

С 344.12

Б-748

С/III-72

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 6178

714/2-72

6178



И.В.Богуславский, Ю.Т.Борзунов, Н.М.Вирясов,
Л.Б.Голованов, Ю.Д.Зернин, Е.П.Устенко,
В.А.Русаков, В.Т.Толмачев

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

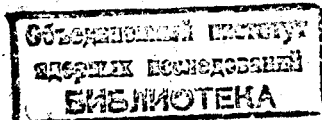
ДЬЮАРНАЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ 2-МЕТРОВОЙ
ПУЗЫРЬКОВОЙ ВОДОРОДНОЙ КАМЕРЫ
"ЛЮДМИЛА"

1971

13 - 6178

И.В.Богуславский, Ю.Т.Борзунов, Н.М.Вирясов,
Л.Б.Голованов, Ю.Д.Зернин, Е.П.Устенко,
В.А.Русаков, В.Т.Толмачев

**ДЬЮАРНАЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ 2-МЕТРОВОЙ
ПУЗЫРЬКОВОЙ ВОДОРОДНОЙ КАМЕРЫ
"ЛЮДМИЛА"**



В в е д е н и е

В настоящее время известны три вида систем теплоизоляции низкотемпературных пузырьковых камер.

Первая система - высоковакуумная с азотным экраном^{/1/}. При такой теплоизоляции камера окружена экраном, охлаждаемым жидким азотом. Камера и экран находятся внутри вакуумного кожуха. Пространство между камерой и вакуумным кожухом откачано до давления не более чем $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.

Вторая система - высоковакуумная с многослойной изоляцией (без азотного экрана)^{/2/}. В данной системе вместо азотного экрана между камерой и вакуумным кожухом находится многослойная экрановакуумная изоляция, состоящая из множества тепловых экранов, разделенных проставочным материалом. В данной системе достаточно иметь давление в вакуумном пространстве - $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст., так как при уменьшении давления ниже $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. теплоприток через многослойную изоляцию не уменьшается.

Третья система теплоизоляции - дьюарная^{/3/}. При дьюарной системе теплоизоляции камера находится внутри автономного дьюара, состоящего из внутреннего сосуда, наружного кожуха и теплоизоляции между ними. Пространство между камерой и внутренним сосудом дьюара может иметь любое давление от нескольких мм рт.ст. до атмосферного и должно быть заполнено газом, не конденсирующимся на холодных поверхностях.

Основные преимущества дьюарной системы теплоизоляции

1. Значительно снижаются требования к герметичности камеры и соединению ее элементов, так как в достаточно широких пределах натекание внутрь дьюара из рабочего объема не влияет на теплоприток к камере.

2. Для пузырьковых водородных камер, у которых главное стекло находится в верхней части корпуса камеры и имеет горизонтальное положение, может быть существенно улучшено термостатирование камеры размещением охлаждающего радиатора выше стекла. Для этого дьюар заполняется газообразным водородом при атмосферном давлении.

3. Значительно повышается безопасность в аварийной ситуации. Максимально опасным вариантом аварийной ситуации на водородной пузырьковой камере следует предположить поломку корпуса камеры, когда жидкий водород выливается во внешний сосуд. Если внешний сосуд является дьюаром, возрастание давления в нем происходит постепенно. Выпаривающийся водород может быть отведен в газгольдеры по технологическим линиям. При других типах теплоизоляции водород, выливаясь из корпуса, попадает на теплые стенки внешнего сосуда, очень быстро испаряется и создает в нем высокое давление.

Конструкция дьюара

Дьюар состоит из следующих элементов (рис. 1): вакуумного кожуха - 1, внутреннего сосуда - 2, многослойной изоляции в виде теплоизолирующих матов - 3, защитного покрытия из стеклоткани - 4, уплотнительной прокладки - 5, адсорбента - 6 и болтов - 7.

Основой конструкции является вакуумный кожух - толстостенный сосуд из стали 1X18H9T, который одновременно служит защитной оболочкой при аварийной ситуации. С открытой стороны к кожуху приварен фланец, в котором имеется канавка для уплотнения, резьбовые отверстия под болты крепления внутреннего сосуда и шпильки крепления крышки вакуумного кожуха. Крышка вакуумного кожуха показана на рис. 1 штрих-пунктирной линией. Внутренний сосуд состоит из тонкостенной обечайки, днища и верхнего франца. Толщина стенок обечайки и днища - 2 мм, материал - сталь

