

Г-61

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л.Б. Голованов

8 - 3490

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЙ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В КРИОГЕННЫХ УСТРОЙСТВАХ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель -
доктор технических наук

А.Г.Зельдович

Дубна 1967

Л.Б. Голованов

8 - 3490

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЙ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В КРИОГЕННЫХ УСТРОЙСТВАХ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель -
доктор технических наук

А.Г.Зельдович



4760 89

В в е д е н и е

В ядерной экспериментальной физике для изучения свойств элементарных частиц широко используются жидководородные мишени и жидководородные пузырьковые камеры в сочетании с различными детекторами. Основными требованиями, предъявляемыми к мишени как к физическому прибору, являются, с одной стороны, минимальная толщина стенок мишени и теплоизоляции, находящихся на пути частиц, и с другой - небольшой теплоприток к жидкому водороду.

Для удовлетворения противоречивых требований, предъявляемых к мишени, при создании внутреннего сосуда и вакуумного кожуха широко использовались тонкостенные гибкие оболочки. В качестве теплоизоляции была выбрана самая эффективная многослойная изоляция, которая из-за специфики конструкции мишени работает при различных механических нагрузках на нее - от нескольких граммов до килограмма на см.² При создании первых образцов мишеней данные по коэффициентам теплопроводности отечественных многослойных изоляций отсутствовали. Впоследствии такие данные появились, но они не содержали сведений о теплопроводности изоляций, находящихся под внешними нагрузками, и, кроме того, они значительно расходились с результатами, полученными на изделиях.

Для получения более точных значений коэффициента теплопроводности многослойных изоляций и оценки точности измерений был создан прибор и разработана новая методика, позволяющие производить измерения при нагрузке на изоляцию от 1 до 1000 г/см². Описанию этого прибора и методики и посвящена первая часть диссертации.

Во второй части диссертации приведены величины коэффициентов теплопроводности некоторых отечественных многослойных изоляций в зависимости от давления в изоляционном пространстве и от давления на изоляцию при трех граничных холодных температурах: азотной, водородной и гелиевой.

В третьей части рассмотрен вопрос использования многослойных изоляций в криогенных приборах для ядерных исследований.

Часть первая. Прибор и методика определения коэффициентов теплопроводности многослойных изоляций

В отличие от существующих данный прибор дает возможность определить тепловой поток через образец изоляции одновременно по количеству испарившейся жидкости и по мощности, подаваемой на нагреватель. Двойной контроль теплового потока позволяет точнее находить величины коэффициентов теплопроводности и оценивать ошибки измерений.

С помощью прибора можно измерить коэффициенты теплопроводности изоляций при давлении в изоляционном пространстве от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ мм рт.ст. и усилия сжатия изоляции от 1 до 1000 г/см² в диапазоне температур от 350 - 100°К до 77,8; 20,4 или 4,2°К. Схема прибора для определения коэффициентов теплопроводности показана на рис. 1. Постоянное давление в основном и охранном бачках поддерживалось независимо от изменения барометрического давления стабилизатором давления с точностью ± 1 мм вод.ст.

Количество испарившейся жидкости определялось с помощью специально разработанного газгольдера. Коэффициент теплопроводности находился по формуле Фурье. Относительная точность определения коэффициента теплопроводности зависит от точности измерения величин, входящих в формулу Фурье.

Точность измерения толщины, площади поверхности образца и перепада температур равна соответственно: $\Delta \delta = \pm 3\%$, $\Delta F = \pm 0,3\%$, $\Delta \Delta T = \pm 0,1\%$. Основной задачей при определении коэффициента теплопроводности является измерение теплового потока через образец изоляции и оценка его точности.

Измерение теплового потока, проходящего через рабочую часть образца изоляции. Краевой эффект

Главным условием, которое должно выполняться при измерении теплового потока, проходящего через образец изоляции, является тождественность потока тепла через исследуемый образец потоку тепла через изоляцию такой же толщины, но неограниченных размеров. Измеряемый тепловой поток через рабочую часть образца может быть искажен теплообменом, возникающим между рабочей частью образца и окружающими его с торца поверхностями. В идеальных условиях, при отсутствии краевого эффекта, испарение жидкости в основном бачке прибора (рис. 1) должно происходить только за счет тепла, идущего от основного нагревателя. Всякий другой тепловой поток к основному бачку или основному нагревателю вносит ошибку в измеряемую величину.

В диссертации показано, что ошибка при измерении теплового потока через образец изоляции, возникающая от краевого эффекта, может быть определена. Для определения ошибки при измерении теплового потока рассмотрено два предельных случая защиты торца изоляции: первый - торец образца изоляции защищен экраном, имеющим температуру жидкости, заливаемой в основной бачок (рис. 2б-1), второй - экран, защищающий торец, имеет температуру нагревателя (рис. 2а-1).

В первом случае защитный экран холодней, чем торец образца изоляции. Поэтому от нагревателя только часть тепла идет к основному бачку, а остальное тепло - к экрану. Тепловой поток, замеренный по испарителю q_U , будет меньше, а тепловой поток, замеренный по нагревателю q_H , будет больше, чем идеальный тепловой поток q_0 , т.е. $q_U < q_0 < q_H$.

Во втором случае защитный экран теплей, чем торец изоляции. Поэтому тепловой поток к основному бачку идет от нагревателя и от экрана. При этом $q_U > q_0 > q_H$.

Для того, чтобы q_0 заведомо лежало между q_U и q_H , необходимо, чтобы был односторонний тепловой поток по всей высоте образца или от торца изоляции к защитной поверхности, как в первом случае, или наоборот, как во втором. Это главное условие защиты торца. При соблюдении главного условия защиты торца искомый тепловой поток будет равен

$$q_0 = K \frac{q_U + q_H}{2}, \quad (1)$$

где K - коэффициент, зависящий от распределения температур в образце и защищающей его поверхности. В первом приближении этот коэффициент можно принять равным единице.

Относительная ошибка измерения теплового потока, возникающая от краевого эффекта, равна

$$\Delta_{к.э.} = \pm \frac{q_H - q_U}{q_H + q_U} \cdot 100. \quad (2)$$

На нашем приборе защита торца исследуемого образца производилась многослойной изоляцией с фиксированными температурами верха и низа (рис. 2в-1). Для фиксации температуры многослойная изоляция, собранная в виде ленты, прикреплялась соответственно верхней частью к охранному бачку, а нижней к охранному нагревателю.

