

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

A 873

8-87-856

**А.М.Архаров<sup>\*</sup>, Ю.С.Дерендяев, В.И.Пряничников**

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОТДАЧИ  
К He- I И He- II  
ПРИ КИПЕНИИ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ  
И В "СТЕСНЕННЫХ" УСЛОВИЯХ**

---

**\* МВТУ им. Н.Э.Баумана, Москва**

**1987**

Сверхпроводящие ускоряющие структуры — резонаторы, волноводы и т.п., использующие погружные или прокачные системы криостатирования, являются основными элементами сверхпроводящих линейных ускорителей и других электрофизических установок<sup>1,2/</sup>.

Рабочие характеристики этих устройств и надежность работы в целом зависят в значительной мере от условий криостабилизации сверхпроводящих устройств на гелиевом температурном уровне. Использование сверхтекучего гелия при температуре ниже 2,172 К позволяет повысить добротность резонатора и обеспечить более надежную тепловую стабилизацию структуры по сравнению со стабилизацией ее жидким гелием при  $T = 4,2 \text{ К}^{3,4/}$ . Условия криостабилизации определяются в значительной мере характеристиками теплоотдачи. Тепловая стабилизация сверхпроводящих резонаторов может быть осуществлена путем погружения их в ванну с жидким гелием или путем циркуляции жидкого гелия в каналах. Циркуляционное охлаждение имеет преимущества по сравнению с погружным: упрощается конструкция криостата, требуется меньшее количество гелия для заполнения системы, система способна работать в любом пространственном положении. В обоих случаях охлаждение происходит за счет кипения, возникающего на поверхности охлаждаемого объекта. С той разницей, что в первом случае имеет место свободная теплоотдача с охлаждающей поверхности, а во втором — стесненная. Ряд сверхпроводящих ускоряющих структур работает в режимах, близких к квазистационарным, поэтому для них применимы результаты, полученные при стационарных тепловыделениях.

Данных по теплоотдаче к He-I и особенно к He-II в "стесненных" условиях, что имеет место в прокачных (циркуляционных) системах, недостаточно. Потребность в таких данных возрастает в связи с созданием широкого спектра сверхпроводящих устройств.

Настоящая работа направлена на определение интенсивности теплоотдачи к He-I и He-II и разработку метода численного моделирования расчета теплоотдачи в стесненных условиях с использованием экспериментальных данных путем моделирования условий работы сверхпроводящих резонаторов.

Экспериментальный образец, представленный на рис. 1, состоит из двух пластин 3 (отожженная медь М3), склеенных тонким слоем высокотеплопроводной смолы Delta-Bond. Между пластинами в пазах, заполненных смолой Delta-Bond, расположен нагреватель 2, диаметр проволоки 0,05 мм, сопротивление 1280 Ом. На теплоотдающих шлифованных поверхностях с помощью Delta-Bond установлены плоские германиевые термометры I, II, III, IV. Чувствительный элемент термо-

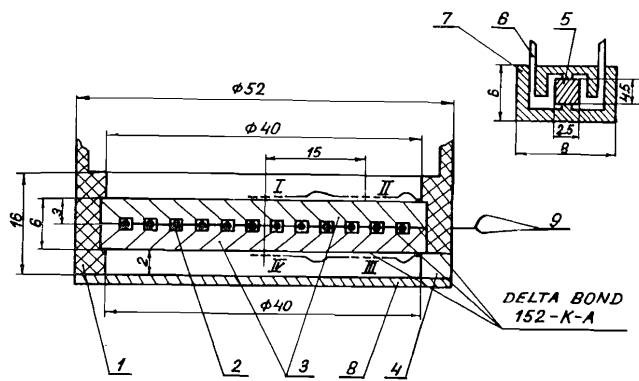


Рис. 1. Конструкция экспериментального образца: 1 — обойма из фторопласта, 2 — нагреватель, 3 — экспериментальный образец, 4 — канал для циркуляции гелия, 5 — германий, 6 — серебро, 7 — слюда, 8 — нержавеющая пластина, 9 — провода, I, II, III, IV — термометры.

