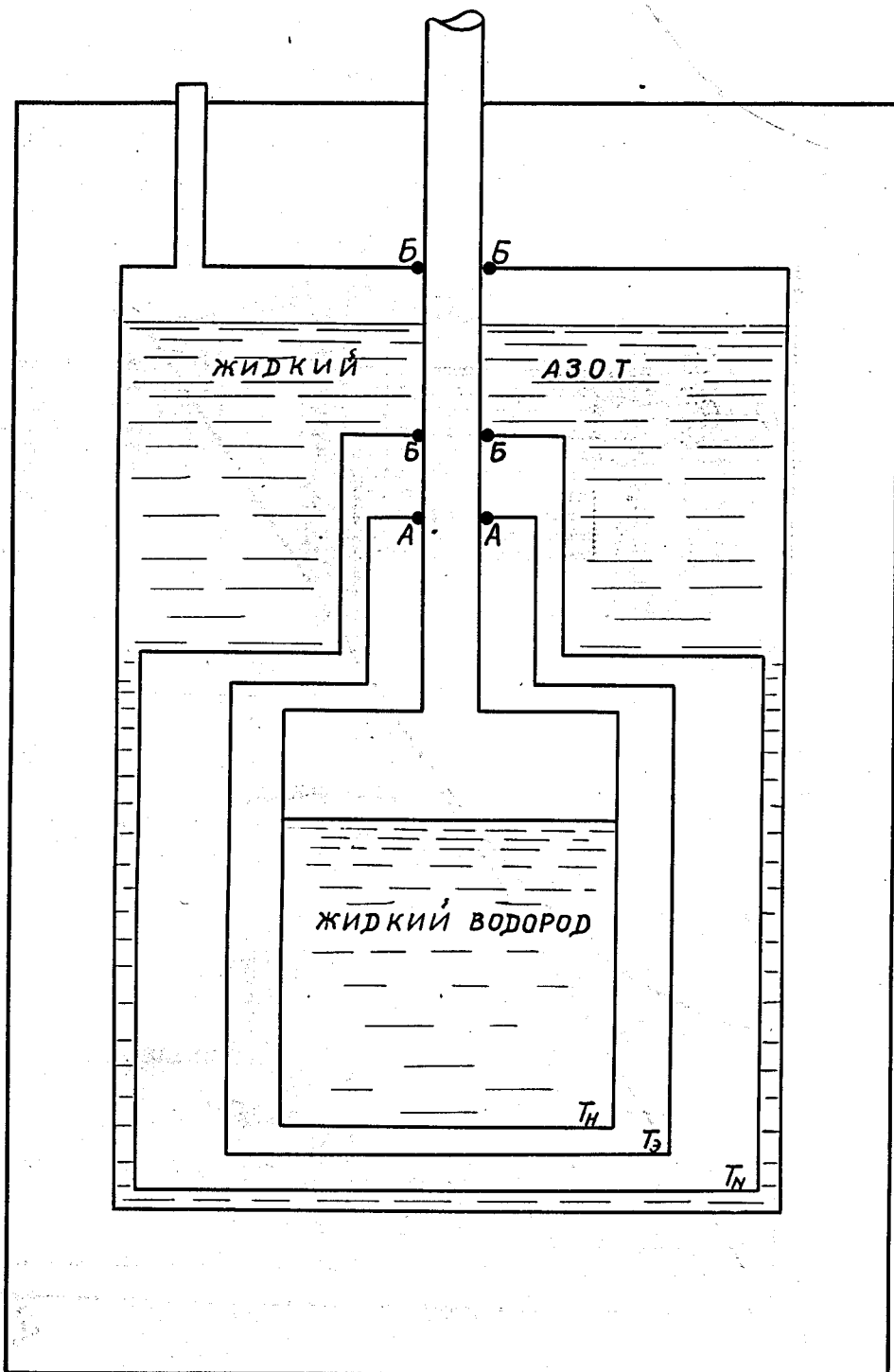


Рис.1. Схема мишени.

А, Б - точки подвески

$T_H < T_3 < T_N$ - температура водорода,
экрана и азота.

