

объединенный
институт
ядерных
исследований

СМ 80-2675 дубна

8-80-112

А.М.Архаров, А.И.Агеев, В.И.Пряничников,
Н.Б.Рубин

РЕЗУЛЬТАТЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕПЛОТДАЧИ В He-I и He-II
ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

Направлено в "Инженерно-физический журнал".

1980

Результаты экспериментального исследования теплоотдачи в He-I и He-II при импульсной тепловой нагрузке

Приводятся результаты исследования воздействия теплового импульса на медную пластину, погруженную в He-I и He-II.

Рассмотрена зависимость изменения температуры поверхности образца от величины теплового импульса. Найдены значения коэффициента теплоотдачи в He-I и He-II.

Установлено, что: 1/ наибольшую импульсную тепловую нагрузку при минимальном температурном напоре можно снять, используя среду жидкого He-II, 2/ криостатирование сверхпроводящих объектов при импульсной нагрузке недогретым жидким He-I нежелательно из-за больших $\Delta T > 1,0$ K/ изменений температуры на поверхности объекта.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1980

Results of Experimental Investigation of Heat Transfer to He-I and He-II at the Impulse Heat Loading

Results of investigation of the effect of heat impulse on a copper plate immersion into He-I and He-II are given. The temperature change of sample surface as a function of the value of heat impulse is considered. Coefficient of heat transfer to He-I and He-II has been found. It has been determined that 1) the highest impulse heat loading corresponding to the minimum temperature pressure could be taken off using the liquid He-II environment; 2) the cryostabilization of superconducting objects by impulse loading in unsaturated He-I liquid is undesirable because of big ($\Delta T > 1,0$ K) temperature changes of the object surface.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1980

В настоящее время область практического применения He-I и He-II непрерывно расширяется. В связи с этим возникает необходимость изучения процессов теплообмена в этих средах.

Одним из направлений, где реализуется теплообмен в He-I и He-II при импульсных нагрузках, является создание ускорителей заряженных частиц, использующих явление сверхпроводимости^{1,2,3/}.

Применение He-II для охлаждения сверхпроводящих систем имеет ряд преимуществ по сравнению с применением He-I: обладая высокой теплопроводностью, He-II обеспечивает надежный тепловой контакт между элементами; более низкая температура He-II позволяет увеличить критический ток сверхпроводника; сверхтекучий гелий проникает в мельчайшие каналы и увеличивает эффективность охлаждения.

В данной работе приведены результаты воздействия импульсной тепловой нагрузки на образец, погруженный в He-I и He-II.

Для проведения исследований был создан стенд, в который входят: криостат с $\varnothing 0,25$ м /рис. 1/, стабилизированный источник тока для питания датчиков температуры, цифровой вольтметр для измерений показаний температуры и прироста /скачков/ температуры, импульсный источник энергии, быстродействующий самопишущий прибор с постоянной регистрации 20 мВ/см при скорости движения диаграммы до 250 мм/с в диапазоне 0+100 Гц, осциллограф и приборы для измерения уровня жидкого гелия и давления его паров.

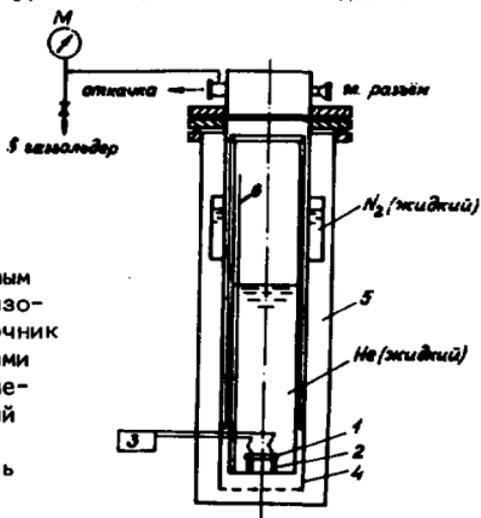


Рис. 1. Криостат с исследуемым образцом: 1 - образец, 2 - изолирующая подставка, 3 - источник импульсной энергии с приборами для регистрации и записи изменения температуры, 4 - медный экран, 5 - вакуумный кожух, 6 - сверхпроводящий указатель уровня жидкого гелия.