метра — напыленный слой германия 5 вместе с серебряными выводами 6 заключен в пластину 7 из слюды толщиной 0,05 мм. Медные пластины помещены в обойму из фторопласта 1, которая изолирует торцевую поверхность и удерживает образец. Измерительные провода 9 от термометров и нагревателя выведены через боковую поверхность обоймы. При моделировании стесненных условий теплоотдачи использовалась пластина из нержавеющей стали 8, циркуляция гелия осуществлялась через канал 4. Экспериментальный образец, заключенный в обойму, крепился в держатель, позволяющий фиксировать его в различных пространственных ориентациях. Изоляция торцевой поверхности образца фторопластом позволила уменьшить теплоотвод с торцевой поверхности до величины, значительно меньшей, чем 1%, что исключает влияние теплоотвода с торца на общий тепловой баланс. Расположение нагревателя внутри экспериментального образца позволило смоделировать условия работы резонатора (распространение тепла от центра к периферии), а размещение нагревателя в виде спирали обеспечило равномерный нагрев.

Калибровка термометров проводилась перед каждым экспериментом в интервале температур 5,2—1,5 К. Чувствительность термометров в этом диапазоне температур составляет 240—300 Ом/К. Для определения температуры объема использовались шкала упругости паров гелия<sup>[5]</sup> и показания углеродного термометра высокой стабильности<sup>[6]</sup>. При калибровке и в процессе экспериментов использовались нановольтметры Keithley-181. Для подачи стационарной мощности

на образец использовался источник питания постоянного тока Б5-50, точность поддержания параметра на выходе ~1%.

Исследуемый образец помещался в криостат с жидким гелием, эксперименты проводились при давлении  $1 \cdot 10^5$  Па для He-I и  $0,02 \cdot 10^5$  Па для He-II при различных пространственных ориентациях образца в свободных и стесненных условиях.

Экспериментальные и расчетные зависимости плотности теплового потока  $q$  от температурного напора  $\Delta T$  в He-I показаны на рис. 2. Результаты представлены при двух пространственных ориентациях образца в свободных и стесненных условиях теплоотдачи. Стесненные условия теплоотдачи вызывают смещение зависимости в сторону больших температурных напоров, что соответствует теплоотдаче при кипении гелия в каналах в условиях вынужденного движения при скоростях  $\sim 0,5$  м/с<sup>[7]</sup>. Вынужденная циркуляция воздействует на механизм процесса парообразования, при малых скоростях  $< 0,5$  м/с теплоотдача в канале определяется интенсивностью процесса парообразования, то есть значением  $q$ , при скорости  $\gg 1$  м/с влияние  $q$  уменьшается и с повышением ско-

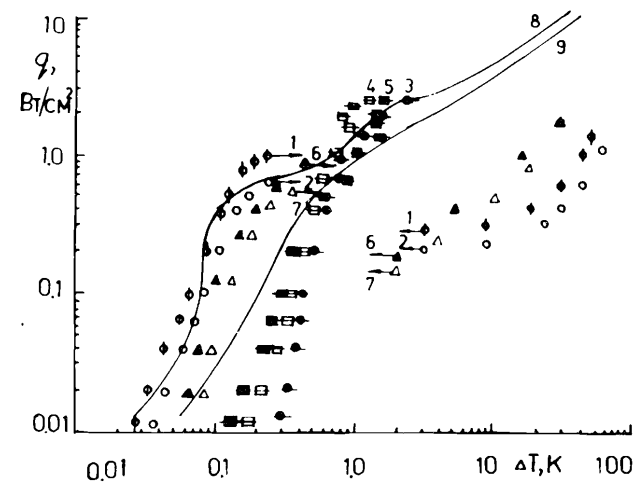


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные зависимости плотности теплового потока от температурного напора в He-I: 1 — горизонтальная ориентация (вверх), свободная теплоотдача  $T = 4,2$  К,  $p = 1 \cdot 10^5$  Па; 2 — вертикальная ориентация, свободная теплоотдача  $T = 4,2$  К,  $p = 1 \cdot 10^5$  Па; 3 — горизонтальная ориентация, стесненная теплоотдача  $T = 4,2$  К,  $p = 1 \cdot 10^5$  Па; 4 — горизонтальная ориентация (вверх), свободная теплоотдача  $T = 3,4$  К,  $p = 1 \cdot 10^5$  Па; 5 — горизонтальная ориентация, стесненная теплоотдача  $T = 3,4$  К,  $p = 1 \cdot 10^5$  Па; 6, 7 — данные работы<sup>[8]</sup>; 8 — расчет, свободная теплоотдача  $T = 4,2$  К,  $p = 1 \cdot 10^5$  Па; 9 — расчет, стесненная теплоотдача  $T = 4,2$  К,  $p = 1 \cdot 10^5$  Па.

рости коэффициент теплоотдачи приближается к значениям, имеющим место при конвекции однофазной жидкости<sup>15/</sup>.