На рис. 2 даны 3 различных варианта: а, б, в, в которых выполняется главное условие защиты торца изоляции, и для сравнения вариант г, в котором основное условие защиты торца не выполняется. Из рис. 2- II видно, что в вариантах а, б, и в кривые распределения температур по высоте образца изоляции и защитной поверхности не пересекаются, т.е. существует однонаправленный тепловой поток. В этих вариантах q_0 лежит между q_U и q_H . В варианте г - кривые распределения температур пересекаются, т.е. существует двухнаправленный тепловой поток, - главное условие защиты торца не выполняется. В этом случае q_U и q_H больше, чем q_0 .

В табл. 1 даны величины тепловых потоков для четырех вариантов, приведенных на рис. 2.

Таблица 1

Величины тепловых потоков, замеренных по количеству испарившейся жидкости и по мощности нагревателя, в зависимости от способа защиты торца образца изоляции

Способ защиты торца изоляции	Тепловой поток, мВт	
	q_U	q_H
а : Тепловой экран $T_3 = 293^{\circ}\text{K}$	50	27
б : Холодный экран $T_3 = 77,6^{\circ}\text{K}$	23,4	56
в : Многослойная изоляция с фиксированными температурами верха и низа	24,5	32,5
г : Незащищенный торец	48	37,5

Многочисленные измерения, произведенные по разработанной методике, показывают, что относительная ошибка при определении теплового потока, обусловленная краевым эффектом и подсчитанная по формуле (2), колеблется для различных изоляций и при различных условиях измерений от ± 5 до $\pm 30\%$.

Т о ч н о с т ь о п р е д е л е н и я п о т о к а п о
к о л и ч е с т в у и с п а р и в ш е й с я ж и д к о с т и

Тепловой поток, замеренный по количеству испарившегося азота, определяется с ошибкой не более $\pm 5\%$. Основные источники ошибок возникают при измерении объема испарившейся жидкости (ошибка составляет от 1,3 до 2,7%) и при колебании давления над кипящей жидкостью. Примеси кислорода в азоте также вносят ошибку. Она составляет около 0,1% при содержании кислорода 1%.

Тепловой поток, замеренный по количеству испарившегося водорода, определяется с ошибкой не более $\pm 4\%$. Основным источником погрешностей являлась конверсия водорода. При 95% р-состава ошибка равна 4,5%.

Тепловой поток, замеренный по количеству испарившегося гелия, определяется с ошибкой не более 2%.

Ф о н о в ы й э ф ф е к т

Большая часть теплопритоков к основному бачку идет через образец изоляции, а небольшая часть (фонный эффект) — от охранный бачка. Фонный эффект возникает в связи с тем, что давление в основном бачке несколько ниже, чем в охранный. Перепад давлений необходим для того, чтобы газ, выходящий из основного бачка, не конденсировался в трубке, омываемой жидкостью охранный бачка. Из различных видов теплопритока к основному бачку только два имеют существенное значение — это теплоприток остаточными газами и теплоприток по стенке горловины, остальными можно пренебречь.

Фонный эффект $q_{\text{ф}}$ был подсчитан и замерен при работе на азоте, водороде и гелии. Измерение фонного эффекта представляет некоторую сложность из-за необходимости тщательного экранирования основного бачка снизу. Величина фонного эффекта на данном приборе составляет не более 10% от минимального теплового потока через изоляцию. Эта величина получена при условии, что азот, заливаемый в основной и охранный бачки, имеет концентрацию не ниже 99,5%. Водород, заливаемый в основной бачок, имеет параконцентрацию не ниже 97%, а разница параконцентрации водорода в основном и охранный бачках не превышает 2%.

Т о ч н о с т ь о п р е д е л е н и я т е п л о в о г о
п о т о к а п о м о щ н о с т и , п о д а в а е м о й н а
о с н о в н о й н а г р е в а т е л ь

Мощность подавалась на основной и охранный нагреватели таким образом, чтобы температуры нагревателей были постоянны и одинаковы. Точность, с которой измерялся тепловой поток по мощности, подаваемой на основной нагреватель, зависит от ряда факторов. Во-первых, от теплообмена между основным и охранный нагревателями, вызванного разницей температур между ними в пределах точности поддержания равенства температур (ошибка составляет 3%). Во-вторых, — от расхода мощности на изменение температуры основного нагревателя в пределах точности ее поддержания (ошибка 6%). В-третьих, — от неточности измерения тока, напряжения и сопротивления, по которым определяется мощность, подаваемая на нагреватель (ошибка 3%). Суммарная предельная ошибка измерения теплового потока $\Delta q_{\text{н}} = \pm 12\%$.

Зная величину фонного эффекта $q_{\text{ф}}$ и точность определения теплового потока по количеству испарившейся жидкости $\Delta q_{\text{у}}$ и по мощности нагревателя $\Delta q_{\text{н}}$, найдем величину теплового потока через изоляцию:

$$q_0 = K \frac{q_{\text{н}} + (q_{\text{у}} - q_{\text{ф}})}{2} \quad (3)$$

Ошибка определения теплового потока через изоляцию равна:

$$\Delta q = \pm \frac{q_{\text{н}} - (q_{\text{у}} - q_{\text{ф}})}{q_{\text{н}} + (q_{\text{у}} - q_{\text{ф}})} 100 + \Delta q_{\text{н}} - \Delta q_{\text{у}} \quad (4)$$

Относительная ошибка при определении коэффициента теплопроводности изоляции может колебаться от 15 до 40%. Увеличение ошибки при определении коэффициента теплопроводности по сравнению с ошибкой при измерении теплового потока обусловлено в основном неточностью измерения толщины образца.

В диссертации показано, что ошибку, возникающую при определении теплового потока через изоляции, можно измерить и при одинарном его контроле, например, по количеству испарившейся жидкости.

Часть вторая. Свойства многослойных изоляций

Во второй части диссертации приведены коэффициенты теплопроводности 6 видов многослойных изоляций, у которых в качестве прокладочных материалов использовались стеклохолст ЭВТИ, стеклобумага СБР или материал ФПП, а в качестве экранов — алюминированная лавсановая пленка или алюминиевая фольга толщиной 10 и 30 мк.