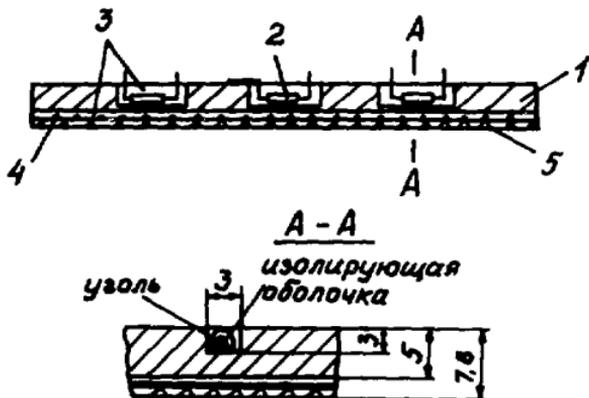


Рис. 2. Исследуемый образец с установленным нагревателем и датчиками температуры: 1 - медная пластина с габаритами $0,005 \times 0,1 \times 0,1$ м, 2 - резистор Allen-Bradley - 3 шт.; 3 - эпоксидная смола Delta-Bond; 4 - нагреватель с $R = 100$ Ом; 5 - стеклотекстолит с габаритами $0,001 \times 0,1 \times 0,1$ м.

Исследуемый образец /рис. 2/ представляет собой плоскую пластину размером $0,1 \times 0,1$ м, толщиной $0,005$ м, изготовленную из отожженной меди марки МЗ. С одной стороны пластины с помощью эпоксидной смолы Delta-Bond /имеет хорошие изоляционные свойства и относительно высокий коэффициент теплопроводности/ укреплен нихромовый нагреватель с $R = 100$ Ом, с другой стороны в специальных канавках с помощью эпоксидной смолы Delta-Bond установлены три угольных резистора фирмы Allen-Bradley, которые использовались в качестве датчиков температуры.

Сравнение теплопроводности меди и стеклотекстолита при $T = 4$ К и $T = 2$ К с учетом их толщин показывает, что тепловой поток в сторону меди почти в 200 раз превышает тепловой поток в сторону стеклотекстолита. Поэтому принимаем, что тепловой поток от нагревателя направлен в сторону меди и отводится к жидкому гелию с поверхности пластины $F = 0,01$ м².

В криостате /рис. 1/ образец устанавливался горизонтально, нагревателем вниз. Эксперименты проводились в жидком He-I, кипящем при $T_{ж} = T_{г}$, где $T_{ж}$ - температура жидкости, $T_{г}$ - температура насыщения, а также в He-II при $T_{ж} = T_{г}$ /переход He-I

в He-II осуществлялся путем откачки паров/ и в жидком недогретом гелии He-I , температура которого была меньше температуры насыщения, $T_{ж} < T_{в}$ /кипение с недогревом/, что имело место после прекращения откачки и напускания в криостат, содержащий He-II , газообразного гелия при атмосферном давлении.

Изменения температуры на поверхности образца, возникающие под воздействием теплового импульса, регистрировались цифровым вольтметром и записывались на быстродействующем самопишущем приборе. Относительная погрешность измерения температуры при 4,2 К составила 0,5%, при 2 К - 1%. На рис. 3 показана форма импульса электрического напряжения, воздействующего на образец, и приведены соответствующие значения джоулеа тепла, выделяемого в импульсе. Количество энергии, запасенной в конденсаторе, определялось по формуле $E = \frac{C \cdot U^2}{2}$ [Дж], где C - емкость конденсатора импульсного источника энергии [Ф] , U - напряжение зарядки конденсатора в момент подачи импульса [В] .

Форма импульса во всех экспериментах сохранялась неизменной, потери энергии при передаче импульса составили около 0,1%.

Расчеты показали, что влияние материала образца /меди/ на изменение его температуры обнаруживается при импульсах длительностью $\tau \leq 10^{-3}$ с.

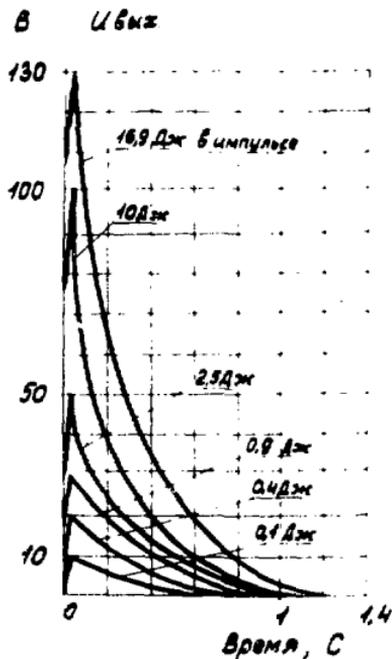


Рис. 3. Форма импульса электрического напряжения, воздействующего на образец, в зависимости от времени и количества энергии, выделяемой в импульсе; $U_{вых}$ - напряжение на нагревателе [В].