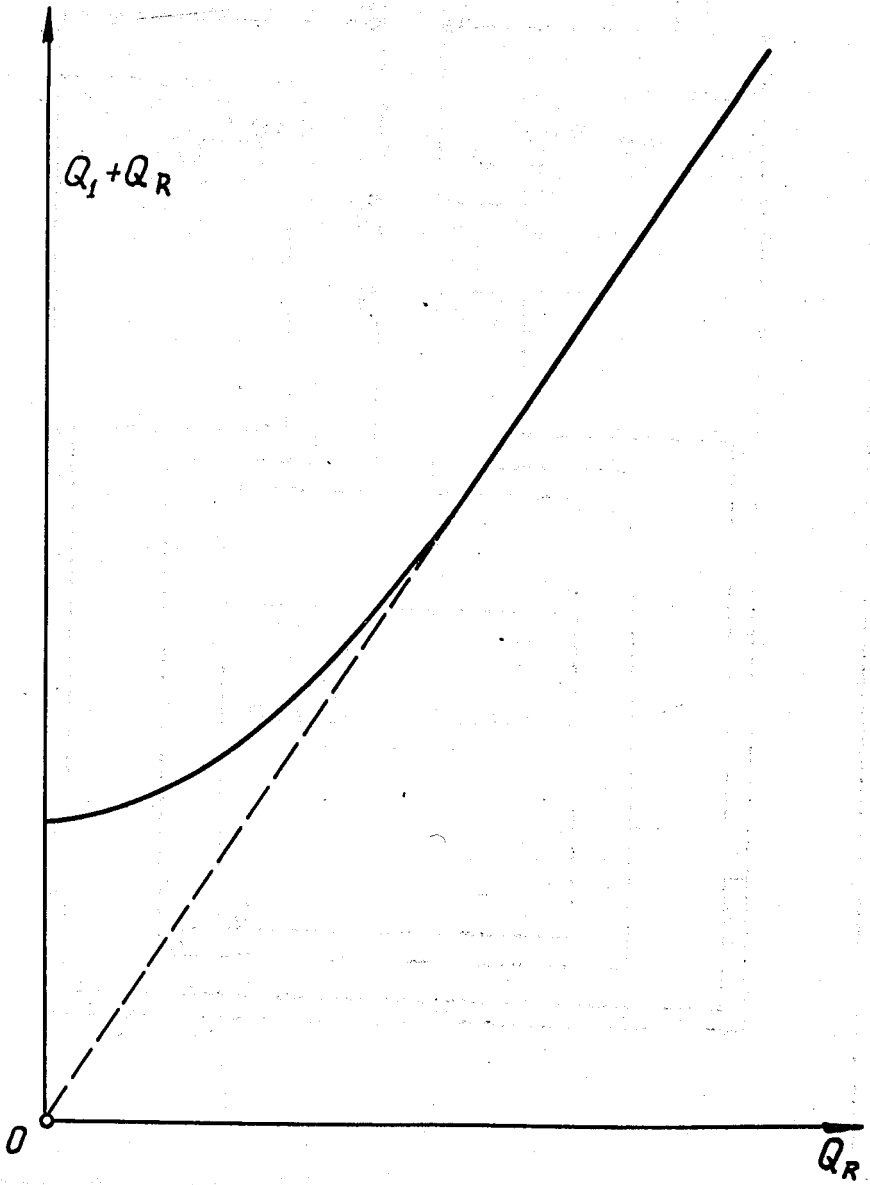


Рис. 2.
Зависимость полной скорости
испарения от радиационного потока Q_R .