Материал ФПП, или фильтр пылевой Петрянова, предназначен для очистки воздуха от радиоактивных аэрозолей. В ОИЯИ было предложено использовать его в качестве прокладочных материалов для многослойной теплоизоляции. Обладая ультратонкими волокнами, многослойная изоляция с прокладками из ФПП имеет самый низкий коэффициент теплопроводности при давлении в изоляционном пространстве $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. и выше.

Зависимость коэффициентов теплопроводности изоляций от давления в изоляционном пространстве дана в диапазоне $1 \cdot 10^{-5}$ — $1 \cdot 10^{-1}$ мм рт.ст. для гранич-

ной холодной температуры $77,6^{\circ}\text{K}$; $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. для граничной холодной температуры $20,4^{\circ}\text{K}$ и $1 \cdot 10^{-5} - 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. для граничной холодной температуры $4,2^{\circ}\text{K}$.

Зависимость коэффициента теплопроводности изоляции от давления на изоляцию определялась в диапазоне от 1 до 1000 г/см^2 . Были найдены также зависимости объемного веса, количество экранов в единице толщина изоляции и коэффициента сжатия от давления на изоляцию.

Приведенные в диссертации зависимости коэффициента теплопроводности различных изоляций от давления в изоляционном пространстве и давления на изоляцию носят одинаковый качественный характер и отличаются только величинами коэффициентов теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности одной из лучших изоляций, состоящей из стеклотумаги СБР и алюминированной лавсановой пленки, при давлении в изоляционном пространстве $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. и удельном давлении на изоляцию 1 г/см^2 равен $\lambda = (1,1^{+0,2}_{-0,1}) \cdot 10^{-4}$ вт/м град. При сжатии изоляции от 1 до 1000 г/см^2 при давлении в изоляционном пространстве $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. коэффициент теплопроводности увеличивается приблизительно в 6 раз.

Впервые удалось оценить вклад трех видов теплопередачи в общий тепловой поток через изоляцию, а именно: теплопередачи радиацией, контактами и остаточными газами при различном давлении в изоляционном пространстве и различной удельной нагрузке на изоляцию. Для оценки вклада каждого из трех видов теплопередачи на рис. 3 проведена горизонтальная пунктирная линия, ордината которой равна величине коэффициента теплопередачи данной изоляции, замеренной при вакууме $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. без нагрузки на изоляцию (минимальный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{м.и.}} = 0,6 \cdot 10^{-4}$ вт/м град.). Тогда общий тепловой поток через изоляцию, например, при давлении в изоляционном пространстве $4 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. и удельном давлении на изоляцию 3 г/см^2 будет пропорционален отрезку а-г. Тепловой поток радиацией — пропорционален отрезку а-б, тепловой поток через контакты — пропорционален отрезку б-в, тепловой поток остаточными газами будет определяться отрезком в-г. Разделение общего теплового потока на составляющие является ориентировочным, так как в действительности все виды теплопередачи взаимно связаны.

Показано влияние прокладочных материалов в многослойных изоляциях на величину коэффициента теплопроводности. Наименьшим коэффициентом тепло-

проводности при низком давлении в изоляционном пространстве обладают изоляции с прокладкой из стеклотумаги СБР. При высоком давлении $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. лучшими являются изоляции с проставками из материала ФПП;

На примере трех типов изоляции показано, что материал экранов (алюминиевая фольга или алюминированный лавсан) незначительно влияет на величину коэффициента теплопроводности. Расхождения значений коэффициентов теплопроводности изоляции с разными экранами и одним и тем же проставочным материалом лежат в пределах точности измерений.

Измерения коэффициентов теплопроводности изоляций при граничных температурах $293-77,6^{\circ}\text{K}$; $293-20,4^{\circ}\text{K}$ и $293-4,2^{\circ}\text{K}$ позволили найти влияние граничной холодной температуры на величину коэффициента теплопроводности.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что величина теплового потока через многослойную изоляцию в пределах точности измерений не зависит от граничной холодной температуры в интервале температур $77,6-4,2^{\circ}\text{K}$. Отсюда коэффициент теплопроводности многослойной изоляции для граничных температур $293 - T_x$ может быть найдена, если известен, например, коэффициент теплопроводности для граничных температур $293-77,6^{\circ}\text{K}$

Часть третья. Применения многослойных теплоизоляций в криогенных устройствах для ядерной физики

В части III, 1-4 главах диссертации даны описания мишеней с многослойной теплоизоляцией, разработанных в криогенном отделе ОИЯИ, а также величины теплопритоков к ним, полученные расчетно и экспериментально. Основными параметрами мишени являются: количество водорода на пути частиц, определяемое толщиной изоляции и стенок мишени, теплоприток к мишени и ее геометрия. Параметры мишени существенным образом влияют на ее конструкцию.

С точки зрения конструкции внутреннего сосуда и вакуумного кожуха сосуда (мишени) для криогенных жидкостей с вакуумной изоляцией предлагается разделить на 4 категории: 1) жесткие, у которых внутренний сосуд и вакуумный кожух являются жесткими, т.е. не деформируются при откачке; 2) полужесткие, у которых внутренний сосуд жесткий, а наружный гибкий, т.е. при откачке он деформируется и опирается на изоляцию; 3) полумягкие, у которых внут-

ной холодной температуры $77,6^{\circ}\text{K}$; $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. для граничной холодной температуры $20,4^{\circ}\text{K}$ и $1 \cdot 10^{-5} - 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. для граничной холодной температуры $4,2^{\circ}\text{K}$.

Зависимость коэффициента теплопроводности изоляции от давления на изоляцию определялась в диапазоне от 1 до 1000 г/см^2 . Были найдены также зависимости объемного веса, количество экранов в единице толщина изоляции и коэффициента сжатия от давления на изоляцию.

Приведенные в диссертации зависимости коэффициента теплопроводности различных изоляций от давления в изоляционном пространстве и давления на изоляцию носят одинаковый качественный характер и отличаются только величинами коэффициентов теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности одной из лучших изоляций, состоящей из стеклотумаги СБР и алюминированной лавсановой пленки, при давлении в изоляционном пространстве $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. и удельном давлении на изоляцию 1 г/см^2 равен $\lambda = (1,1^{+0,2}_{-0,1}) 10^{-4}$ вт/м град. При сжатии изоляции от 1 до 1000 г/см^2 при давлении в изоляционном пространстве $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. коэффициент теплопроводности увеличивается приблизительно в 6 раз.

