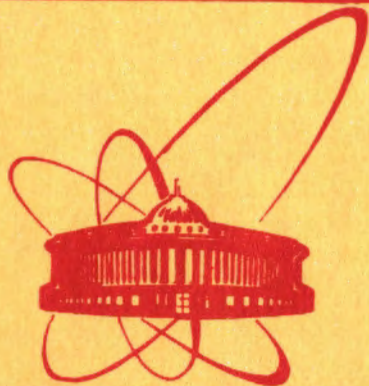


9/11-80



объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна

2534/2-80

8-80-112

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

РЕЗУЛЬТАТЫ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ  
ТЕПЛООТДАЧИ В He-I И He-II  
ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

*Направлено в "Инженерно-физический журнал".*

1980



Архаров А.М. и др.

8-80-112

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 при 1/ наибольшей импульсной тепловой нагрузке при использовании среды He-I можно снять, с помощью сверхпроводящих образцов, изменение температуры жидким He-I.

Работа  
ОИЯИ.

Препринт

Arkharov

Re

Tr

u

2534/2-80 пр.  
А-873 Архаров, А.М. и др. Результаты экспериментального исследования 8-80-112. 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<sup>1,2,3/</sup>.

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  $\phi$  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.

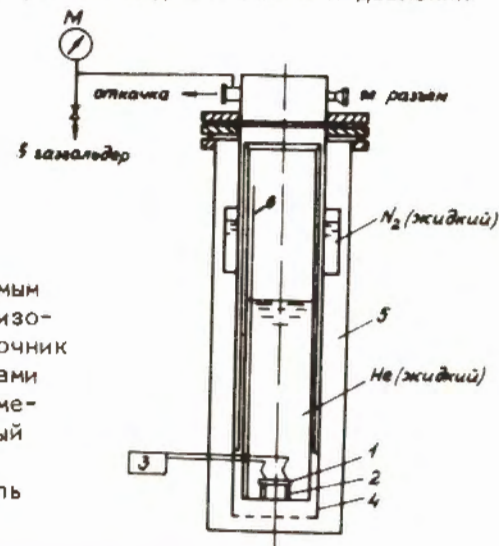


Рис. 1. Криостат с исследуемым образцом: 1 - образец, 2 - изолирующая подставка, 3 - источник импульсной энергии с приборами для регистрации и записи изменения температуры, 4 - медный экран, 5 - вакуумный кожух, 6 - сверхпроводящий указатель уровня жидкого гелия.



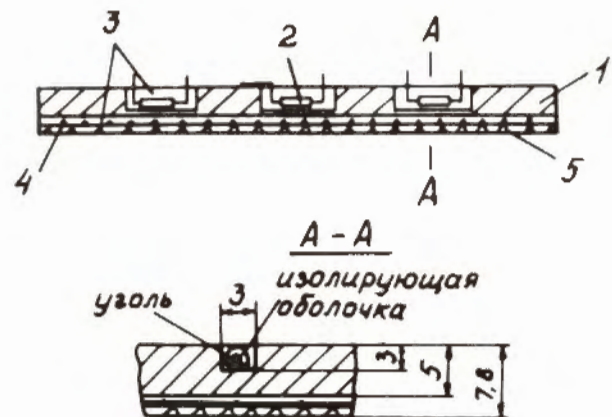


Рис. 2. Исследуемый образец с установленным нагревателем и датчиками температуры: 1 - медная пластина с габаритами  $0,005 \times 0,1 \times 0,1$  м, 2 - резистор Allen-Bradley - 3 шт.; 3 - эпоксидная смола Delta-Bond; 4 - нагреватель с  $R = 100 \text{ Ом}$ ; 5 - стеклотекстолит с габаритами  $0,001 \times 0,1 \times 0,1$  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  $R = 100 \text{ Ом}$ , 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  $T = 4 \text{ К}$  и  $T = 2 \text{ К}$  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  $F = 0,01 \text{ м}^2$ .