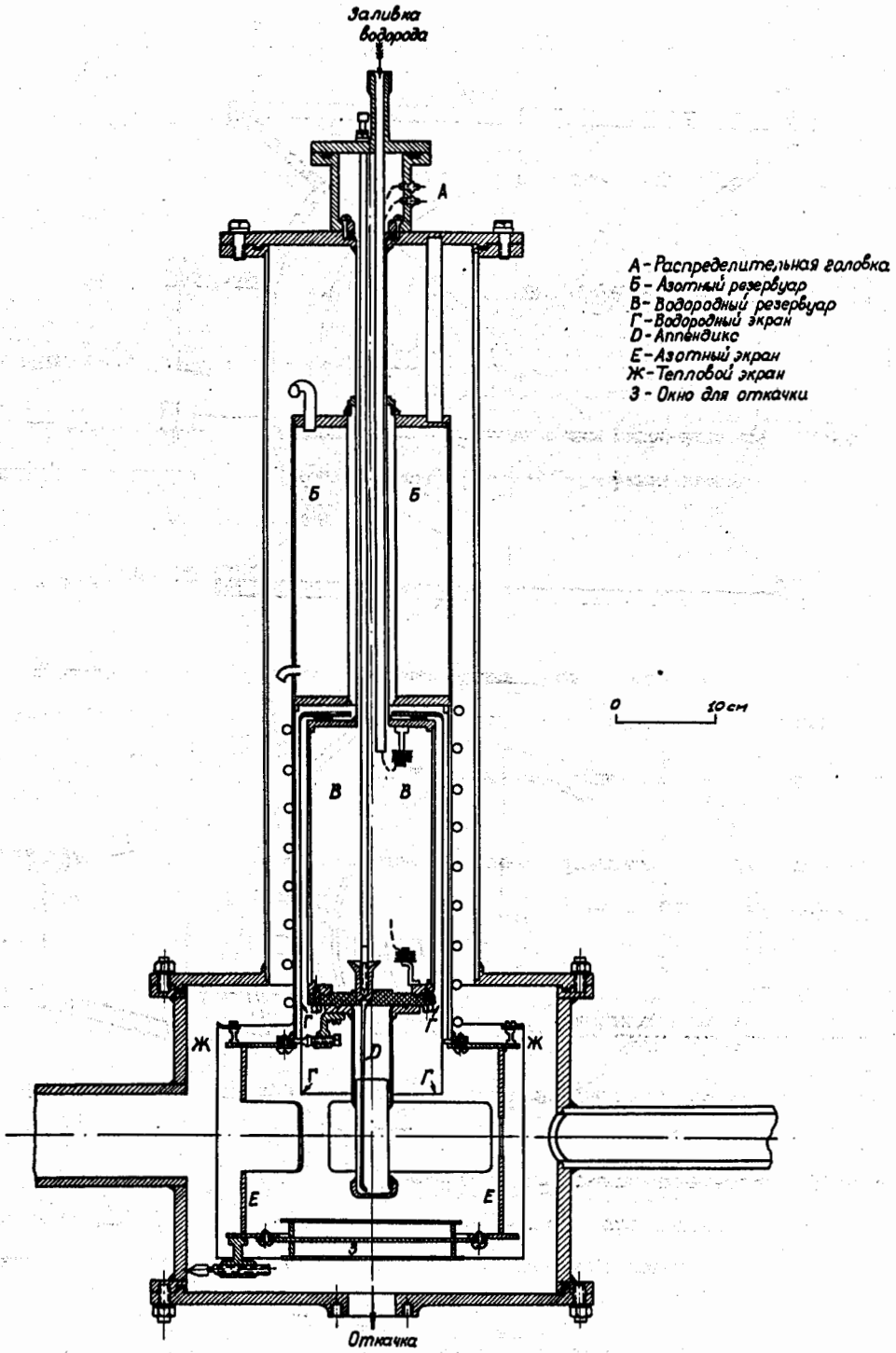
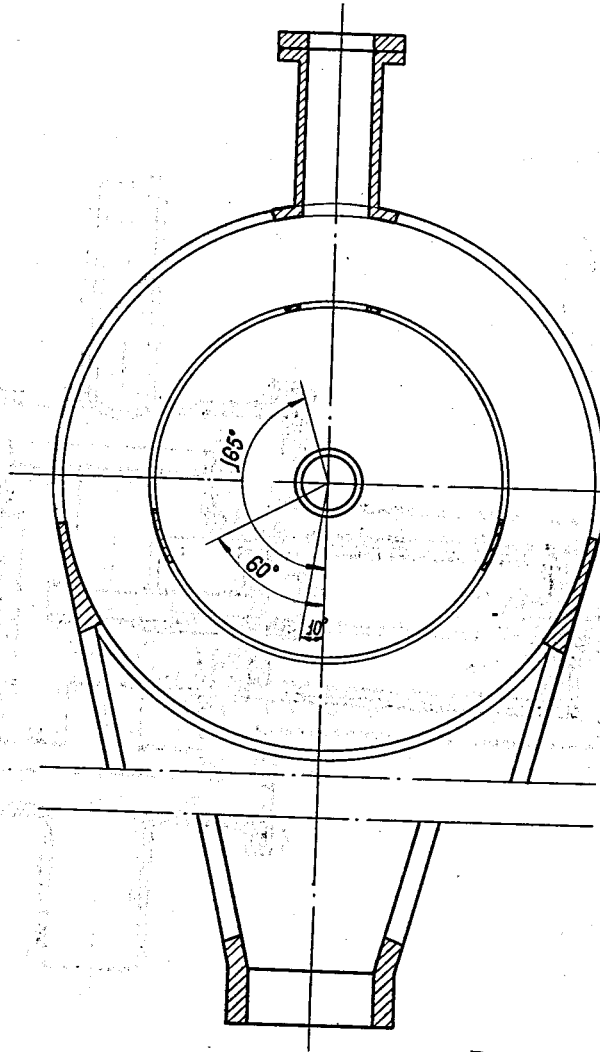


Рис. 3. Конструкция мишени.