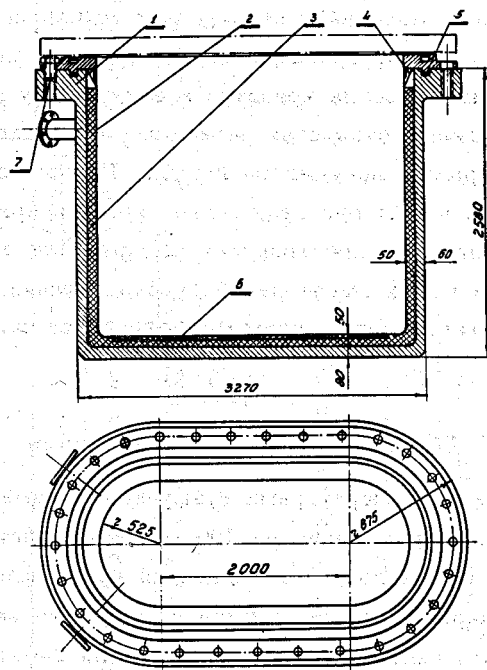


Рис. 1. Конструкция дьюара. 1. Вакуумный кожух. 2. Внутренний сосуд. 3. Теплоизолирующие маты. 4. Защитное покрытие (стеклоткань). 5. Уплотнительная прокладка. 6. Адсорбент. 7. Крепежные болты.

IX18N9T. Теплоизолирующие маты защищены от механических повреждений при монтаже внутреннего сосуда защитным покрытием, изготовленным из стеклоткани, верхний край покрытия приклеен к фланцу вакуумного кожуха. Под днищем внутреннего сосуда заложен адсорбент.

Фланец внутреннего сосуда крепится к вакуумному кожуху с помощью болтов, которые занимают отверстия через два, оставляя пропущенные для шпилек крепления крышки вакуумного кожуха. Разделение функций крепежа принято для того, чтобы при демонтаже крышки кожуха не нарушался вакуум в теплоизолирующем пространстве дьюара. Для откачки этого пространства вакуумный кожух имеет два патрубка с фланцами, к каждому из которых (через вентили) подключена магистраль от вакуумных насосов.

Выбор системы теплоизоляции

Впервые для низкотемпературных пузырьковых камер дьюарная система теплоизоляции была применена на 100-сантиметровой жидководородной камере ЛВЭ ОИЯИ в 1964 году^{4/}. Благодаря преимуществам этой системы теплоизоляции перед другими, а именно: простоте эксплуатации и высокой надежности эта система была выбрана и для 2-метровой пузырьковой водородной камеры.

При изготовлении теплоизолирующих матов в данном случае использовалась лавсановая пленка толщиной 20 мкм, металлизированная с одной стороны слоем алюминия 0,1 мкм, и проставочный материал между слоями лавсана - пылевой перхлорвиниловый фильтр ФПП-1,5 толщиной 500 мкм. Количество двойных слоев из лавсана и ФПП определялось расчетом.

Определение количества слоев изоляции и ее толщины

При монтаже изоляция была сжата нагрузкой, соответствующей 1 г/см^2 . При откачке вакуумного пространства внутренний сосуд прогнулся и лег на изоляцию. Топография поверхности дана в таблицах 1 и 2. Из таблиц видно, что:

- 1) максимальный прогиб внутреннего сосуда составляет ~ 34 мм;

Таблица 1. Деформация обечайки внутреннего сосуда.

		Размеры по поперечным осям, мм										Размеры по продольным осям, мм		
Место замера (рис. 2)	I-I	I'-I'	2-2	2"-2"	2 ^{II} -2 ^{II}	3-3	3"-3"	3 ^{III} -3 ^{III}	4-4	4"-4"	4-4	5-5	5"-5"	5 ^{IV} -5 ^{IV}
Вагер, мм	II02	IO97	II08	II10	II04	II08	III	II02	II01	IO97	3032	3042		
Прогиб, мм	26	26,5	34	30	27	34	30,5	26	30	25,5	-9	-6,5	-4	

Таблица 2. Деформация дна внутреннего сосуда.

Место замера (рис. 2)	I	2	3	4
Глубина внутреннего сосуда, мм	2496	2490	2487	2494
Прогиб, мм	31	25	22	29

2) внутренний сосуд прогибается на разные величины по его длине и высоте.

Все это говорит о том, что внутренний сосуд такой конструкции во время откачки воспринимает определенную нагрузку (перепад давлений), которая в углах и местами на цилиндрической части обечайки достигает 1 кг/см^2 . В тех местах, где внутренний сосуд опирается на стенку кожуха, и на переходных участках нагрузка существенно меньше. Изменение формы внутреннего сосуда схематически показано на рис. 2. После откачки изолирующего пространства до вакуума 760 мм рт.ст. нагрузка на изоляционные маты днища и боковых стенок составила 1000 г/см^2 .

