

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

8-85-269

В.Д.Бартенев, В.И.Дацков, А.Г.Зельдович,
Ю.А.Шишов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ПРИ АВАРИЙНОЙ ПОРЧЕ
ИЗОЛЯЦИОННОГО ВАКУУМА
В ГЕЛИЕВЫХ КРИОСТАТАХ**

Направлено на 24 Международную конференцию стран-членов СЭВ по физике и технике низких температур /Берлин, ГДР, сентябрь 1985 г./ и на 9 Международную конференцию по магнитной технологии /Цюрих, Швейцария, сентябрь 1985 г./

1985

ВВЕДЕНИЕ

Процессы, происходящие в гелиевых криостатах при порче изоляционного вакуума, недостаточно изучены. Это вызывает трудности при расчете предохранительных устройств. Известна работа ^{1/1}, в которой авторы делают ряд допущений и на основе расчетов принимают величину удельного теплопритока к жидкому гелию равной $1,25-1,5 \text{ Вт.см}^{-2}$ при свободном доступе воздуха в изоляционное пространство криостата магнитной системы. Авторы считают, что порча изоляционного вакуума криостата гелием представляет несравненно меньшую опасность, чем порча воздухом.

Для получения экспериментальных данных о процессах теплообмена в криостате при аварийных условиях в криогенном отделе ЛВЗ ОИЯИ создана специальная установка. На ней изучались процессы при подаче в изоляционное пространство криостата, как правило, гелия по следующим соображениям. При неограниченном доступе в изоляционное пространство воздуха или гелия удельные теплопритоки в первом случае больше. Но в реальных аварийных ситуациях количество поступающего газа ограничено размером отверстия, которое обычно мало. При натекании воздуха через такое отверстие и его конденсации вакуум изменяется незначительно, натекание гелия в конечном счете приведет к полной потере вакуума и большому теплопритоку к гелиевому сосуду.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка включает в себя криостат с внутренним диаметром 200 мм /см. рис.1 и таблицу/. Гелиевый сосуд 1, изготовленный из нержавеющей стали, изолирован многослойной изоляцией 3 или азотным медным экраном. Напуск гелия, в данном случае из возвратной линии, в изоляционное пространство осуществляется с помощью узла напуска 8, в котором можно сменять калиброванные диафрагмы с отверстиями от 0,5 мм до 15 мм. Для визуального исследования процесса кипения жидкого гелия крышка криостата с пенопластовым вытеснителем 2 может заменяться прозрачной крышкой из поликарбоната. В криостат обычно наливали 6 л жидкого гелия.

Температура гелия и стенок гелиевого сосуда измерялась в 10 точках с погрешностью ~1%. В качестве термометров применены композиционные резисторы с номиналом 1 кОм, градуированные в диапазоне температур 4-300 К с погрешностью ~0,2% ^{1/2}.

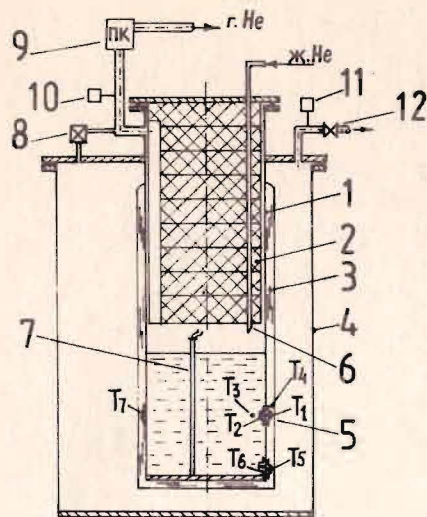


Рис.1. Экспериментальная установка с гелиевым криостатом: 1 - гелиевый сосуд; 2 - пенопластовый вытеснитель; 3 - многослойная изоляция; 4 - вакуумный кожух; 5 - термометры $T_1 - T_7$; 6 - трубка для заливки жидкого гелия; 7 - датчик уровня жидкого гелия; 8 - узел напуска гелия в изоляционное пространство; 9 - предохранительный клапан; 10 - преобразователь давления; 11 - вакуумметр; 12 - вентиль вакуумной откачки.

