

т

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

657/2-81

9/2-81
8-80-536

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕПЛОТДАЧИ В He-I И He-II
ПРИ СТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

Направлено в журнал "Химическое
и нефтяное машиностроение"

1980

Процессы теплоотдачи в жидком гелии He-I и He-II представляют значительный практический интерес при создании и стабилизации сверхпроводящих систем^{1,2/}. При этом очень важно знать значение критического теплового потока $q_{кр}$ и соответствующий ему температурный напор $\Delta T_{кр}$, чтобы не допустить перехода сверхпроводника в нормальное состояние. Однако данных для проведения надежных тепловых расчетов, связанных с теплоотдачей в He-I и особенно в He-II, в настоящее время недостаточно.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования теплоотдачи от медного образца в He-I и He-II при стационарной тепловой нагрузке. Образец изготовлен в виде пластины с размерами $0,005 \times 0,1 \times 0,1$ м из отожженной меди марки МЗ. С одной стороны пластины установлен нагреватель; температура поверхности противоположной стороны пластины измерялась тремя угольными резисторами фирмы Allen-Bradley, а результаты измерений фиксировались цифровым вольтметром. Эксперименты проводились на горизонтально расположенной пластине, обращенной нагревателем вниз. Описание экспериментального стенда и некоторые данные приведены в работе^{3/}.

На рис.1 представлены экспериментальные значения теплового потока от образца q , Вт/м², в He-I /кривая I/ и коэффициента теплоотдачи α , Вт/м²К /кривая III, построена на основе уравнения $\alpha = q / \Delta T$ / в зависимости от температурного напора $\Delta T = T_{ст} - T_s$, К. На экспериментальной кривой I кипения в He-I отмечены характерные области теплообмена: конвективная, развитого пузырькового кипения, переходная и устойчивого пленочного кипения; зоны их распространения совпадают с аналогичными зонами работы^{4/}. Следует отметить, что для исследованного сравнительно массивного медного образца первая критическая плотность теплового потока $q_{кр1} \approx 8000$ Вт/м² имела место при температурном напоре $\Delta T_{кр1} \approx 0,9$ К. В работах^{5,6/}, проведенных на тонких образцах, первый кризис кипения имел место при критической плотности теплового потока $q_{кр1} \approx 8000 \div 10000$ Вт/м² и температурном напоре $\Delta T_{кр1} \approx 0,7 \div 1,0$ К.

На рис.2 представлены экспериментальные значения теплового потока от образца q , Вт/м², в He-II /кривая I / и коэффициента теплоотдачи α , Вт/м²К /"проводимость Капицы" - кривая II /^{8,9/} в зависимости от температурного напора $\Delta T = T_{ст} - T_s$, К. На экспериментальной кривой I по аналогии с работой^{10/} отмечены характерные области теплообмена: "сопротивления Капицы"; "беспленочного кипения"; переходная область; область пленочного кипения. Видно, что для исследованного образца критическая плотность теплового потока $q_{кр} \approx 2500$ Вт/м², наблюдалась при температурном напоре $\Delta T_{кр} \approx 0,32$ К. Интересно, что при температурном напоре $\Delta T = 0,55$ К тепловой поток практически пере-

стает зависеть от температурного напора. В работах^{/10.11/} отмечается, что значения критической плотности теплового потока $q_{кр}$ в He-II весьма различны и их значения разными авторами указаны в диапазоне от 100 до 150000 Вт/м² в зависимости от температуры гелиевой ванны, размеров и формы поверхности нагрева и глубины ее погружения. К сожалению, данные экспериментальные результаты невозможно сопоставить с расчетными, т.к. в настоящее время отсутствуют^{/10/} соотношения для теоретического определения максимальной плотности теплового потока $q_{кр}$ в He-II и не существует аналитической оценки величины температурного напора $\Delta T_{кр}$. В работе^{/12/} исследования проводились на медных образцах с чистотой 99,999%, были получены высокие значения критической плотности теплового потока $q_{кр} \approx 10000 \div 50000$ Вт/м² при температурных напорах $\Delta T_{кр} \approx 1 \div 5$ К, однако в области температурных напоров $\Delta T \approx 0,1 \div 0,3$ К экспериментальные значения теплового потока находятся в хорошем соответствии с результатами данной работы.

Кривая II построена на основе уравнения $\alpha = q / \Delta T$ по нашим экспериментальным данным и показывает характер изменения коэффициента теплоотдачи α в зависимости от температурного напора ΔT в He-II. Выражение для определения теоретического значения коэффициента теплоотдачи от твердой стенки к He-II было получено И.М.Халатниковым^{/13/}:

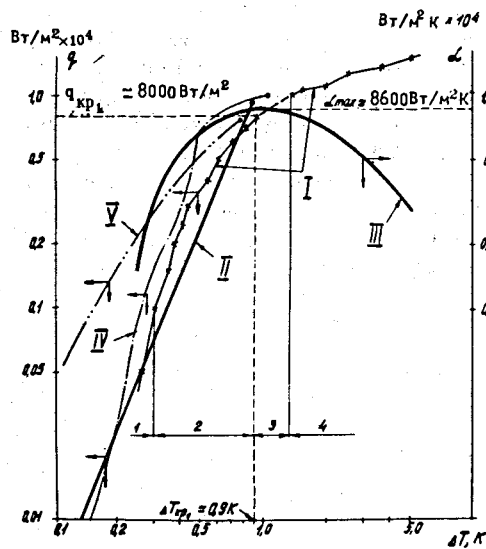


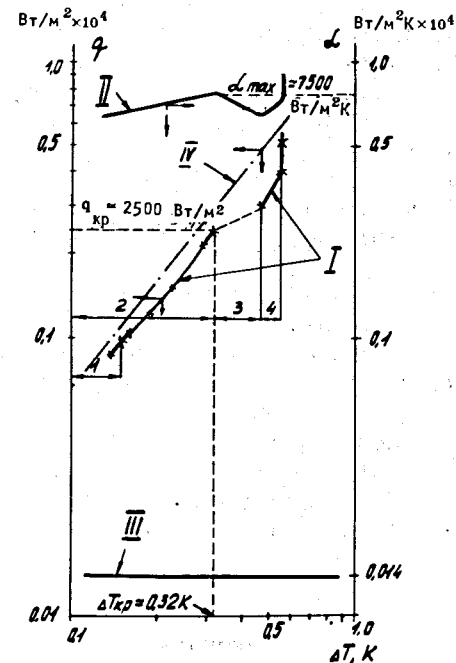
Рис.1. Тепловой поток от медного образца в He-I и коэффициент теплоотдачи в зависимости от температурного напора: $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па; уровень жидкого гелия над образцом $H = 35$ см; температура насыщения $T_s = 4,244$ К; I - экспериментальная кривая кипения в He-I: 1 - конвективная область, 2 - область развитого пузырькового кипения, 3 - переходная область, 4 - область устойчивого пленочного кипения; II - расчетная зависимость по формуле Кутателадзе С.С.^{/11/}; III - зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора, построенная по экспериментальным данным; IV, V - зависимости теплового потока от температурного напора из работ^{/5.6/}.

$$\alpha_0 = \frac{q}{\Delta T} = \frac{16 \pi^4 \cdot k \cdot \rho_{ж} \cdot \omega_{ж}}{15 h \cdot \rho_T \cdot \omega_t^3} \cdot F\left(\frac{\omega_t}{\omega_l}\right) T_s^3 \quad /1/$$

где K - постоянная Больцмана; $\rho_{ж}$ и ρ_T - плотности жидкого гелия и твердого тела соответственно, кг/м³; h - постоянная Планка; $\omega_{ж}$ - скорость первого звука в жидком гелии, м/с; ω_t и ω_l - скорость продольного и поперечного распространения звука в твердом теле соответственно, м/с; $F\left(\frac{\omega_t}{\omega_l}\right)$ - функция упругих констант твердого тела.

Расчет дает теоретическое значение коэффициента теплоотдачи от меди в He-II $\alpha_0 \approx 20 T_s^3$, Вт/м²К. Для $T_s = 1,91$ К, как в случае рис.2, расчетное значение $\alpha_0 \approx 139$ Вт/м²К, а экспериментальное лежит в диапазоне 5500 \div 7500 Вт/м²К. Расхождение результатов теоретических расчетов и экспериментальных значений наблюдается во многих известных работах и подробно рассматривается авторами работ^{/10.11/}, при этом значения коэффициентов теплоотдачи, полученные экспериментальным путем для любых поверхностей нагрева, оказываются значительно выше, чем

Рис.2. Тепловой поток от медного образца в He-II и коэффициент теплоотдачи в зависимости от температурного напора: $p = 0,02 \cdot 10^5$ Па; уровень жидкого гелия He-II над образцом $H = 15$ см; температура насыщения $T_s = 1,91$ К; I - экспериментальная кривая теплоотдачи в He-II: 1 - область "сопротивления Капицы", 2 - "беспленочного кипения", 3 - переходная область, 4 - область пленочного кипения; II - зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора, построенная по экспериментальным данным; III - расчетная зависимость по формуле Халатникова И.М.^{/13/}; IV - зависимость теплового потока от температурного напора из работы^{/12/}.



это предсказывается теорией. Значения коэффициента теплоотдачи, полученные на рис.2 для области $\Delta T < T_s$ при $T_s = 1,8 \div 2,1$ К, хорошо аппроксимируются формулой $\alpha \approx 850 T_s^3$; Вт/м²К.

ВЫВОДЫ

1. Получена экспериментальная зависимость $q = f(\Delta T)$ в He-I для относительно массивного медного образца; найдены значения $q_{кр1}$ и $\Delta T_{кр1}$.
2. Получена экспериментальная зависимость $q = f(\Delta T)$ в He-II для относительно массивного медного образца; определены значения $q_{кр}$ и $\Delta T_{кр}$.
3. Полученные результаты сопоставлены с теоретическими; сравнение с экспериментальными данными других авторов в возможной области показывает удовлетворительное совпадение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев А.И. и др. ЖТФ, 1977, т.47, №6, с.1213-1221.
2. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. "Мир", М., 1976, с.704.
3. Архаров А.М. и др. ОИЯИ, 8-80-112, Дубна, 1980.
4. Bailey R.L. Experiment Report RL-73-089, August 1973, Department of Engineering Science, Rutherford Laboratory, Chilton.
5. Efferson K.R. J.Appl.Phys., 1969, vol.140, p.995.
6. Cummings R.D., Smith J.L. Proc. IIR.Comm., 1966, 1, p.85.
7. Кутателадзе С.С. Теплопередача при конденсации и кипении. "Машгиз", М.-Л., 1952, с.232.
8. Капица П.Л. ЖЭТФ, 1941, т.11, вып. 1, с.1-31.
9. Капица П.Л. ЖЭТФ, 1941, т.11, вып.6, с.581-591.
10. Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. "Энергия", М., 1977, с.288.
11. Фрост У. Теплопередача при низких температурах. "Мир", М., 1977, с.391.
12. Goodling J.S., Irey R.K. Non-Boiling and Film-Boiling Heat Transfer to a Saturated Bath of Liquid Helium. Adv.in Cryog.Eng., 1969, v.14, p.159.
13. Халатников И.М. ЖЭТФ, 1952, т.22, вып.6, с.687-704.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 июля 1980 года.