ВАРИАНТ I



ВАРИАНТ II

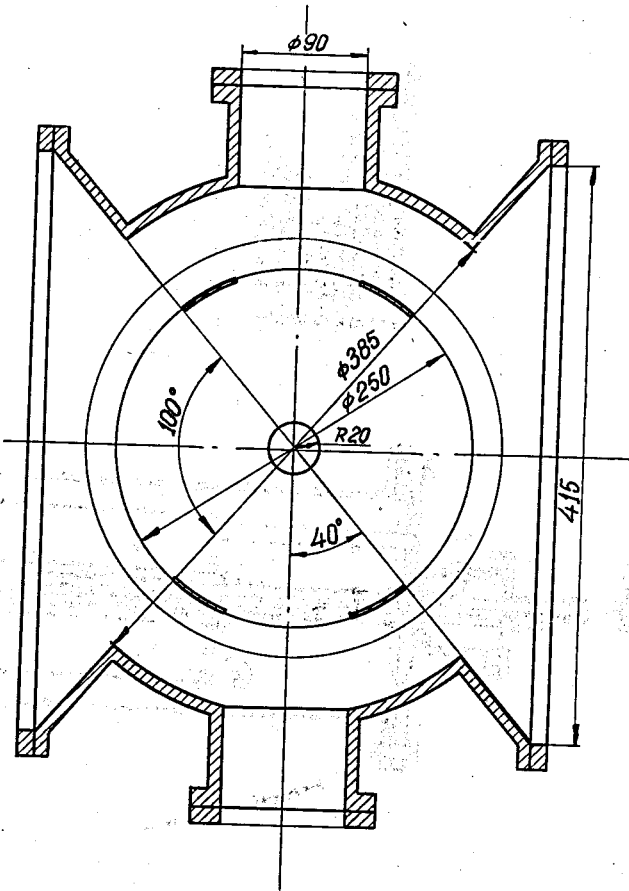


Рис.4. Разрез мишеней в плоскости пучка.