Для сопоставления приведены экспериментальные данные по теплоотдаче к He-I, не догретому до состояния насыщения  $T_{ж} < T_s$ . Сравнение полученных зависимостей с данными работы<sup>18/</sup> выявляет удовлетворительное совпадение результатов при одинаковой ориентации образцов как при нарастающей, так и при спадающей тепловых нагрузках.

Экспериментальные и расчетные зависимости плотности теплового потока  $q$  от температурного напора  $\Delta T$  в He-II показаны на рис. 3. Результаты представлены в свободных и стесненных условиях теплоотдачи при двух пространственных положениях образца. Экспериментальная зависимость, полученная в условиях стесненной теплоотдачи, смещена в сторону больших температурных напоров по отношению к зависимости, полученной в свободных условиях. Но это смещение меньше аналогичного смещения в He-I, что объясняется, по-видимому, исключительно высокой теплопроводностью сверхтекучего гелия. Известно, что закономерности передачи теплоты в He-II существенным образом отличаются от обычной теплопроводности. Уровень теплоотдачи в He-II

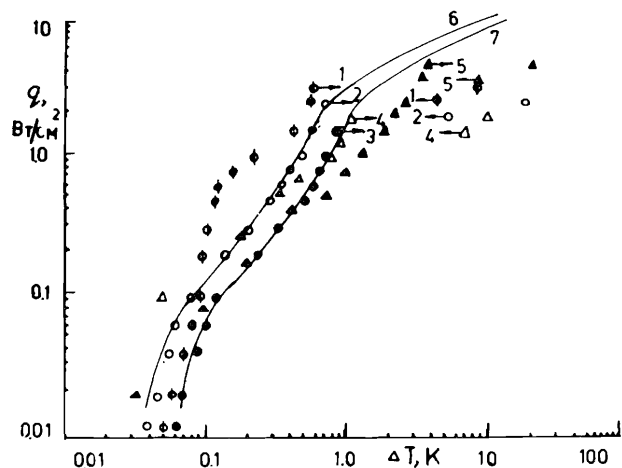


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные зависимости плотности теплового потока от температурного напора в He-II: 1 — вертикальная ориентация, свободная теплоотдача  $T = 1,9$  К; 2 — горизонтальная ориентация (вверх), свободная теплоотдача  $T = 1,9$  К; 3 — горизонтальная ориентация, стесненная теплоотдача  $T = 1,9$  К; 4 — данные работы<sup>19/</sup>,  $T = 2,1$  К; 5 — данные работы<sup>10/</sup>,  $T = 1,9$  К; 6 — расчет, свободная теплоотдача  $T = 1,9$  К; 7 — расчет, стесненная теплоотдача  $T = 1,9$  К.

в стесненных условиях весьма высок, но отличается от теплоотдачи в свободных условиях, теплоотдача в области пленочного кипения в этом случае будет существенно зависеть от теплового потока  $q_b$  на межфазной границе He-II — пар.

Сравнение полученных зависимостей с данными работ<sup>9,10/</sup> выявляет удовлетворительную сходимость при одинаковой ориентации образцов и близких значениях температуры.

Сделана попытка с помощью этих данных осуществить численное моделирование процесса теплоотдачи к жидкому гелию в свободных и стесненных условиях. Получены расчетные данные по распределению температуры в экспериментальном образце. В основу программы HRCINH, которая является развитием программы EQHEAT<sup>11/</sup>, положено уравнение теплопроводности

$$\rho(M) C(M) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} [\lambda(M) \text{grad } T(M, t)] + \dot{Q}_v(M), \quad (1)$$

где  $T$  — температура,  $t$  — время,  $M$  означает координаты  $(r, \phi, z)$  рассматриваемой точки,  $\rho(M)$  — плотность,  $C(M)$  — теплоемкость,  $\lambda(M)$  — теплопроводность,  $\dot{Q}_v(M)$  — энергия, выделяемая источником тепла в единице объема за единицу времени. Коэффициенты  $\rho, c, \lambda$  для меди в рассматриваемом интервале температур изменяются на 5–1,5%, поэтому для изучения первого приближения их можно принять постоянными:  $\rho = 8950$  кг/м<sup>3</sup>,  $C = 0,12$  Дж/кг·К,  $\lambda = 80$  Вт/м·К при  $T = 4,2$  К и  $\rho = 8950$  кг/м<sup>3</sup>,  $C = 0,044$  Дж/кг·К,  $\lambda = 50$  Вт/м·К при  $T = 2$  К.