Впервые удалось оценить вклад трех видов теплопередачи в общий тепловой поток через изоляцию, а именно: теплопередачи радиацией, контактами и остаточными газами при различном давлении в изоляционном пространстве и различной удельной нагрузке на изоляцию. Для оценки вклада каждого из трех видов теплопередачи на рис. 3 проведена горизонтальная пунктирная линия, ордината которой равна величине коэффициента теплопередачи данной изоляции, замеренной при вакууме $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. без нагрузки на изоляцию (минимальный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{min}} = 0,6 \cdot 10^{-4}$ вт/м град.). Тогда общий тепловой поток через изоляцию, например, при давлении в изоляционном пространстве $4 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. и удельном давлении на изоляцию 3 г/см^2 будет пропорционален отрезку а-г. Тепловой поток радиацией - пропорционален отрезку а-б, тепловой поток через контакты - пропорционален отрезку б-в, тепловой поток остаточными газами будет определяться отрезком в-г. Разделение общего теплового потока на составляющие является ориентировочным, так как в действительности все виды теплопередачи взаимно связаны.

Показано влияние прокладочных материалов в многослойных изоляциях на величину коэффициента теплопроводности. Наименьшим коэффициентом тепло-

проводности при низком давлении в изоляционном пространстве обладают изоляции с прокладкой из стеклотумаги СБР. При высоком давлении $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. лучшими являются изоляции с проставками из материала ФПП.

На примере трех типов изоляции показано, что материал экранов (алюминиевая фольга или алюминированный лавсан) незначительно влияет на величину коэффициента теплопроводности. Расхождения значений коэффициентов теплопроводности изоляции с разными экранами и одним и тем же проставочным материалом лежат в пределах точности измерений.

Измерения коэффициентов теплопроводности изоляций при граничных температурах $293-77,6^{\circ}\text{K}$; $293-20,4^{\circ}\text{K}$ и $293-4,2^{\circ}\text{K}$ позволили найти влияние граничной холодной температуры на величину коэффициента теплопроводности.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что величина теплового потока через многослойную изоляцию в пределах точности измерений не зависит от граничной холодной температуры в интервале температур $77,6-4,2^{\circ}\text{K}$. Отсюда коэффициент теплопроводности многослойной изоляции для граничных температур $293 - T_x$ может быть найдена, если известен, например, коэффициент теплопроводности для граничных температур $293-77,6^{\circ}\text{K}$.

Часть третья. Применения многослойных теплоизоляций в криогенных устройствах для ядерной физики

В части III, 1-4 главах диссертации даны описания мишеней с многослойной теплоизоляцией, разработанных в криогенном отделе ОИЯИ, а также величины теплопритоков к ним, полученные расчетно и экспериментально. Основными параметрами мишени являются: количество водорода на пути частиц, определяемое толщиной изоляции и стенок мишени, теплоприток к мишени и ее геометрия. Параметры мишени существенным образом влияют на ее конструкцию.

С точки зрения конструкции внутреннего сосуда и вакуумного кожуха сосуда (мишени) для криогенных жидкостей с вакуумной изоляцией предлагается разделить на 4 категории: 1) жесткие, у которых внутренний сосуд и вакуумный кожух являются жесткими, т.е. не деформируются при откачке; 2) полужесткие, у которых внутренний сосуд жесткий, а наружный гибкий, т.е. при откачке он деформируется и опирается на изоляцию; 3) полумягкие, у которых внут-

ренный сосуд мягкий, внешний - жесткий; 4) мягкие сосуды, у которых стенки внутреннего сосуда и вакуумного кожуха гибкие.

Возможны варианты смешанных конструктивных решений.

Водородная мишень с плоскими стенками

Условия проведения физического эксперимента требуют, чтобы мишень имела форму прямоугольного параллелепипеда, т.е. обладала плоскими стенками и имела минимальное количество материала на пути частиц в угле 4π . Внутренний сосуд, мишени (см. рис. 4) состоит из каркаса (1), имеющего форму параллелепипеда, к которому со всех сторон вакуумно-плотно припаяны стенки (2) из медной фольги. Вакуумный кожух мишени (3) имеет такую же конструкцию, как и внутренний сосуд. Между внутренним сосудом и вакуумным кожухом находится многослойная изоляция (4), состоящая из стеклотумаги и алюминированной лавсановой пленки толщиной 12 мк. Изоляция боковых стенок состоит из 80, а торцовых из 40 экранов, каждый из которых разделен друг от друга одной прокладкой. Толщина изоляции боковой стенки в рабочем состоянии, т.е. сжатия усилием 1000 г/см^2 , равна 5,8 мм, торцовой - 2,9 мм. При откачке изоляционного пространства мишени гибкие внешняя и внутренняя стенки под действием атмосферного давления деформируются и сжимают изоляцию, заключенную между ними. Таким образом, получается сосуд, в котором нагрузку от давления внутри мишени несут каркас и изоляция, заключенная между двумя гибкими стенками. Расчеты показали, что общий теплоприток к мишени равен 9,0 вт. Теплоприток к мишени был определен также экспериментально. Он равен 12,5 вт. Мишень выдерживает внутреннее давление 0,4 ати. В аварийных режимах, при порче вакуума азотом, максимальное давление в мишени достигает 0,18 ати, при порче вакуума водородом - 0,2 ати. Максимальные тепловые нагрузки при порче вакуума азотом 4200 вт/м^2 , водородом - 5150 вт/м^2 .

Дьюар 100-сантиметровой жидководородной пузырьковой камеры

Одним из возможных вариантов теплоизоляции пузырьковых камер является дьюарная система теплоизоляции. При дьюарной системе теплоизоляции (см. рис. 5) камера (2) подвешена на тягах (6) к крышке дьюара (8) и находится внутри него. Теплоизоляционное пространство дьюара может быть заполнено

любой изоляцией. Основными преимуществами дьюарной системы являются: значительное снижение требований к герметичности корпуса камеры и всех ее соединений, повышение безопасности работы и др. Эти преимущества упрощают конструкцию, увеличивают надежность и облегчают эксплуатацию камеры.

