

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P8-87-33

В.М.Микляев, И.А.Сергеев, Ю.П.Филиппов

**ОСОБЕННОСТИ
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ
К СВЕРХТЕКУЧЕМУ ГЕЛИЮ**

Направлено в "Инженерно-физический журнал"

1987

В последнее время наблюдается устойчивый рост числа работ, посвященных исследованиям гидродинамики и теплопередачи в сверхтекучем гелии - $He II$. Это вызвано, во-первых, необходимостью построения адекватной теории теплоотдачи в сверхтекучий гелий ^{/1/} и, во-вторых, возможностью практического применения $He II$ в качестве хладагента в криогенных системах ^{/2,3/}.

В настоящее время накоплено значительное количество экспериментальных данных, касающихся физики сверхтекучей жидкости (гидродинамика, акустика, фазовые переходы) ^{/4,5/} и процессов на границе твердое тело - $He II$ (сопротивление Капицы, критические тепловые потоки, теплоотдача в разных режимах) ^{/6,7/}. Однако, как отмечено в обзоре ^{/1/}, по вопросам нестационарной теплопередачи к $He II$, развития тепловых возмущений с турбулентным фронтом, динамики фазовых переходов сверхтекучего гелия как в пар гелия, так и в нормальный гелий - $He I$ ($He II \rightarrow$ пар He ; $He II \rightarrow He I$) количество работ явно недостаточно.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании процессов нестационарной теплоотдачи от поверхности твердого тела цилиндрической формы, погруженного в объем сверхтекучего гелия.

Эксперименты проводились в объеме жидкого гелия II , на свободной поверхности которого поддерживалось давление $P_s = 1780$ Па (равновесная температура $T_s = 1,82$ К). Объем жидкого гелия $\approx 3,0 \cdot 10^{-3}$ м³, площадь свободной поверхности жидкости $\approx 1,54 \cdot 10^{-2}$ м², глубина погружения образца $0,05 \pm 0,15$ м.

Экспериментальный образец представлял собой тонкую углеродную пленку длиной 54 мм, напыленную на подложку - внешнюю поверхность керамической трубки $\phi 11,5 \times 1,75$ мм. С торцов керамическая трубка была закрыта клееными коваровыми заглушками, что обеспечивало при гелиевых температурах внутри трубки вакуум ^{/8/}. Углеродная пленка служила одновременно нагревателем и малоинерционным высокочувствительным термопреобразователем. Толщина нагревателя - термометра (НТ) менее 1 мкм, время тепловой реакции менее 100 нс, чувствительность $\left| \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \right|$ около $0,65$ К⁻¹ при температуре 1,8 К и около $0,20$ К⁻¹ при 4,0 К.

Исследования проводились при горизонтальной и вертикальной ориентациях образца как в свободных, так и в стесненных условиях. Последние моделировались помещением образца коаксиально в стальную трубку $\phi 16 \times 1,0$ мм длиной 80 мм так, чтобы между поверхностью НТ и внутренней поверхностью стальной трубки образовывался кольцевой зазор толщиной 1,25 мм.

Нагрузка на образец подавалась в виде импульса мощности ступен-

чатой формы, длительность переднего фронта которого не превышала 10 мкс, причем аппаратура обеспечивала стабилизацию во времени мощности тепловыделения в НТ. Дрейф мощности тепловыделения не превышал 2% относительно средней величины мощности W . Блок-схема и описание использованного комплекса электронной аппаратуры, работающего на линии с ЭВМ МERA-60, приведены в ^{/8/}.

Результаты экспериментов обрабатывались в виде зависимостей интегрального перегрева поверхности образца $\Delta T = T - T_s$ от времени t после наброса импульса мощности - $\Delta T(t)_W$. Каждая кривая $\Delta T(t)_W$ состоит из 4736 точек, из которых 4096 получены с временным разрешением 50 мкс, а остальные - с интервалом 10 мс при повторном импульсе той же мощности. Первое измерение производилось через 10 мкс после наброса нагрузки на НТ. Интервалы между измерениями задавались с точностью не хуже 1 мкс. Ошибка определения перегрева не превышала 10 мК при $\Delta T < 3,5$ К, а в остальном диапазоне была не больше 0,5%. Погрешность измерения мощности тепловыделения составляла 1-4%, причем большие значения относятся к меньшим величинам W .