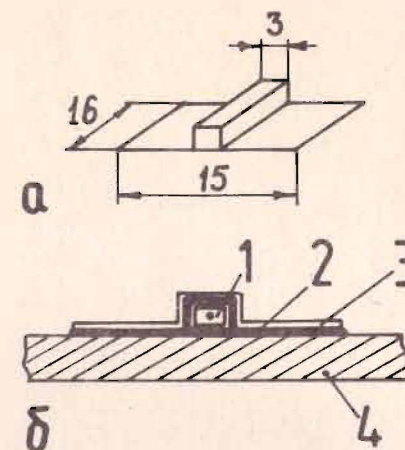
Основные параметры криостата

Таблица

Внутренний диаметр, высота и толщина боковой стенки, толщина дна гелиевого сосуда, мм	200/625/2/7
Внутренний диаметр, высота и толщина стенок азотного экрана, мм	240/510/2
Внутренний диаметр, высота и толщина боковой стенки вакуумного кожуха, мм	430/590/3
Количество слоев алюминизированной лавсановой пленки на гелиевом сосуде /при отсутствии азотного экрана/	50
Толщина пленки, мкм	12
Толщина изоляции, мм	3,5
Несоосность гелиевого сосуда и вакуумного кожуха, мм	65
Диаметр выходного отверстия, мм	56

Сопротивление термометров измерялось по 4-проводной схеме при постоянном токе 10 мкА стабильностью 10^{-4} с помощью цифрового вольтметра класса 0,05. На рис.2а показаны размеры накладки для крепления термометров, а на рис.3б - разрез узла крепления термометров на стенке гелиевого сосуда. Узел крепления состоит

Рис.2. Схема узла крепления термометра на стенке гелиевого сосуда: а - размеры; б - сечение узла крепления; 1 - термометр; 2 - теплопровод из медной фольги толщиной 0,08 мм; 3 - защитная фольга из нержавеющей стали толщиной 0,08 мм; 4 - стенка гелиевого сосуда.



из самого термометра 1, вставленного на вакуумной замазке в изотермическую полость медного теплопровода 2, и покрытия 3 из нержавеющей стали.

Измерение уровня жидкого гелия обычно проводилось с помощью уровнемера с резистивным датчиком из нити диаметром 50 мкм /сплав НТ-50/. В ряде случаев использовался емкостный уровнемер с датчиком из 2 коаксиальных трубок. При атмосферном давлении в криостате погрешность измерения уровня жидкого гелия обоими уровнемерами равна ~ 2%, но при давлениях, больших $1,6 \cdot 10^5$ Па, погрешность превышает 30%.

Измерение давления в гелиевом сосуде до $2 \cdot 10^5$ Па проводилось с помощью электрического преобразователя давления с погрешностью ~ 2,5%, выше $2 \cdot 10^5$ Па - визуально по манометру класса 2,5.

Дополнительный контроль расхода гелия в линии возврата с погрешностью ~ 5% велся с помощью расходомерной диафрагмы /диаметр отверстия 35 мм/ и дифманометра на перепад давления 0-2,45 кПа.

Электрические сигналы с датчиков передавались через устройство сопряжения, содержащее блок реального времени и мультиплексор, на цифровые вольтметры класса 0,05 и регистрировались на лентах 2 цифropечатей, работающих со скоростью до 5 измерений в секунду.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Резкая порча вакуума в случае изолирования гелиевого сосуда лавсановой пленкой вызывала "взрывное" вскипание жидкого гелия, уровень которого поднимался на 30-40%, а жидкость превращалась во влажный пар, не пропускавший света.

В качестве примера на рис.3 и 4 показан один из характерных случаев. Сложная форма кривой давления P обусловлена работой

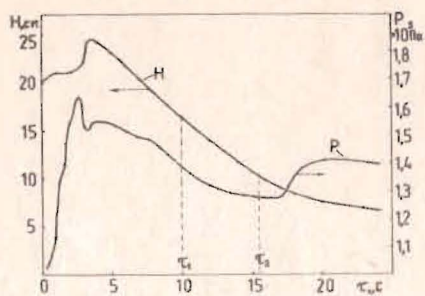


Рис.3. Давление P и уровень H жидкости в гелиевом сосуде после напуска гелия в изоляционное пространство криостата через отверстие диаметром 7 мм.