Дьюар 100-сантиметровой жидководородной пузырьковой камеры (см. рис. 5) имеет в сечении вытянутую восьмигранную форму, вписываемую в прямоугольник со сторонами 1580 x 840 мм. Высота дьюара 1903 мм. Полный объем дьюара 1530 л. Внешняя оболочка дьюара - кожух изготовлен из нержавеющей стали толщиной 32 мм и 44 мм. Внутренняя оболочка - обечайка (3) выполнена также из нержавеющей стали и имеет толщину 1,5 мм. Пространство между кожухом и обечайкой заполнено многослойной изоляцией (4), толщина которой в свободном состоянии 40 мм. Теплоизоляция одновременно служит проставочным опорным материалом, на который ложится гибкая тонкостенная обечайка, когда давление внутри дьюара превышает давление в изоляционном пространстве. В данной конструкции дьюара несущим является кожух. Дьюар для 100-сантиметровой жидководородной пузырьковой камеры относится к категории полумягких сосудов.

Для изоляции дьюара 100-сантиметровой камеры была выбрана многослойная изоляция, состоящая из материала ФПП - 15-1,5 толщиной 500 мк и алюминиевой фольги толщиной 30 мк. Верхняя часть обечайки изолирована только материалом ФПП без экранов. Толщина изоляции нижней части обечайки в рабочем состоянии 25 мм. Изоляция днища обечайки имеет толщину 15 мм. При определении теплопритока принимали, что водород залит прямо в дьюар. Теплопритоки к дьюару, полученные расчетно и экспериментально, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Теплопритоки к дьюару, полученные расчётно и экспериментально

	Расчетный, вт.					Σq расч.	Экспериментальный, вт.
	Через изоляцию		По обечайке	Столбом газа	Радиацией		
	к стенкам	к днищу					
без экрана ^{x/}	21,4	14,1	29,4	19,0	30,0	113,7	122,7
с экраном ^{x/}	21,4	14,1	29,4	0	0	69,9	66,0

ПРИМЕЧАНИЕ: Экспериментальное определение теплопритока к дьюару производилось дважды: в первом случае дьюар был закрыт сверху крышкой, имеющей комнатную температуру, во-втором - в непосредственной близости от жидкого водорода находился экран, температура которого была около 50°K.

В диссертации даны описание и полный тепловой расчёт водородной кожухической мишени с лавсановыми окнами и водородной 150-сантиметровой мишени.

Основные результаты и выводы

1. Создан прибор и разработана методика для измерения коэффициентов теплопроводности плоских образцов многослойных изоляций с двойным контролем теплового потока: по количеству испарившейся жидкости и по мощности нагревателя.

Прибор позволяет измерять коэффициенты теплопроводности изоляций в зависимости от давления в изоляционном пространстве в диапазоне 1.10^{-5} -

1.10^{-1} мм рт.ст. и от удельного давления на изоляцию в диапазоне 1-1000г/см² при граничных температурах от 293 до 77,6°K; 20,4 и 4,2°K.

Двойной контроль теплового потока дает возможность точнее определить величину коэффициентов теплопроводности и оценить ошибку измерений.

2. Точность измерения коэффициентов теплопроводности многослойных изоляций по разработанной методике 15-40%. Верхний предел ошибки относится к наиболее эффективным теплоизоляциям. Основные ошибки при измерении коэффициентов теплопроводности вызваны краевым эффектом.

3. Показано, что возможна оценка точности измерений коэффициентов теплопроводности и при одинарном контроле теплового потока при поочередном использовании холодного и теплого экранов, защищающих торец изоляции.

4. Показано, что точность измерений коэффициентов теплопроводности на приборе с цилиндрическими образцами примерно в 2 раза выше, чем на приборе с плоскими образцами, однако использование прибора с плоскими образцами необходимо для изучения влияния на коэффициент теплопроводности сжимающего усилия на изоляцию.

5. Найдена теоретическая и экспериментальная зависимость величины фонового (побочного) теплопритока к основному бачку от давления в изоляционном пространстве в диапазоне от 1.10^{-5} до 1.10^{-1} мм рт.ст. при различных температурах (77,8; 20,4 и 4,2°K). Величина фонового эффекта для всех условий работы прибора - не более 10% от величины теплового потока через изоляцию.

6. Найдено, что теплоприток свечением по горловине незначителен и при оценке фонового эффекта им можно пренебречь. Изгиб горловины основного бачка для уменьшения теплопритока свечением, применяемый в ранее описанных работах, не нужен, он только усложняет конструкцию прибора.

7. Выяснено влияние концентрации кислорода в жидком азоте на фоновый эффект. Увеличение концентрации кислорода с 0 до 0,5% увеличивает фоновый эффект в 2 раза.

8. Найдено, что ошибки, возникающие при измерении теплового потока по количеству испарившейся жидкости, зависят от рода жидкости и колеблются в диапазоне 3-5%. Основными источниками ошибок являются ошибки при измерении объема испарившейся жидкости, ошибки от колебания давления над кипящей жидкостью, ошибки из-за ортопараконверсии водорода.

9. Произведены измерения коэффициентов теплопроводности образцов многослойной изоляции с экранами из фольги и алюминированного лавсана и прокладками из стеклотолы СБР, стеклотолы ЭВТИ и материала ФПП. Лучшей оказалась изоляция, состоящая из стеклотолы и металлизированного лавсана. Она имеет при давлении в изоляционном пространстве $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст., удельном давлении 1 г/см^2 и граничных температурах $293 - 77,8^\circ\text{K}$ коэффициент теплопроводности, равный

$$\lambda = 1,1_{-0,1}^{+0,2} 10^{-4} \text{ вт/м град.}$$

Без нагрузки коэффициент теплопроводности этой изоляции равен

$$\lambda = 0,6_{-0,1}^{+0,2} 10^{-4} \text{ вт/м град.}$$

10. Для некоторых образцов многослойной изоляции найдены зависимости объемного веса, количества экранов и коэффициента сжатия от давления на изоляцию в пределах $1-1000 \text{ г/см}^2$.

11. Предложено использовать в качестве прокладочного материала для многослойной изоляции фильтр пылевой Петрянова марки ФПП. Преимуществом изоляции с ФПП является меньший коэффициент теплопроводности по сравнению с другими изоляциями при давлении выше $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.