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

в He-II осуществлялся путем откачки паров/ и в жидком недогретом гелии He-I, температура которого была меньше температуры насыщения,  $T_{\text{ж}} < T_s$  /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  $4,2 \text{ К}$  составила  $0,5\%$ , при  $2 \text{ К}$  -  $1\%$ . На рис. 3 показана форма импульса электрического напряжения, воздействующего на образец, и приведены соответствующие значения джоулевого тепла, выделяемого в импульсе. Количество энергии, запасенной в конденсаторе, определялось по формуле  $E = \frac{C \cdot U^2}{2} [\text{Дж}]$ , 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  $\tau \leq 10^{-3} \text{ с}$ .

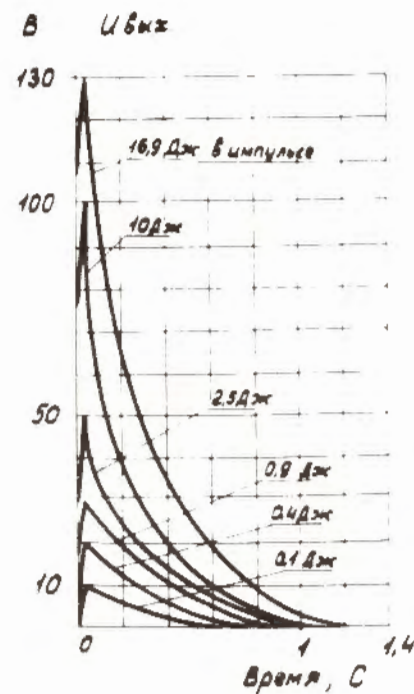


Рис. 3. Форма импульса электрического напряжения, воздействующего на образец, в зависимости от времени и количества энергии, выделяемой в импульсе;  $U_{\text{вых}}$  - напряжение на нагревателе [В].

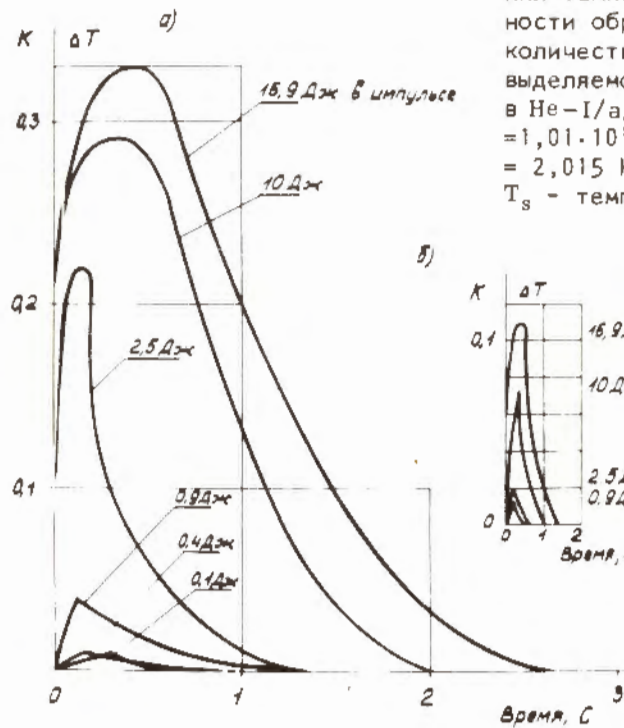
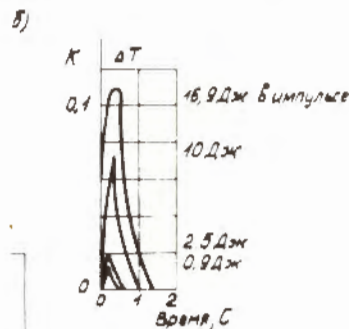


Рис. 4. Зависимость изменения температуры на поверхности образца от времени и количества тепловой энергии, выделяемой в импульсе:  
 в He-I/a/  $T_s = 4,224$  К,  $p = 1,01 \cdot 10^5$  Па; в He-II/b/  $T_s = 2,015$  К,  $p = 0,03 \cdot 10^5$  Па;  
 $T_s$  - температура насыщения.