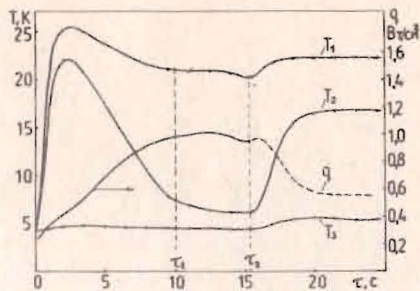


Рис.4. Температуры, измеренные термометрами T_1, T_2, T_3 , которые расположены, соответственно, на внешней и внутренней стенках гелиевого сосуда и в жидкости на высоте 80 мм от дна, и расчетный удельный тепловой поток q через стенку гелиевого сосуда после напуска гелия в изоляционное пространство.

предохранительного клапана и гидравлическим сопротивлением возвратной линии. Первоначальный пик кривой H уровня гелия объясняется реальным подъемом уровня парожидкостной смеси при бурном кипении. Точное измерение уровня жидкого гелия затруднено двумя причинами: повышенным давлением и переменным паросодержанием смеси. Поэтому нельзя с удовлетворительной точностью производить расчет удельного теплопритока к жидкому гелию по измерению уровня гелия.

На рис.4 показан ход температур, измеренных термометрами T_1, T_2, T_3 , которые расположены /см. рис.1/, соответственно, на внутренней и внешней стенках гелиевого сосуда и в жидком гелии на высоте 80 мм от дна. Максимум температур T_1 и T_2 наблюдается через ~2 с после порчи изоляционного вакуума, что свидетельствует о быстром развитии процесса теплообмена между гелиевым сосудом и кожухом криостата. Температура T_3 кипящей парожидкостной смеси близка к равновесной.

Удельный теплоприток к жидкому гелию рассчитан по уравнению теплопроводности стенки сосуда с помощью измерений разности температур T_1 и T_2 . Величина теплопроводности λ для нержавеющей стали взята из рис.4-35 работы^{/3/}. Для расчетов получена удобная аналитическая зависимость теплопроводности λ нержавеющей стали от температуры T в интервале 4-100 К:

$$\lambda = e^{1,148 \ln T - 7,303} / \text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \text{ К}^{-1} / \pm 2\%$$

где $T = (T_1 + T_2) / 2$ - средняя температура стенки.

Кривая q /рис.4/ монотонно возрастает, выходит на "плато" ~1,0 Вт·см⁻² и после момента времени τ_2 начинает убывать, т.к. в этот момент уровень гелия уходит от термометров T_1, T_2, T_3 вниз. Моменту времени τ_1 отвечает переход от "взрывного" к менее интенсивному бурному кипению гелия.

На основании большого числа измерений найдено, что характерное время повышения давления в изоляционном пространстве до атмосферного равно 0,3-0,5 с и мало изменяется, начиная с диаметров отверстий напуска гелия, больших 3-7 мм. Максимальная величина скорости испарения гелия перестает расти уже при диаметре отверстия напуска 7 мм. Поэтому основной цикл измерений на криостате проведен при данном размере отверстия напуска.

Определены максимальные удельные теплопритоки $q_{\text{макс}}$ к жидкому гелию при различной изоляции гелиевого сосуда и разных давлениях в сосуде. При изолировании лавсановой пленкой, давлениях в гелиевом сосуде 140-180 кПа в 11 экспериментах получены величины $q_{\text{макс}} = 0,95-1,93 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. Путем размещения термометров в различных местах стенки гелиевого сосуда выявлена неравномерность теплопритока. Например, в одном из экспериментов $q_{\text{макс}} = 0,76-1,72 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. Для случая изолирования гелиевого сосуда азотным экраном при давлениях в сосуде 120-175 кПа в 9 экспериментах величины $q_{\text{макс}} = 0,3-0,63 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$.