Все имеющиеся в литературе данные и расчетные соотношения для характеристик нестационарных процессов в $He II$ получены для одномерной геометрии (длинные узкие каналы ^{/3,5/}). В настоящей работе геометрия эксперимента либо двухмерная (вертикальная ориентация), либо трехмерная (горизонтальная). Что касается стационарных режимов, то практически все данные получены на образцах, представляющих собой либо пластины, либо тонкие проволочки. Параметры использованного нами образца: наружный диаметр, площадь теплоотдающей поверхности, по величине на один-два порядка превосходили соответствующие параметры образцов большинства других авторов. В силу этого использование содержащейся в литературе количественной информации как отправной точки исследования было затруднительным. Поэтому эксперименты проводились в тех же диапазонах времен и нагрузок, в каких ранее в объеме $He I$ с тем же образцом были проведены аналогичные исследования ^{/8/}.

Экспериментальные данные получены в диапазонах перегревов $0,1 \pm 100$ К, времен 10 мкс $\pm 6,4$ с, мощностей импульсов $0,08 \pm 10$ Вт (это соответствует плотностям теплового потока в гелий $q \approx 40 \pm 5000$ Вт \cdot м⁻²).

Результаты экспериментов, проведенных в объеме сверхтекучего гелия при вертикальной ориентации образца в свободных условиях, представлены на рис. 1 линиями 1-6*.

* При горизонтальной ориентации в свободных условиях получены практически идентичные результаты.

На рис. I также приведены результаты экспериментов в объеме нормального гелия ($P_3 = 104$ кПа) на том же образце в тех же условиях - кривые 7+II /8/. Из рисунка видно, что характер нестационарной теплопередачи к He II в сравнении с характером этого процесса в He I имеет ряд существенных особенностей.

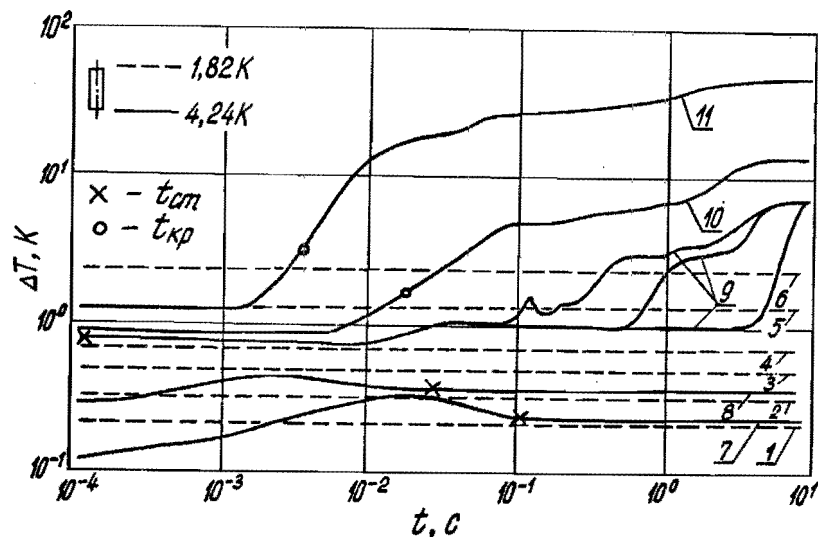


Рис. I. Зависимости перегрева поверхности ΔT , K от времени t , c после наброса импульса мощности W , Вт - $\Delta T(t)_W$ при вертикальной ориентации образца в свободных условиях в гелии II и в гелии I /8/. I - $W = 0,08$ Вт; 2 - 0,15 Вт; 3 - 0,31 Вт; 4 - 0,61 Вт; 5 - 2,4 Вт; 6 - 9,8 Вт; 7 - 0,34 Вт; 8 - 1,4 Вт; 9 - 7,7 Вт; 10 - 9,7 Вт; II - 19,7 Вт.

Выделяя эти особенности, в первую очередь необходимо рассмотреть такую характеристику процесса нестационарной теплопередачи, как время t_{CT} . Величина t_{CT} определяется временем, за которое при тепловых нагрузках, меньших критической, происходит установление стационарных режимов отвода тепла (кривая 7 при $t > 100$ мс; кривая 8 при $t > 20$ мс), а при нагрузках, превышающих критическую, - метастабильных режимов (кривая 9 при $0,1$ мс $< t < 6$ мс)*.

* На рис. I моменты установления стационарных и метастабильных режимов отмечены значком x.