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  $100 \text{ Вт/м}^2$  /1,5 Дж в импульсе/ имеет место конвективная теплоотдача в He-I. при более высоких тепловых потоках, включая  $700 \text{ Вт/м}^2$  /16,9 Дж в импульсе/, имеет место пузырьковое кипение. Эти данные согласуются с результатами работы<sup>14/</sup>. Среднее значение коэффициента теплоотдачи в He-I по формуле Ньютона-Рихмана

$$\bar{\alpha}_{\text{имп}} = \frac{Q_{\text{имп}}}{\tau \cdot F \cdot \Delta T} \quad /1/$$

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

среднее значение разности температур медного образца и температуры гелия в ванне [К], 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  $0,3 \pm 0,33$  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  $T_{ж} = T_s = 2,015$  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 К, а длительность температурного импульса не превышает длительности теплового.

Согласно теории сверхтекучести Л.Д.Ландау<sup>15/</sup> 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<sup>16,7/</sup> приводит к появлению так называемого "сопротивления Капицы", реализуемого в виде скачка температуры  $\Delta T$  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  $\alpha_0$  в импульсном режиме.

Несомненно, что столь высокое значение  $\alpha$ , 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  $T_{ж} < T_s$ ,  $T_{ж} = 2,18$  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/.

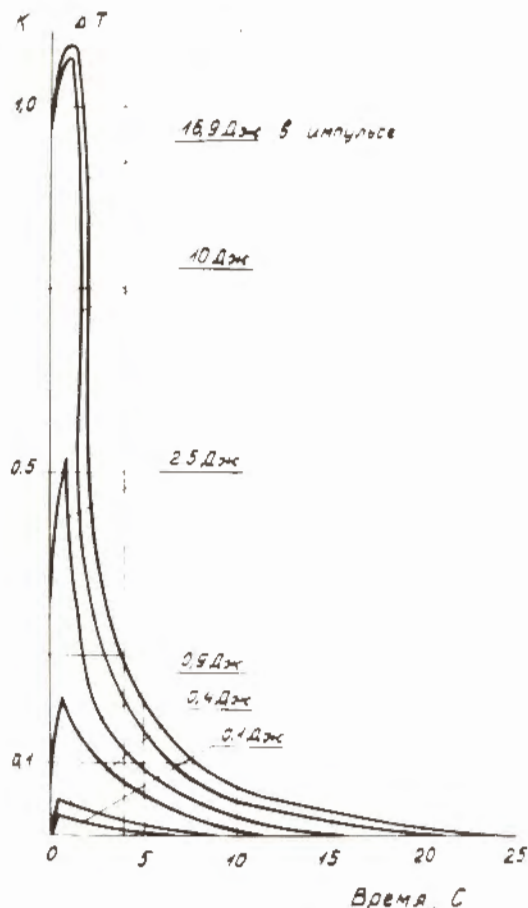


Рис. 5. Зависимость изменения температуры на поверхности образца от времени и количества тепловой энергии, выделяемой в импульсе, в недогретом жидком He-I,  $T_{ж} = 2,18$  К,  $p = 1,01 \cdot 10^5$  Па.

Согласно /1/ для случая рис. 5 имеем среднее значение коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}_{имп} \approx 300$  Вт/м<sup>2</sup>·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 ( $T_{ж} < T_s$ ) для криостатирования сверхпроводящих импульсных устройств нежелательно из-за больших  $\Delta T > 1,0$  К/ изменений температуры на поверхности, что резко снижает возможности сверхпроводящих устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев А.И. и др. Сверхпроводящие и криогенные устройства ускоряющей секции коллективного ускорителя. ЖТФ, 1977, т.47, № 6, с.1213-1221.
2. Schwettman H.A. e.a. 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 pulsformigem 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.