Также выяснено, что теплопритоки к жидкому гелию слабо зависят от температуры напускаемого в изоляционный вакуум гелия. Проведены эксперименты с напуском гелия, имеющего комнатную температуру, затем холодного гелия, отводимого из-под крышки криостата, и гелия с температурой 4-5 К, выходящего в вакуумное пространство через отверстие, расположенное в стенке гелиевого сосуда непосредственно над уровнем жидкости. Во всех случаях, начиная с отверстия для напуска гелия диаметром 1 мм, полная порча вакуума от 10^{-3} Па до 10^5 Па достигалась за несколько десятых долей секунды, а характер и время бурного кипения гелия были примерно одинаковыми.

Оценочные расчеты показали, что в теплообмене между гелиевыми сосудом и кожухом главную роль играет конвективный теплообмен, а теплоприток теплопроводностью по газообразному гелию довольно мал. Эксперименты показали, что многослойная изоляция не ограничивает существенным образом конвективный теплообмен. Обращает на себя внимание тот факт, что теплопритоки к жидкому гелию при наличии азотного экрана в несколько раз ниже, чем при многослойной изоляции. По-видимому, это объясняется не только понижением средней температуры газа в зазоре, где происходит конвективный теплообмен, но и значительной ролью уменьшения самого зазора при установке азотного экрана.

Измерение расхода гелия с помощью диафрагмы, установленной в линии обратного гелия, позволило вычислить величину $q_{\text{макс}}$, которая на 20-30% меньше, чем рассчитанная по теплопроводности стенки. Это, в основном, подтвердило правильность методики из-

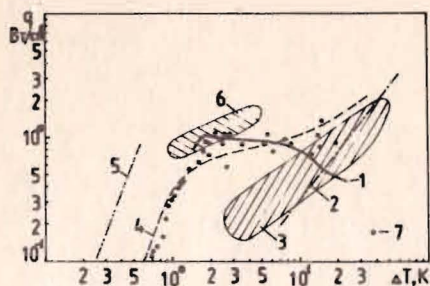


Рис.5. Сравнение экспериментальных и литературных данных по зависимости плотности теплового потока q от температурного градиента ΔT стенка-жидкость для различных режимов кипения жидкого гелия: 1 - экспериментальные данные для характерного случая, приведенного на рис.3,4; 2 - расчет по уравнению Брина и Вест-

вотера^{/7/}; 3 - пленочное кипение гелия^{/5/}; 4 - кривая кипения гелия^{/4/}; 5 - расчет по уравнению Кутателадзе^{/6/}; 6 - кризис кипения гелия^{/5/}; 7 - экспериментальные данные настоящей работы для отверстий напуска гелия в вакуум с диаметрами от 0,5 до 15 мм.

мерения и расчета удельного теплопритока с помощью температурных датчиков. Дополнительным подтверждением такой методики может служить сравнение с литературными данными /см. рис.5/. Экспериментальные точки различных режимов кипения удовлетворительно согласуются с кривой кипения^{/4/}.

3. ВЫВОДЫ

С помощью термометрической методики изучена зависимость величины удельных теплопритоков q к жидкому гелию при быстрой порче изоляционного вакуума гелием от вида изоляции гелиевого сосуда, величины отверстия для напуска гелия в изоляционное пространство, давления в гелиевом сосуде. При наличии многослойной лавсановой изоляции гелиевого сосуда $q_{\text{макс.}} = 0,95-1,93 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$, при установке азотного экрана вместо многослойной изоляции $q_{\text{макс.}} = 0,3-0,63 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$. Полученные данные свидетельствуют о серьезности аварийной ситуации при порче изоляционного вакуума криостата гелием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Turner L.R., Wang S.-T., Smith R.P. Advances in Cryogenic Engineering. Plenum Press, New York, 1980, vol.25, p.39.
2. Дацков В.И. ОИЯИ, 8-83-717, Дубна, 1983.
3. Справочник по физико-техническим основам криогеники. "Энергия", М., 1973.
4. Giarratano P.J., Frederick N.V. Advances in Cryogenic Engineering. Plenum Press, New York, 1980, vol.25, p.455.
5. Кириченко Ю.А., Русанов К.В. Теплообмен в гелии-1 в условиях свободного движения. "Наукова думка", Киев, 1983.

6. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Машгиз, М.-Л., 1962.
7. Breen B.P., Westwater J.W. Chem.Eng.Progr., 1962, 8, No.7, p.67.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 апреля 1985 года.