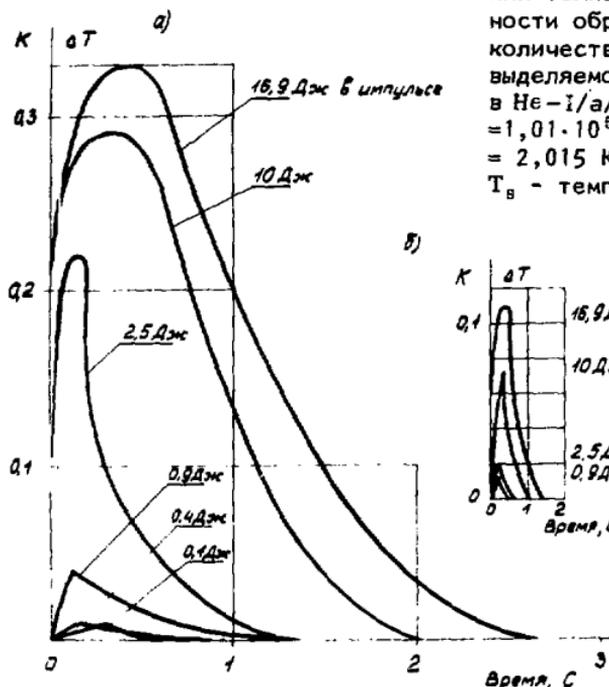


Рис. 4. Зависимость изменения температуры на поверхности образца от времени и количества тепловой энергии, выделяемой в импульсе: в He-I/а/ $T_s = 4,224$ К, $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па; в He-II/б/ $T_s = 2,015$ К, $p = 0,03 \cdot 10^5$ Па; T_s - температура насыщения.

На рис. 4а дана экспериментальная зависимость изменения температуры поверхности образца, находящегося в жидком He-I при температуре насыщения $T_{ж} = T_s = 4,224$ К, от времени и величины теплового импульса. Проведенный анализ и сравнение результатов позволяют считать, что при тепловых потоках до 100 Вт/м^2 /1,5 Дж в импульсе/ имеет место конвективная теплоотдача в He-I, при более высоких тепловых потоках, включая 700 Вт/м^2 /16,9 Дж в импульсе/, имеет место пузырьковое кипение. Эти данные согласуются с результатами работы^{4/}. Среднее значение коэффициента теплоотдачи в He-I по формуле Ньютона-Рихмана

$$\bar{\alpha}_{\text{имп}} = \frac{Q_{\text{имп}}}{\tau \cdot F \cdot \Delta T} \quad //$$

где $Q_{\text{имп}}$ - количество энергии в импульсе [Дж], τ - длительность импульса [с], F - поверхность теплоотдачи [м^2], ΔT -

среднее значение разности температур медного образца и температуры гелия в ванне [K], что дает величину: $\bar{\alpha}_{\text{имп}} \approx 3000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Следует отметить, что в жидком He-I максимальное значение изменения температуры составляло $0,3 \pm 0,33 \text{ К}$, а длительность температурного импульса почти в 2 раза больше длительности теплового.

На рис. 4б показана экспериментальная зависимость температуры поверхности того же образца, находящегося в жидком He-II при температуре насыщения $T_{\text{ж}} = T_{\text{в}} = 2,015 \text{ К}$, от времени и величины теплового импульса. Работы по теплоотдаче в He-II с импульсным нагревом нам не известны. Оценка значения коэффициента теплоотдачи в He-II при импульсной тепловой нагрузке по уравнению /1/ дает для случая рис. 4б величину: $\bar{\alpha}_{\text{имп}} \approx 27000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. При этом в жидком He-II максимальное значение изменения температуры поверхности составляет всего около $0,1 \text{ К}$, а длительность температурного импульса не превышает длительности теплового.

Согласно теории сверхтекучести Л.Д.Ландау /5/ в жидком He-II от нагретой стороны идет поток нормального компонента, переносящего тепло, а навстречу ему - равный поток сверхтекучего компонента. При этом макроскопического реального течения в гелии не наблюдается. Как установлено П.Л.Капицей, такой механизм обуславливает феноменально высокую теплопроводность жидкого He-II, превышающую в тысячи раз теплопроводность меди. Передача тепла от твердого тела к He-II /6,7/ приводит к появлению так называемого "сопротивления Капицы", реализуемого в виде скачка температуры ΔT на границе между твердым телом и He-II. Существование этого скачка объясняется наличием некоторого гипотетического теплопроводного слоя, характеризуемого величиной $\alpha_0 = \frac{Q}{F \cdot \Delta T}$, которая по существу является коэффициентом теплоотдачи от твердой стенки к He-II и обычно называется "проводимостью Капицы".

К настоящему времени теория импульсного теплообмена в жидком He-II не разработана. Поэтому не представляется возможным провести какие-либо теоретические оценки величины α_0 в импульсном режиме.

Несомненно, что столь высокое значение α , характерное для импульсного режима и полученное экспериментальным путем, послужит стимулом для дальнейших теоретических исследований.