При этом толщина изоляции (в сантиметрах) определялась по формуле:

$$\delta_{1000} = \frac{N}{n_{1000}}$$

где N - количество уложенных двойных слоев изоляции (слоев); n_{1000} - количество двойных слоев в единице толщины изоляции при давлении на нее 1000 г/см^2 (слоев/см). Для данной изоляции $n_{1000} = 35$ слоев/см.

Таким образом, толщина изоляции днища и боковых плоских стенок в сжатом состоянии после откачки изоляционного пространства составляет 13 мм. Изоляция цилиндрических частей находится под действием только монтажной нагрузки 1 г/см^2 и толщина их равна 45 мм.

Вакуумные испытания

Перед сборкой изоляции были проведены тщательные испытания вакуумного кожуха и внутреннего сосуда дьюара. Для получения в изоляционном пространстве вакуума не хуже $P = 10^{-1}$ мм рт.ст. потребовалась длительная "тренировка" изоляции и адсорбента с подогревом. На рис. 3 показана схема испытания и "тренировки" дьюара.

Определение суммарного теплопритока к камере

Для расчета теплопритока к камере температура нижней части обечайки (1/3 высоты) принималась равной температуре камеры. Кроме того

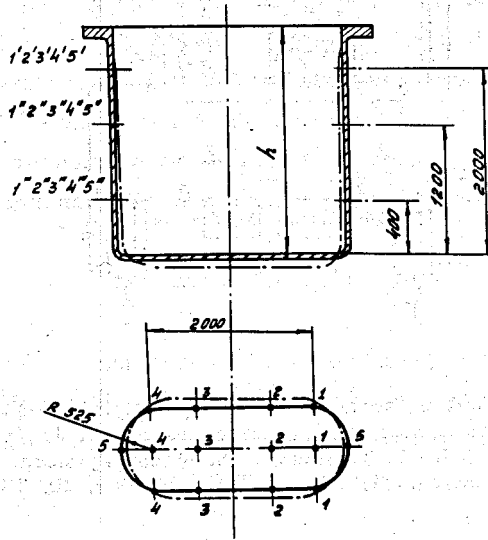


Рис. 2. Изменение формы внутреннего сосуда после откачки изоляционного пространства дьюара.

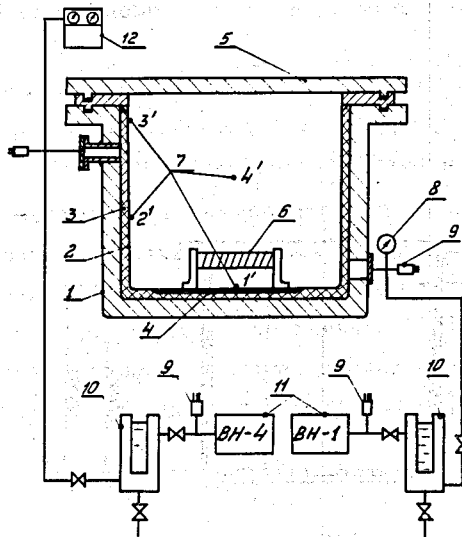


Рис. 3. Схема испытаний и "тренировки" дьюара. 1. Вакуумный кожух. 2. Внутренний сосуд дьюара. 3. Многослойная изоляция. 4. Активированный уголь. 5. Крышка. 6. Печь. 7. Термомары. 8. Мановакуумметр. 9. Лампа ЛТ-2. 10. Азотные ловушки. 11. Форвакуумные насосы. 12. Теческатель ПТИ-7.

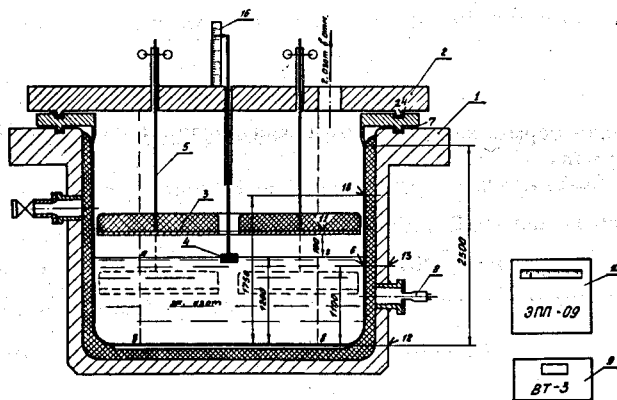


Рис. 4. Схема экспериментального определения теплопритока через дьюарную изоляцию. 1. Дьюар. 2. Крышка кожуха. 3. Экран. 4. Поплавок указателя уровня жидкого азота. 6, 7, 11, 12, 13, 18, 24 - термомары. 8. Лампа ЛТ-2. 9. Вакуумметр. 10. Потенциометр ЭПП-09 для измерения и записи температуры. 16. Шкала указателя уровня.