В нормальном гелии время t_{CT} связано с моментом, когда режим теплопередачи теплопроводностью в гелии I сменяется пузырьковым (стационарным или метастабильным) кипением. Причем величина t_{CT} строго связана с тепловой нагрузкой и составляет ≈ 100 мс при $W = 0,34$ Вт (кривая 7), ≈ 20 мс при 1,4 Вт (кривая 8) и $\approx 0,1$ мс при 7,7 Вт (кривая 9). В отличие от этого в гелии II во всем исследованном интервале нагрузок t_{CT} не превышает, по крайней мере, величины 0,1 мс. Этот факт может быть связан с чрезвычайно быстрым установлением соответствующего приложенной тепловой нагрузке значения сопротивления Капицы R_K . По данным работы /9/, значения R_K , полученные по стационарной методике и по методике второго звука, совпадают. Максимальная опробованная частота нагрузки в /9/ составляла 600 Гц, т.е. в условиях этих экспериментов R_K устанавливалось за время, не превышающее 1 мс. В первом приближении это согласуется с представленными результатами. Таким образом, величина t_{CT} в гелии II по крайней мере на три порядка (судя по кривым 3 и 7) меньше значения t_{CT} в гелии I при той же тепловой нагрузке.

Вторая особенность процесса нестационарной теплопередачи к He II связана с весьма большим временем наступления кризиса * $t_{кр}$, вслед за которым происходит переход к пленочному кипению. Для гелия I величина $t_{кр}$ составляет десятки микросекунд при $W = 9,7$ Вт (кривая 10) и единицы микросекунд при 19,7 Вт (кривая II), тогда как для гелия II в свободных условиях во всем диапазоне исследованных времен и нагрузок явление кризиса не обнаружено, хотя часть данных (линия 6) получена при удельных мощностях импульсов, превышающих стационарную критическую величину $q_{кр}$. Как будет показано ниже, в стесненных условиях при таких нагрузках наблюдается переход к пленочному кипению, а, как известно /10/, $q_{кр}$ не зависит от толщины канала с He II. Отсутствие кризиса, по всей видимости, свидетельствует о том, что в сверхтекучем гелии за время измерений (6,4 с) величина $t_{кр}$ не была достигнута. Подтверждением этого предположения служит расчет $t_{кр}$ по соотношению

$$t_{кр} = B(T) q^{-4}, \quad (I)$$

* На рис. I моменты наступления кризиса отмечены значком o. (Момент кризиса идентифицировался по общепринятой методике - превышение величины перегрева на 30 % значения ΔT в режиме метастабильной нуклеации).

где q - плотность теплового потока, $B(T)$ - константа, зависящая от температуры гелия T ($B \sim 100 \text{ Вт}^4 \cdot \text{см}^{-8} \cdot \text{с}$). Согласно выражению (I), полученному как эмпирически ^{/3/}, так и теоретически ^{/11/}, в условиях наших экспериментов $t_{кр}$ составляет величину порядка десятков минут при нагрузке 9,8 Вт, чему не противоречат представленные результаты. Таким образом, величина $t_{кр}$ для гелия II по крайней мере на три порядка (судя по кривым 6 и 10) больше значения $t_{кр}$ для гелия I при тех же нагрузках.

Кроме того, зарегистрированные процессы нестационарной теплопередачи в объеме сверхтекучего гелия не характеризуются областью неустойчивости (ОН), обнаруженной при аналогичных условиях в нормальном гелии ^{/8/}. Область неустойчивости образована кривыми $\Delta T(t)_W$, которые соответствуют мощностям импульсов, близким к стационарной критической величине, и находится в интервалах перегревов $\approx 1+10 \text{ К}$ и времен $\approx 0,1+10 \text{ с}$. Интервалы перегревов и времен, в которых находится ОН, зависят от ориентации и условий проведения эксперимента ^{/8/}. В области неустойчивости обнаружен ряд нелинейных эффектов ^{/8/} - в частности ветвление кривых $\Delta T(t)_W$ (см., например, кривую 9). Так как для HeI причины образования ОН тесно связаны с явлением кризиса, то можно предположить, что для HeII аналогичная область не выявлена из-за недостаточной продолжительности измерений (не было достигнуто время $t_{кр}$).

При помещении образца в стесненные условия характер нестационарной теплопередачи в сверхтекучий гелий частично сохраняет перечисленные выше особенности. Вместе с тем в стесненных условиях обнаруживается ряд качественно иных процессов.