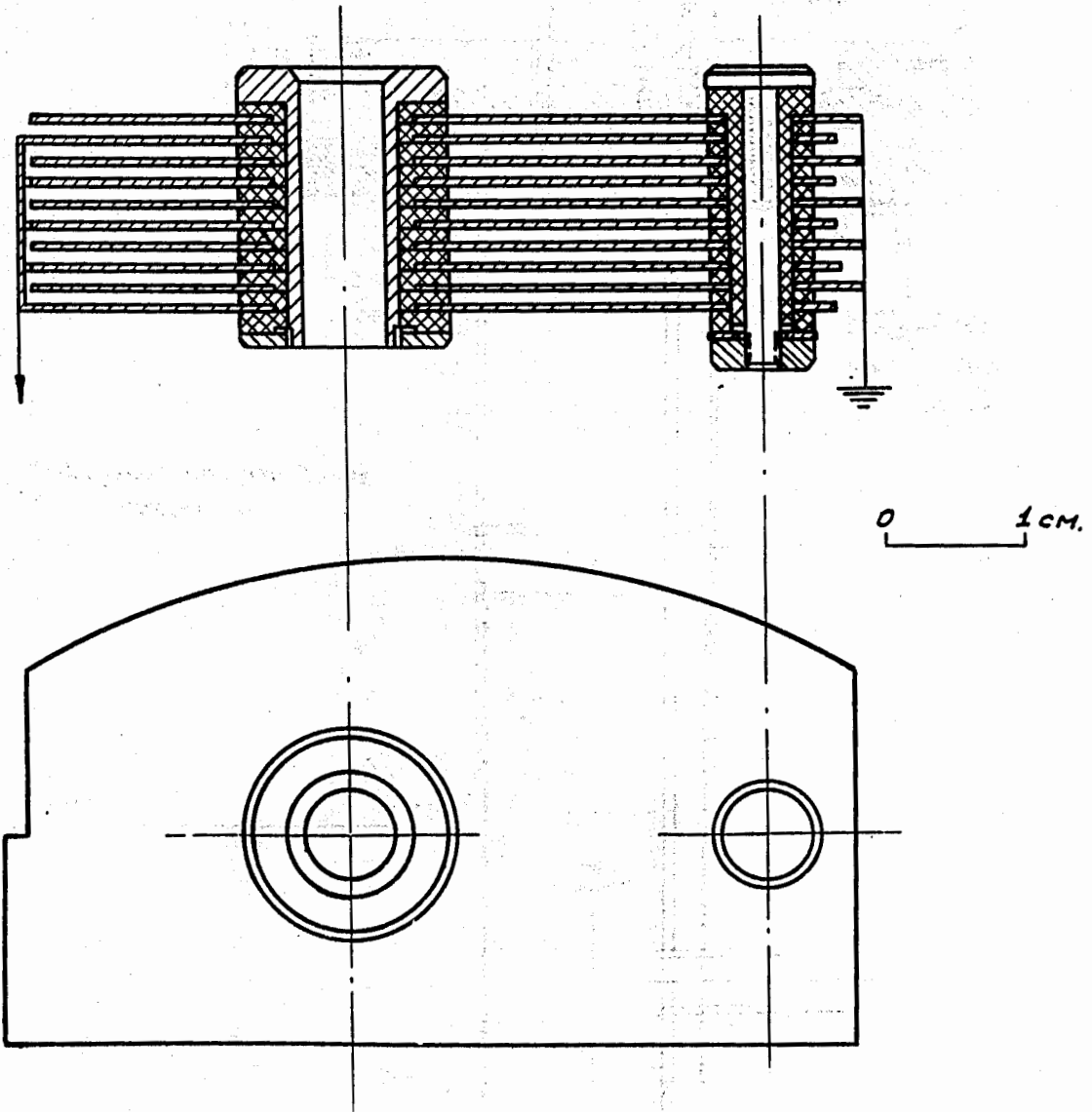


Рис. 5. Устройство конденсаторов указателей уровня.