делалось допущение о равенстве теплопритока к камере и обечайке (без учета теплопритока по подвеске камеры). В этом случае теплоприток к камере может быть определен непосредственно заполнением дьюара жидким азотом. В процессе испытаний измерялись:

1. Теплоприток к жидкому азоту.
2. Температура уплотняющей резиновой прокладки и наружного кожуха.
3. Изменение вакуума в изоляционном пространстве.
4. Продолжительность работы изоляции без откачки.

Суммарный теплоприток к жидкому азоту состоит из теплопритока через изоляцию, теплопритока радиацией и теплопритока по стенкам обечайки. Расчет теплопритока к жидкому азоту через изоляцию проводился по формуле:

$$q = \frac{\lambda F (T_2 - T_1)}{\delta},$$

где: λ - коэффициент теплопроводности изоляции, вт/м·град; F - площадь изолированной поверхности обечайки, имеющей температуру жидкого азота, м²; T_2 - температура наружной поверхности вакуумного кожуха, град; T_1 - температура внутреннего сосуда дьюара, град; δ - толщина изоляции, м.

Исходные данные и расчетные величины теплопритока через различные участки изоляции даны в таблице 3.

Расчет теплопритока радиацией от верхней крышки к жидкости выполнялся для двух случаев:

- 1) когда между крышкой и жидким азотом находился экран, поднятый на высоту 100 мм над жидкостью и имеющий температуру 100°K;
- 2) когда между крышкой и жидкостью экрана нет.

Для случая с экраном теплоприток от экрана к жидкости составляет 1 ватт, при этом принималось, что $T_{\text{экрана}} = 100^{\circ}\text{K}$, $F_{\text{экрана}} = 3 \text{ м}^2$, $\epsilon_{\text{экрана}} = 0,06$. Дополнительный теплоприток через щель между экраном и обечайкой - 26,8 ватт.

Теплоприток радиацией без экрана равен 562 ватта. При этом температура крышки 275°K, степень черноты для листовой прокатной стали $\epsilon_2 = 0,56$, поверхность крышки - 3 м², степень черноты для жидкости $\epsilon_1 = 1$, температура жидкости - 77°K.

Таблица 3. Расчётные величины теплопритока через различные участки изоляции.

Обозначение	Размерность	Плоские части внутреннего сосуда	Цилиндрические части внутреннего сосуда	Днище	Суммарный теплоприток
1. Коэффициент теплопроводности изоляции	10^4 вт/м.град	12,5	7	12,5	-
2. Площадь	m^2	4,8	3,3	3,0	-
3. Температура внутреннего сосуда	град. К	77	77	77	-
4. Температура наружной поверхности кожуха	град. К	283	283	283	-
5. Толщина изоляции	м	$13 \cdot 10^{-3}$	$45 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-3}$	-
6. Теплоприток	вт	93	10,6	86	189,6

Таблица 4. Сравнение расчётных и экспериментальных величин теплопритока.

Теплоприток через изоляцию	Расчётный теплоприток, вт				Суммарный теплоприток	Экспериментальный теплоприток вт
	К плоской части	К цилиндр. части	К днищу	По внутр. сосуду		
С поднятым экраном	93	10,6	86	63	279,4	270
С опущенным экраном	93	10,6	86	63	814,5	775

Теплоприток по стенкам обечайки определялся по известной формуле Фурье. Он равен 63 вт. Коэффициент теплопроводности обечайки (сталь 1Х18Н9Т) - 14 вт/м.град.

Экспериментальное определение теплопритока

Испытания проводились по схеме рис. 4. Перед заливкой жидкого азота во внутренний сосуд дьюара изоляционное пространство было откачено до давления $P = 0,3$ мм рт.ст. и отключено от вакуумнасосов. Жидкий азот был залит в дьюар в количестве $3,6 \text{ м}^3$ до уровня 1200 мм, что соответствует уровню "водородной" температуры в дьюаре, когда камера заполнена жидким водородом. Количество испарившегося азота определялось по указателю уровня. Все измерения проводились в установившемся режиме, который наступил через 10 часов после заполнения дьюара жидким азотом.