12. Измерения коэффициентов теплопроводности многослойных изоляций с экранами из алюминированного лавсана и алюминиевой фольги показали, что материал экранов не влияет на величину коэффициентов теплопроводности в пределах ошибки измерений.

13. Экспериментально показано, что тепловой поток через многослойную изоляцию практически не зависит от граничной холодной температуры в диапазоне $77,8 - 4,2^\circ\text{K}$.

14. Оценен вклад каждого из трех видов теплопередачи в многослойной изоляции: радиацией, контактами и остаточными газами.

15. Полученные экспериментальные данные были использованы при создании криогенных устройств для ядерной физики. В частности:

а) Создана плоская тонкостенная жидководородная мишень, у которой внутренний сосуд и вакуумный кожух сделаны из медной фольги толщиной

50 мк. Между стенками мишени находится многослойная изоляция, сжатая атмосферным давлением.

б) Создана жидководородная мишень с окнами из лавсановой пленки (толщиной 100 мк), которая отделяет жидкий водород от диффузионного вакуума.

в) Создан дьюар емкостью около 1000 литров для 100-сантиметровой жидководородной пузырьковой камеры восьмигранной формы с гибкой внутренней стенкой, опирающейся через изоляцию на жесткий внешний кожух.

16. Данные расчета по теплопритокам к мишени и к дьюару совпали с нашими экспериментальными данными в пределах ошибок измерений.

17. Экспериментально найдено, что тепловые нагрузки в сосудах с многослойной изоляцией при порче изоляционного вакуума азотом 4200 вт/м^2 , при порче водородом - 5150 вт/м^2 .

По теме диссертации
опубликованы следующие работы:

1. А.С.Вовенко, Л.Б.Голованов, Б.А.Кулаков, А.Л.Любимов, Ю.А.Матуленко, И.А.Савин, Е.В.Смирнов. Полное сечение взаимодействия π^- -мезонов с протонами при высоких энергиях. ЖЭТФ, 42 вып. 3 (1962).
2. N. J. Balandikov, V. A. Belushkin, L. B. Golovanov, E. J. Dyachkov, A. G. Zeldovich and Yu. K. Pilipenko. Some cryogenic developments at the Joint Institute for Nuclear Studies. "Cryogenics", June, 1966.
3. Л.Б.Голованов. Теплофизические свойства некоторых многослойных изоляций при криогенных температурах. Препринт ОИЯИ, Р8-3237, Дубна, 1967.
4. Л.Б.Голованов. Особенности измерений коэффициентов теплопроводности многослойных изоляций. Препринт ОИЯИ, Р8-3236, Дубна, 1967.

Получены авторские свидетельства:

1. Л.Б.Голованов. Авторское свидетельство № 182688. Способы определения коэффициентов теплопроводности изоляционных материалов при различных механических нагрузках и устройство для его осуществ-

вления. "Бюллетень изобретений и товарных знаков", № 10, 1964.

2. Л.Б.Голованов. Авторское свидетельство № 179996. Стабилизатор давления.
"Бюллетень изобретений и товарных знаков", № 6, 1966.

Сделаны сообщения на следующих конференциях и совещаниях:

1. VIII Всесоюзное совещание по физике и технике низких температур, Киев, 1961.
2. X Всесоюзное совещание по физике и технике низких температур. Москва, 1963.
3. 3-rd International conference of the physics and techniques of low temperatures. Prague, 1963.
4. V Internationalen conferenz der sozialistischen lander uber Physik und Technik der tiefen Temper. Dresden, 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 августа 1967 года.

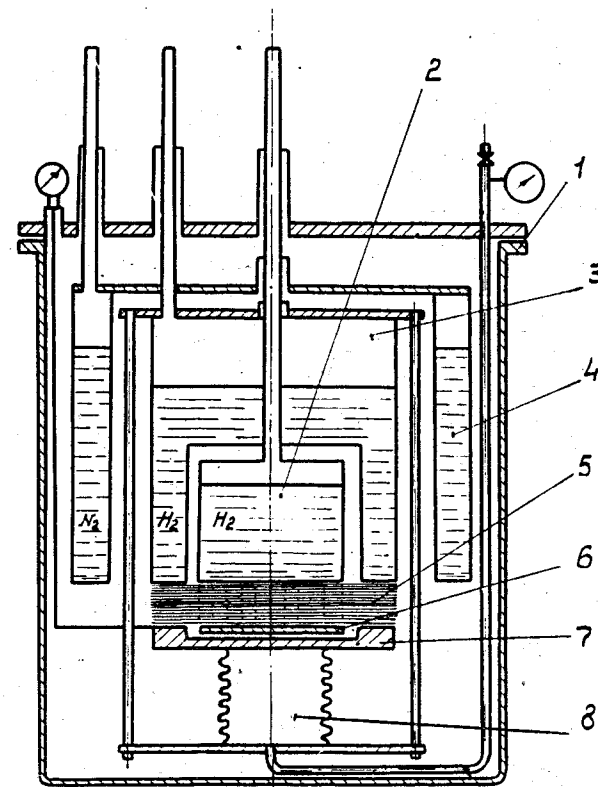


Рис. 1. Схема плоского прибора для определения коэффициента теплопроводности изоляционных материалов при различных механических нагрузках с двойным контролем теплового потока: 1 - вакуумный кожух; 2 - основной бачок; 3 - охранный бачок; 4 - экранирующий бачок; 5 - исследуемая изоляция; 6 - основной нагреватель; 7 - охранный нагреватель; 8 - система поджима.