На рис. 5 представлена экспериментальная зависимость изменения температуры поверхности того же образца, находящегося в жидком He-I при температуре $T_{\text{ж}} < T_{\text{в}}$, $T_{\text{ж}} = 2,18 \text{ К}$ /имеет место кипение в недогретой жидкости/, от времени и величины теплового импульса. Видно, что длительность температурного импульса превышает почти в 20 раз длительность теплового,

а максимальное значение изменения температуры больше 1,0 К. Такой характер температурного импульса объясняется особенностями теплопередачи в гелии, когда температура жидкости меньше температуры насыщения /отсутствует парообразование в объеме, имеет место поверхностное кипение/.

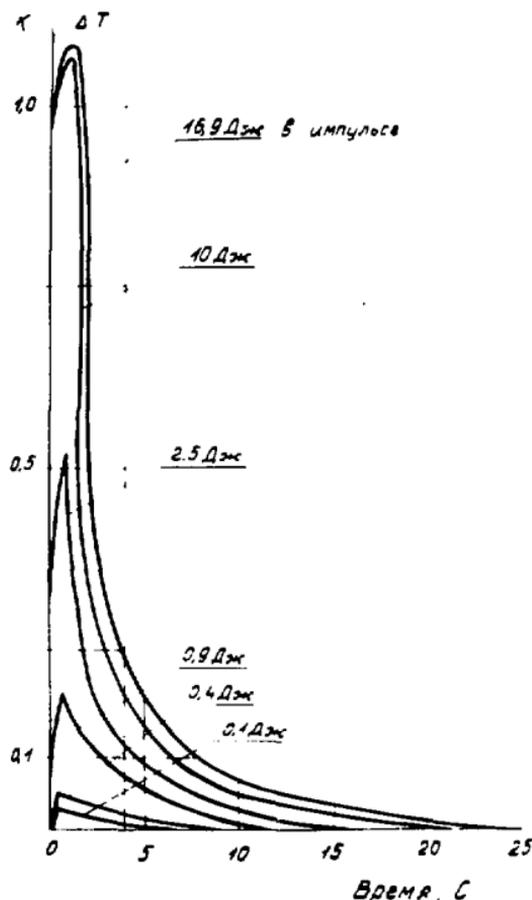


Рис. 5. Зависимость изменения температуры на поверхности образца от времени и количества тепловой энергии, выделяемой в импульсе, в недогретом жидком He-I, $T_{ж} = 2,18$ К, $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па.

Согласно /1/ для случая рис. 5 имеем среднее значение коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_{имп}$ ≈ 300 Вт/м²·К.

ВЫВОДЫ

1. Наибольшую импульсную тепловую нагрузку можно снять, используя среду He-II, при этом температурный напор будет минимальным.
2. В среде жидкого He-I можно снять ту же импульсную тепловую нагрузку при большем температурном напоре.
3. Использование недогретого жидкого He-I ($T_{\text{ж}} < T_{\text{в}}$) для криостатирования сверхпроводящих импульсных устройств нежелательно из-за больших $\Delta T > 1,0 \text{ K}$ изменений температуры на поверхности, что резко снижает возможности сверхпроводящих устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ageev A.I. и др. Сверхпроводящие и криогенные устройства ускоряющей секции коллективного ускорителя. ЖТФ, 1977, т. 47, № 6, с. 1213-1221.
2. Schwettman H.A. et al. Low Temperature Aspects of a Cryogenic Accelerator, IEEE Transactions on Nuclear Science, June, 1967, pp. 336-344.
3. Балбеков В.И. и др. Ускорительно-накопительный комплекс ИФВЭ. В кн.: Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, т. 1, Серпухов, 1977, с. 127-141.
4. Schwidt C., Turowski P. Wärmeübergang zu flüssigem Helium in vertikalen Kühlkanälen bei konstantem und pulsartigem Wärmestrom, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1974, 22.
5. Ландау Л.Д. Теория сверхтекучести гелия-II. ЖЭТФ, 1941, т. 11, вып. 6, с. 592-613.
6. Капица П.Л. Исследование механизма теплопередачи в гелии-II. ЖЭТФ, 1941, т. 11, с. 1-31.
7. Капица П.Л. Теплоперенос и сверхтекучесть гелия-II. ЖЭТФ, 1941, т. 11, вып. 6, с. 581-591.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 февраля 1980 года.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники



Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.
Заказ 27797. Тираж 245. Уч.-изд. листов 0,74.
Редактор Н.Н.Зрелова.
Набор В.С.Румянцевой, Н.И.Коротковой.
Макет Р.Д.Фоминой. Подписано к печати 13.03.60 г.