На ЭВМ решается уравнение (1) с начальными условиями  $T(t = 0, M) = 4,2$  К для He-I или  $T(t = 0, M) = 2$  К для He-II. На поверхности исследуемого образца, которая имеет непосредственный контакт с гелием, реализовано при расчетах граничное условие

$$-\lambda_{Cu} \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_{Cu} - T_{He}), \quad (2)$$

где  $n$  — нормаль к границе,  $\lambda_{Cu}$  — теплопроводность меди на границе с гелием,  $T_{Cu}$  — температура меди,  $T_{He}$  — температура гелия на границе с медью,  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от меди к гелию. Коэффициент  $\alpha$  вычисляется из уравнения

$$q_{ЭК}(\Delta T) = \alpha \cdot \Delta T. \quad (3)$$

Здесь  $\Delta T = T_{Cu} - T_{He}$  — температурный напор,  $q_{ЭК}(\Delta T)$  — расчетные зависимости, полученные квадратичной экстраполяцией экспериментальных данных на рис. 2, 3. На поверхности образца, которая имеет контакт с обложкой из фторопласта, реализовано граничное условие, соответствующее тепловой изоляции  $\partial T / \partial n = 0$ .

В исследованном диапазоне плотности теплового потока коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  в свободных условиях теплоотдачи выше, чем в стесненных, в среднем в 7 раз для He-I и в 2 раза для He-II.

Анализ и сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывают, что границы применимости алгоритма, заложенного в основу программы HRCINH, находятся в интервале времени, характерном для квазистационарных процессов. Для численного моделирования процессов нестационарной теплоотдачи к жидкому гелию осуществляется разработка программы на основе гиперболического уравнения теплопроводности.

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить качественное и количественное различие режимов теплоотдачи к He-I и He-II в свободных и стесненных условиях. Создана программа, позволяющая методом численного моделирования с достаточной степенью точности описывать квазистационарные процессы теплоотдачи в свободных и стесненных условиях и рассчитывать температурное поле в любой точке резонатора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Диденко А.Н., Севрюкова Л.М., Ягис А.А. *Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ-структуры*. М.: Энергоиздат, 1981, с.208.
2. Bernard Ph. et al. – *Nucl. Instr. and Meth.*, 1981, 190, p.257.
3. Ageev A.I. и др. – *ЖТФ*, 1977, т.47, №6, с.1213.
4. Schwettman H.A. et al. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1967, June, p.336.
5. *Справочник по физико-техническим основам криогеники (под ред. М.П.Малкова)*. М.: Энергоиздат, 1985, с.432.
6. Микляев В.М. и др. *Препринт ОИЯИ Р8-86-583*, Дубна, 1986.
7. *Тепло- и массообмен теплотехнический эксперимент, справочник*. М.: Энергоиздат, 1982, с.510.
8. Ogata H. and W.Hakayama. – *Adv. Cryog. Eng.*, 1982, v.27, p.309.
9. Van Sciver S.W. and R.L.Lee – *Adv. Cryog. Eng.*, 1980, v.25, p.363.
10. Hilal M.A. – *Adv. Cryog. Eng.*, 1980, v.25, p.358.
11. Архаров А.М., Дерендяев Ю.С., Пряничников В.И. – В кн.: *Межвуз. сб. тр.*, №34, М.: Моск. энерг. ин-т, 1984, с.10.

Рукопись поступила в издательский отдел  
4 декабря 1987 года.

#### НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р.55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р.00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р.50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р.30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р.50 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р.50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р.75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р.80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р.75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р.50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/	13 р.50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/	7 р.35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/	13 р.45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986	7 р.10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа-86". Дубна, 1986	4 р.45 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

**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
19.	Биофизика

Архаров А.М., Дерендяев Ю.С., Пряничников В.И. 8-87-856  
Некоторые особенности теплоотдачи к He-I и He-II при кипении в большом объеме и в "стесненных" условиях

Проведено исследование интенсивности теплоотдачи к He-I и He-II и разработка метода численного моделирования расчета теплоотдачи в "стесненных" условиях с использованием экспериментальных данных путем моделирования условий работы сверхпроводящих резонаторов. Установлено, что в "стесненных" условиях теплоотдача ниже, чем в свободных: к He-I — в 7 раз, к He-II — в 2 раза.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Arkharov A.M., Derendyaev Yu.S., Pryanichnikov V.I. 8-87-856  
Some Special Features of Heat Transfer to He-I and He-II at Boiling in a Large Volume and under Embarrassed Conditions

The intensity of heat transfer to He-I and He-II was investigated, and method for numerical simulation of heat transfer under embarrassed conditions using experimental data by modelling the conditions of operation of superconducting cavity was developed. It is established that under embarrassed conditions heat transfer to He-I is lower by a factor of 7, and to He-II — by twice, as compared to normal ones.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987