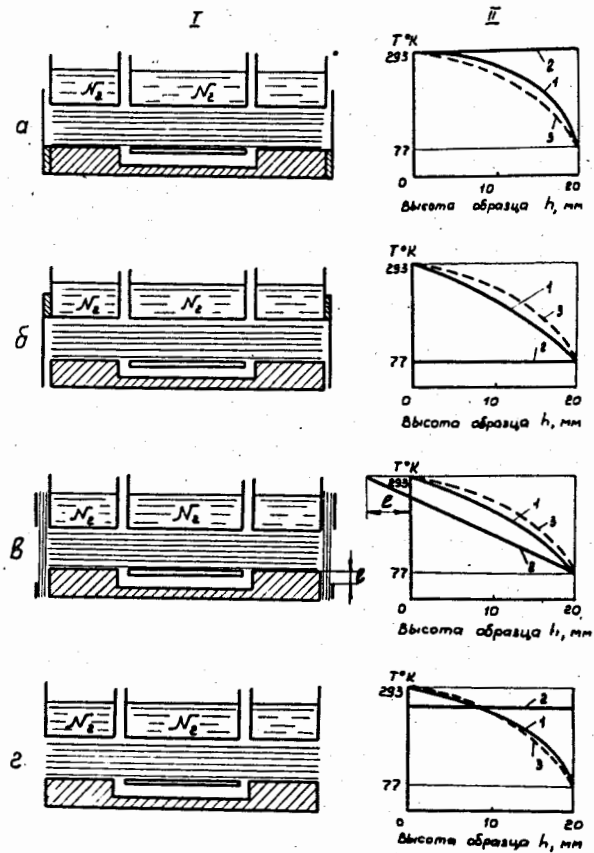


Рис. 2. I. Различные варианты защиты торца образца изоляции от теплообмена: а - экран при температуре 293°K; б - экран при температуре 77,6°K; в - многослойная изоляция с фиксированными температурами верх и низа; г - торец не защищен. II. Распределение температур в образце изоляции (1) и защищающий торец поверхности (2) по высоте. Пунктиром (3) дано распределение температур в образце при отсутствии краевого эффекта.

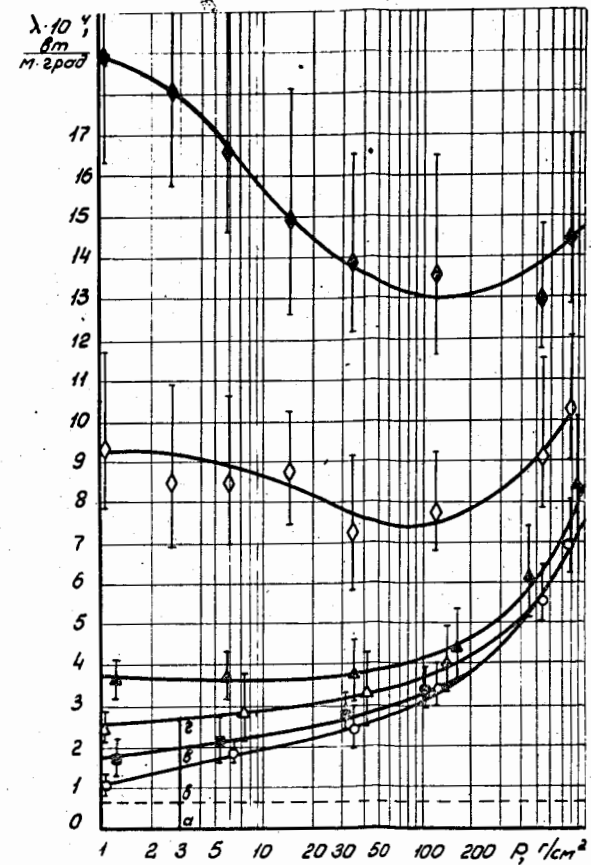


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляции λ , состоящей из стеклотолы СБР толщиной 50 мк и алюминированной лавсановой пленки толщиной 12 мк от удельного давления p на изоляцию (граничные температуры 293 и 77,6°K, остаточный газ - азот) при давлении в изоляционном пространстве P , мм рт.ст.: \circ - $1 \cdot 10^{-3}$; \blacksquare - $1 \cdot 10^{-2}$; \triangle - $4 \cdot 10^{-2}$; \blacklozenge - $1 \cdot 10^{-1}$.

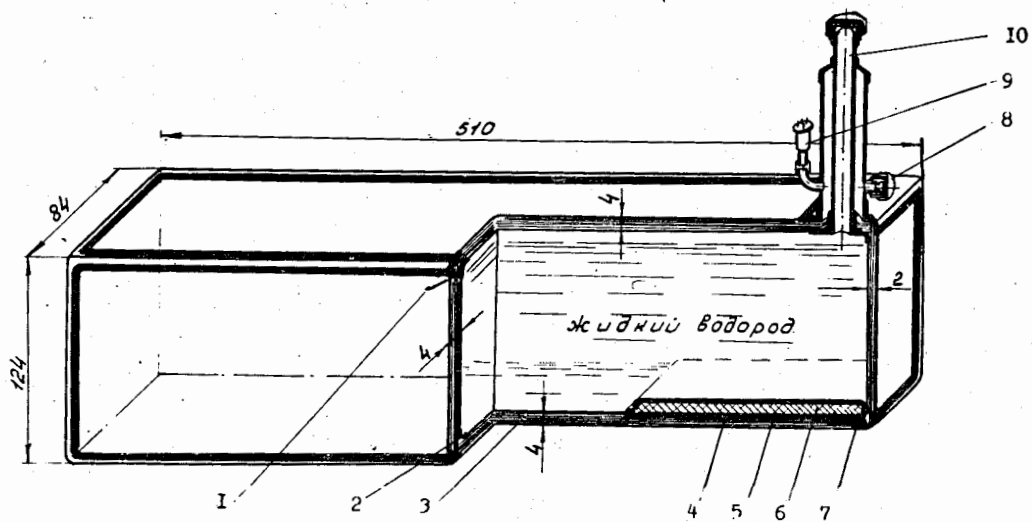


Рис. 4. Схема водородной мишени с плоскими стенками: 1 - каркас внутреннего сосуда (медная фольга); 3 - вакуумный кожух; 4 - многослойная теплоизоляция; 5 - сетка; 6 - адсорбент; 7 - каркас внешний; 8 - вентиль; 9 - лампа вакуумметрическая; 10 - горловина.