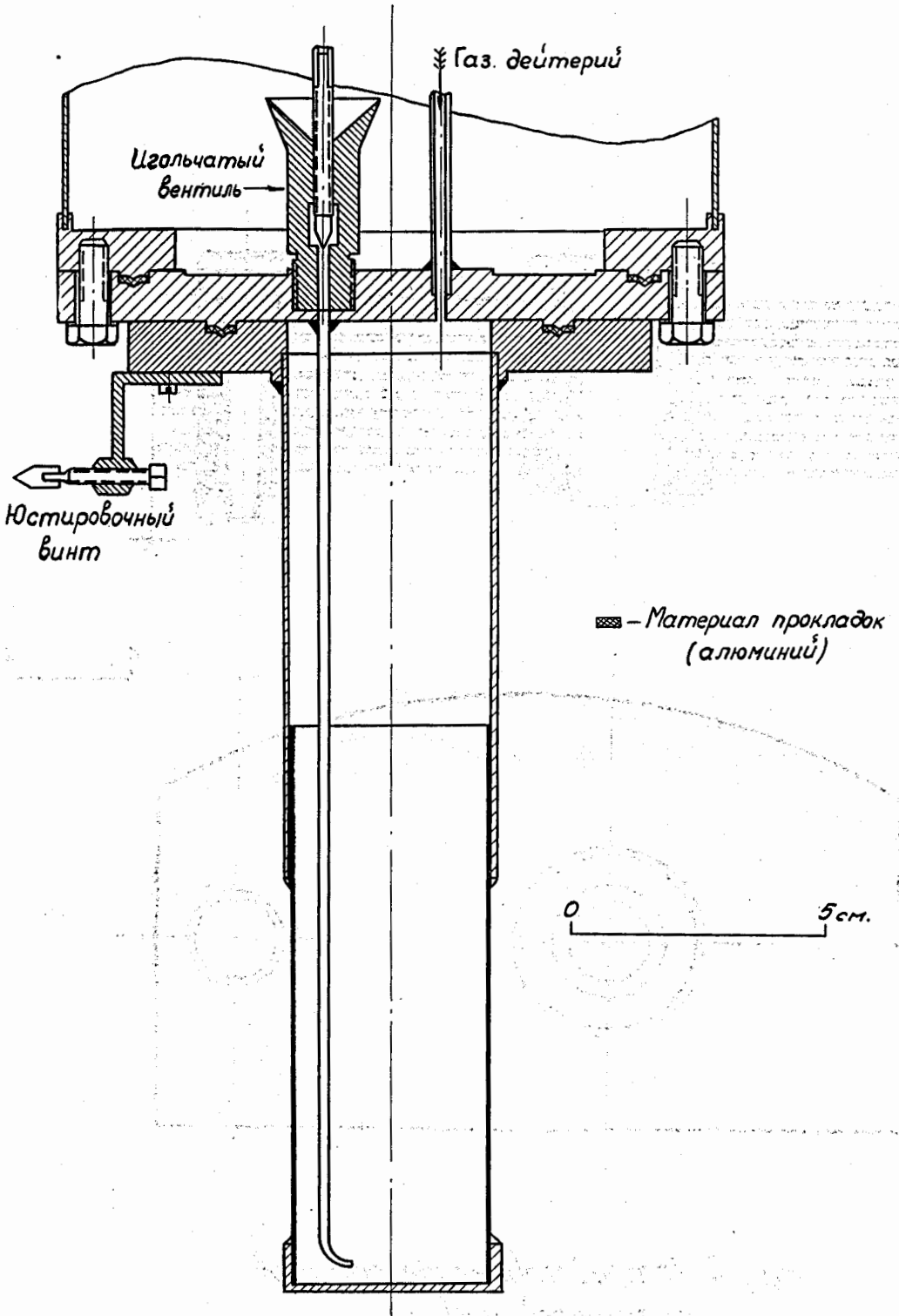


Рис. 6. Разрез аппендикса и нижней части водородного резервуара.