В начале испытаний экран был опущен на дно дьюара. Уровень азота в дьюаре за 13 часов упал на 75 мм, что соответствует теплопритоку 775 ватт.

Затем экран, охлажденный до температуры жидкого азота, был поднят на высоту 100 мм над жидкостью. За два часа уровень азота в этом случае снизился на 4 мм, что соответствует теплопритоку 270 ватт. При этом температура экрана не превышала 100°K .

В процессе заполнения дьюара жидким азотом и охлаждения внутреннего сосуда производилось измерение давления в изоляционном пространстве дьюара (рис. 5). Жидкий азот в дьюаре находился в течение 40 дней. За весь этот период давление в изоляционном пространстве по лампе ЛТ-4М было постоянным и равно $P = 2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Измерения теплопритока с экраном и без экрана проводились несколько раз. Наблюдалось хорошее совпадение результатов измерения в отдельных опытах с расчетными значениями теплопритоков (табл. 4).

Датчиками температуры в процессе испытания изоляции являлись медь-константановые термопары. В качестве вторичного прибора был использован потенциометр ЭПП-09 с пределами измерения 0-10 мв класса

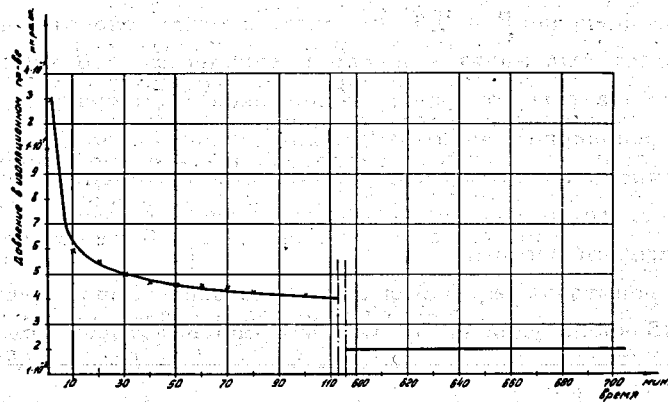


Рис. 5. Изменение давления в изоляционном пространстве после заливки в дьюар жидкого азота.

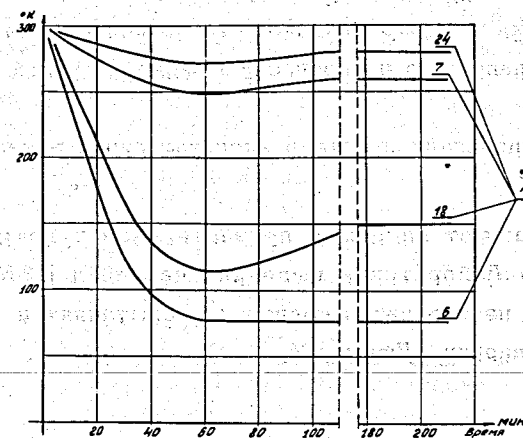


Рис. 6. Изменение температуры дьюара при заполнении его том.

0,5. Схема измерения температур позволяла производить измерение с точностью $\pm 0,5^{\circ}$, достаточной для наших целей. Расположение термопар дано на рис. 4, изменение температуры стенок дьюара при заполнении его жидким азотом показано на рис. 6.

З а к л ю ч е н и е

Опыт пробных водородных пусков установки "Людмила" в ОИЯИ и первого рабочего пуска в ИФВЭ показал, что дьюарная система теплоизоляции обеспечивает надежную и безопасную работу крупной пузырьковой водородной камеры.

Конструкция изоляции проста в эксплуатации и технологична в изготовлении.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам отдела водородных камер Лаборатории высоких энергий и ЦЭМ ОИЯИ, принимавшим участие в изготовлении, монтаже, испытаниях и наладке системы теплоизоляции установки "Людмила".

Л и т е р а т у р а

1. Ю.А. Александров и др. Пузырьковые камеры. М., Госатомиздат, 1963.
2. S.G. Androulakis. Nucl. Instr. & Meth., v. 20, p. 100-119, 1963.
3. Е.И. Дьячков. Авторское свидетельство № 153486. Бюллетень изобретений и товарных знаков №6, 1963.
4. E.J. Djatschkow and A.G. Seldowitch. Monasberichte der Deutschen Academie der Wissenschaften zu Berlin, B. 7, S. 812, 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 декабря 1971 года.