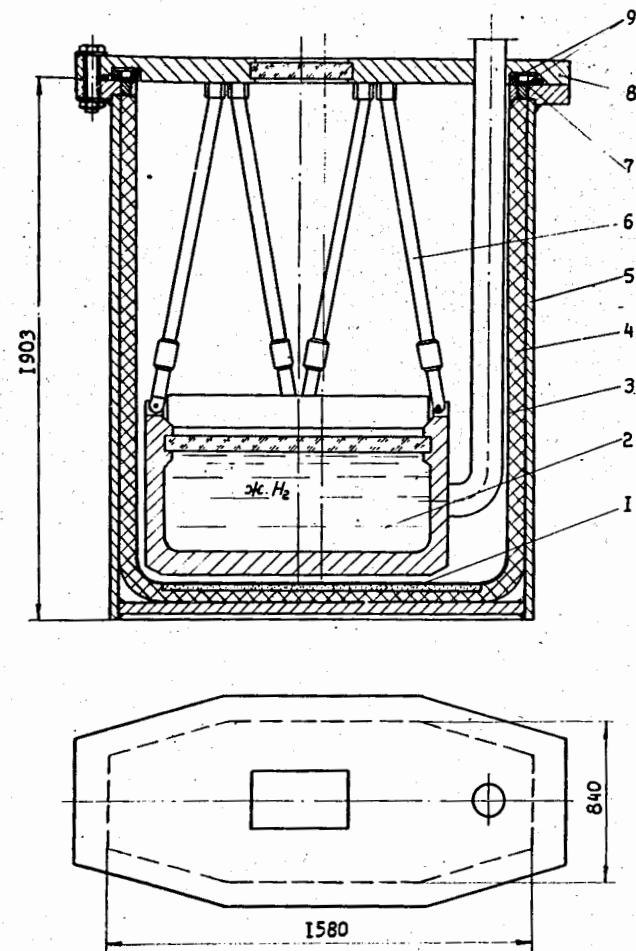


Рис. 5. Схема дьюара 100-сантиметровой жидководородной пузырьковой камеры: 1 - адсорбент; 2 - камера; 3 - обечайка; 4 - многослойная изоляция; 5 - наружный кожух; 6 - тяга; 7 - резиновая лента; 8 - крышка; 9 - прижимные фланцы.

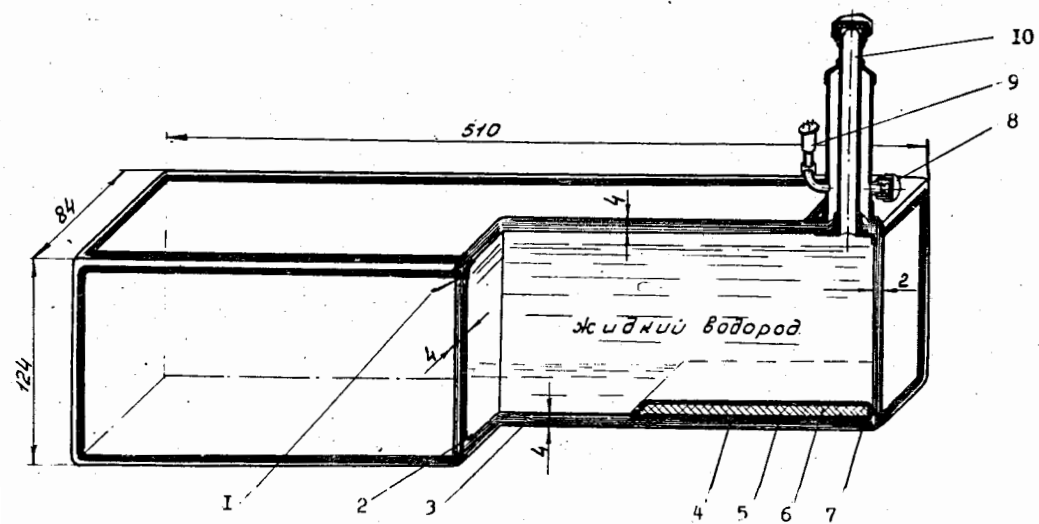


Рис. 4. Схема водородной мишени с плоскими стенками: 1 - каркас внутреннего сосуда (медная фольга); 3 - вакуумный кожух; 4 - многослойная теплоизоляция; 5 - сетка; 6 - адсорбент; 7 - каркас внешний; 8 - вентиль; 9 - лампа вакуумметрическая; 10 - горловина.

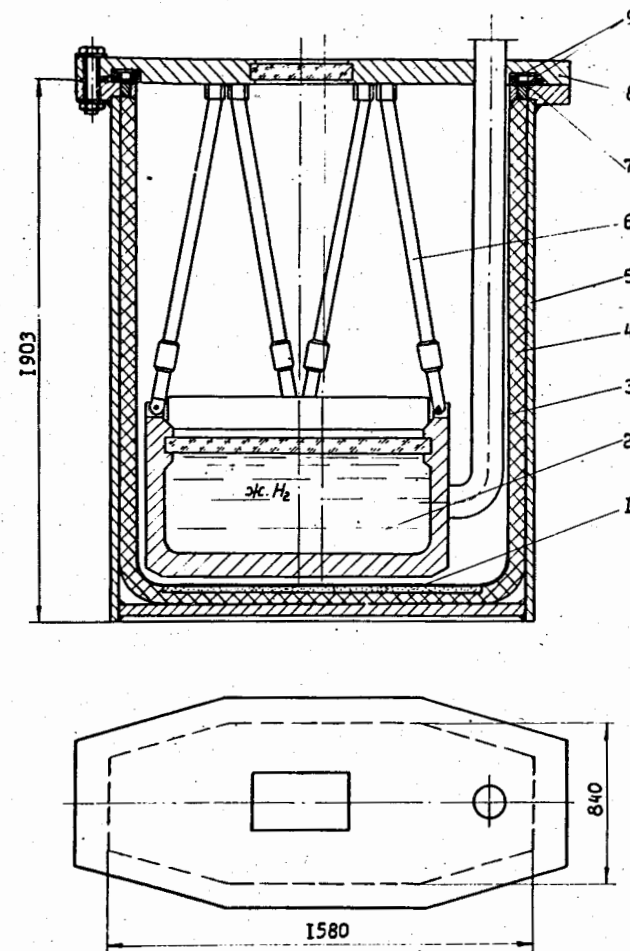


Рис. 5. Схема дьюара 100-сантиметровой жидководородной пузырьковой камеры: 1 - адсорбент; 2 - камера; 3 - обечайка; 4 - многослойная изоляция; 5 - наружный кожух; 6 - тяга; 7 - резиновая лента; 8 - крышка; 9 - прижимные фланцы.