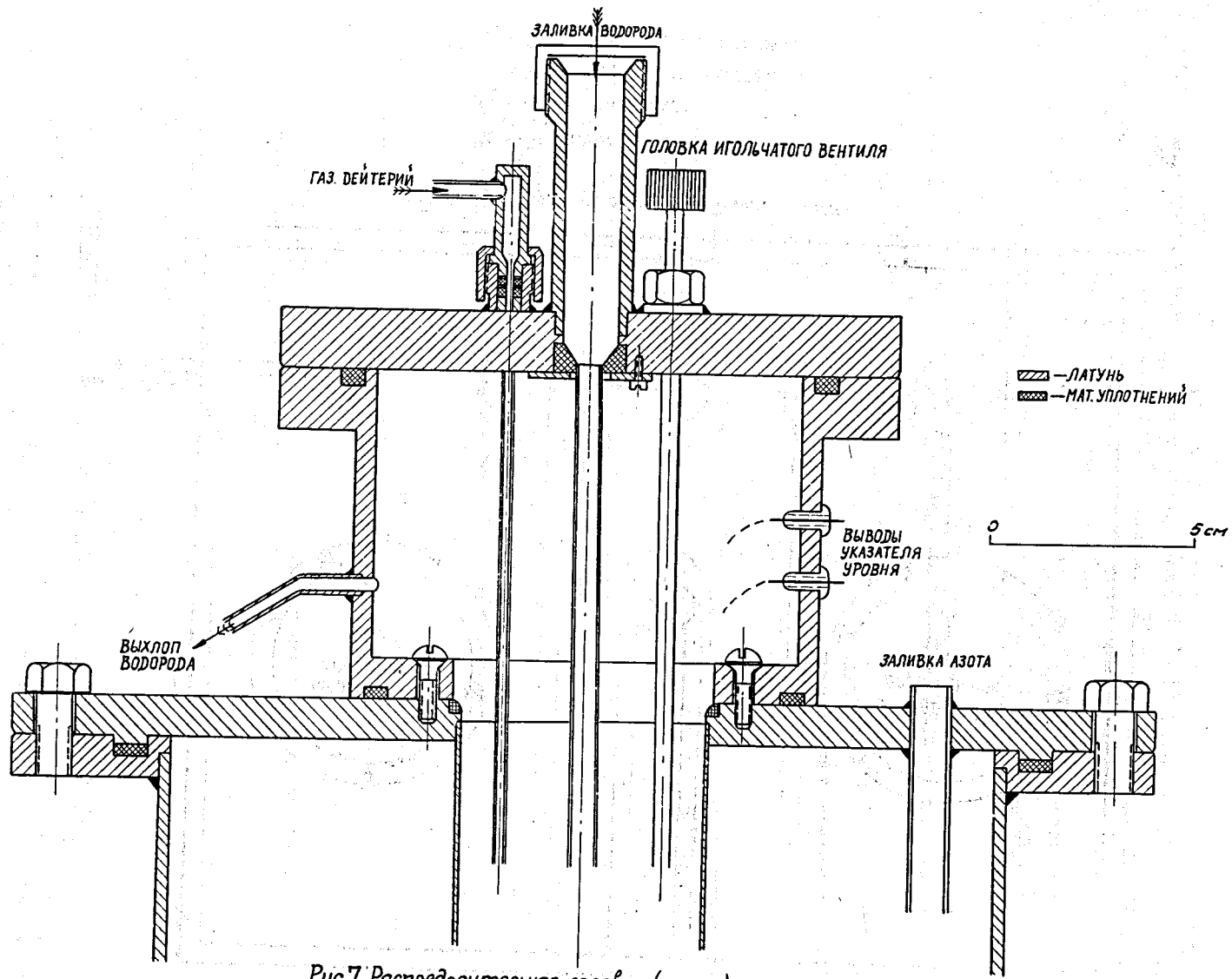


Рис. 7. Распределительная головка (схема).

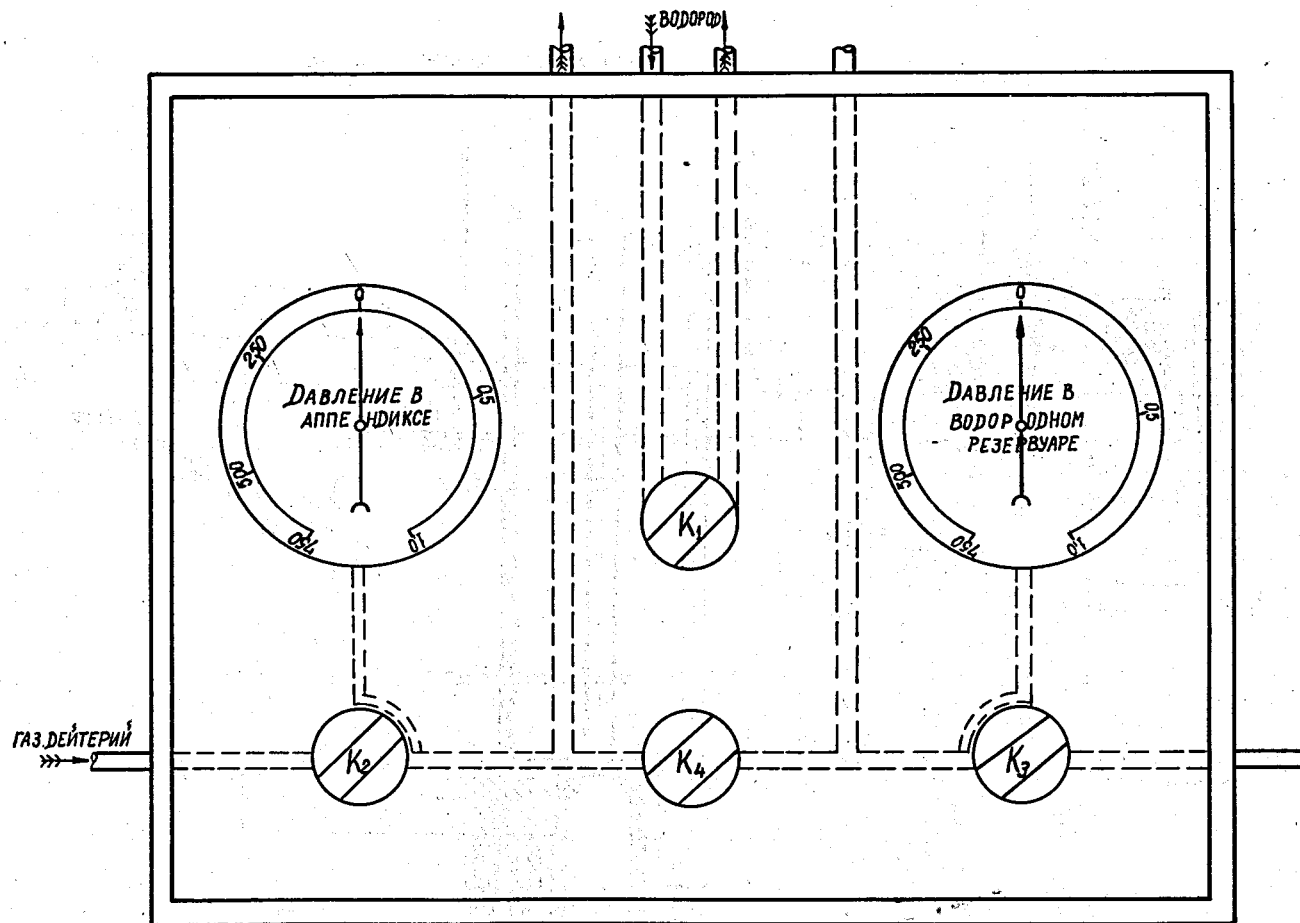


Рис. 8. Схема пульта управления мишени.

- K_1 - Выхлопной вентиль.
- K_2 - Кран аппендикса
- K_3 - Кран водородного резервуара
- K_4 - Соединительный вентиль.

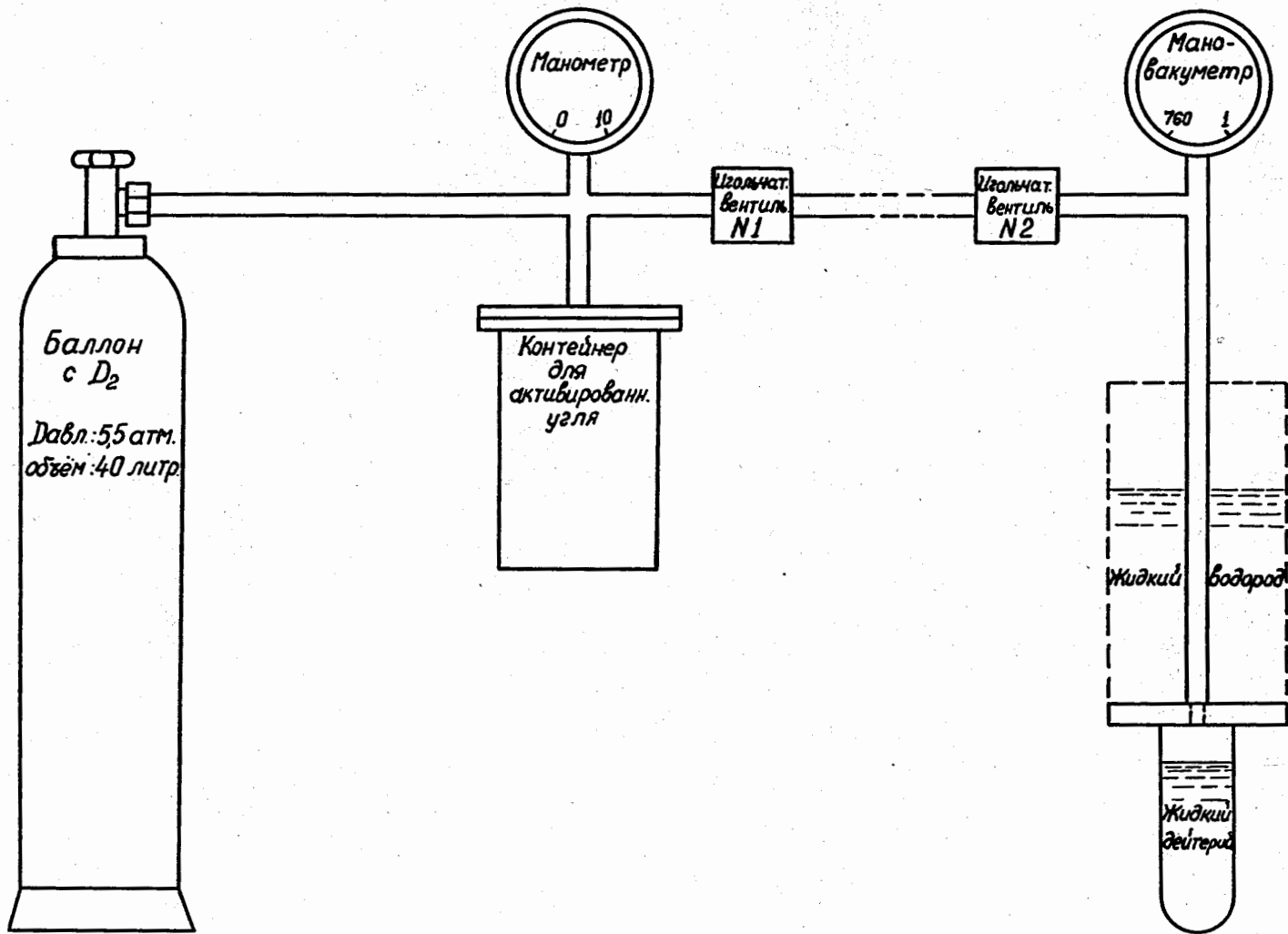


Рис.9. Схема дейтериевого регенератора.