Результаты, полученные в объеме гелия II ($P_S = 1780 \text{ Па}$) при вертикальной ориентации образца в стесненных условиях, представлены кривыми 6+12 на рис.2 в сравнении с данными, соответствующими свободным условиям (линии 1+5). Из рисунка видно, что при нагрузках, меньших некоторой пороговой величины, между результатами для стесненных и свободных условий имеются лишь небольшие количественные расхождения. Однако при мощностях импульсов, превышающих эту величину, наблюдаются яркие качественные различия. Эти различия иллюстрируются кривыми 9+12, образующими некоторую специфическую область в интервалах перегревов $\approx 1,35+35 \text{ К}$ и времен $\approx 500 \text{ мс}+6,4 \text{ с}$. Эта область в дальнейшем именуется "областью переходов" (ОП). На первый взгляд, область переходов напоминает обнаруженную для HeI область неустойчивости, однако, как будет показано ниже, причины возникновения ОП и характер происходящих в ней процессов совершенно иные. Вслед за этими процессами может происходить (если превышена величина $q_{кр}$) переход к пленочному кипению, о чем свидетельствует устойчивый (в течение $\approx 6 \text{ с}$) рост перегрева поверхности образца вплоть до величины $\Delta T \sim 100 \text{ К}$ (кривые 11 и 12).

ночному кипению, о чем свидетельствует устойчивый (в течение $\approx 6 \text{ с}$) рост перегрева поверхности образца вплоть до величины $\Delta T \sim 100 \text{ К}$ (кривые 11 и 12).

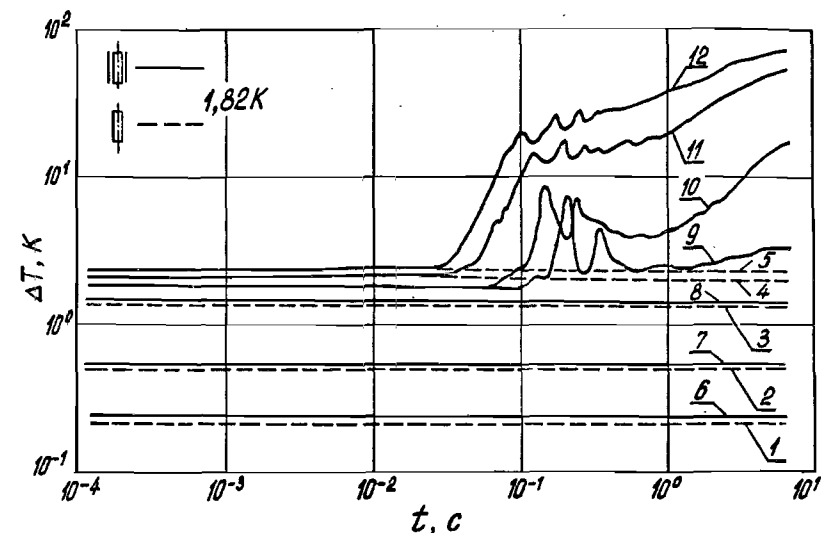


Рис.2. Зависимости $\Delta T(t)_W$ при вертикальной ориентации образца в свободных и стесненных условиях в гелии II. I - W = 0,08 Вт; 2 - 0,3 Вт; 3 - 2,4 Вт; 4 - 7,6 Вт; 5 - 9,8 Вт; 6 - 0,08 Вт; 7 - 0,32 Вт; 8 - 2,4 Вт; 9 - 4,5 Вт; 10 - 5,3 Вт; 11 - 7,8 Вт; 12 - 10 Вт.

Изменение ориентации находящегося в стесненных условиях образца с вертикальной на горизонтальную, с одной стороны, не влечет за собой коренного изменения общей картины нестационарной теплопередачи в HeII. Так, при горизонтальной ориентации тоже зарегистрированы ОП и переходы к пленочному кипению, причем величина пороговой мощности импульса, интервалы времен и нагрузок, в которых находится область переходов, совпадают с соответствующими величинами для вертикальной ориентации. Но, с другой стороны, в ходе кривых $\Delta T(t)_W$ имеются и отличия, которые прослеживаются на рис.3.

Из рис.3а видно, что в случае вертикальной ориентации в ОП можно идентифицировать два пика перегрева. Характеристики этих пиков - амплитуда A , полуширина G и момент наступления τ - монотонно изменяются с ростом нагрузки. Однако при горизонтальной ориентации отслеживаются уже три пика, причем зависимость их характеристик от нагрузки выражена слабее (рис.3б). Значения A , G , τ для раз-

личных нагрузок W приведены в таблице. Необходимо отметить, что воспроизводимость данных в области переходов практически полная.

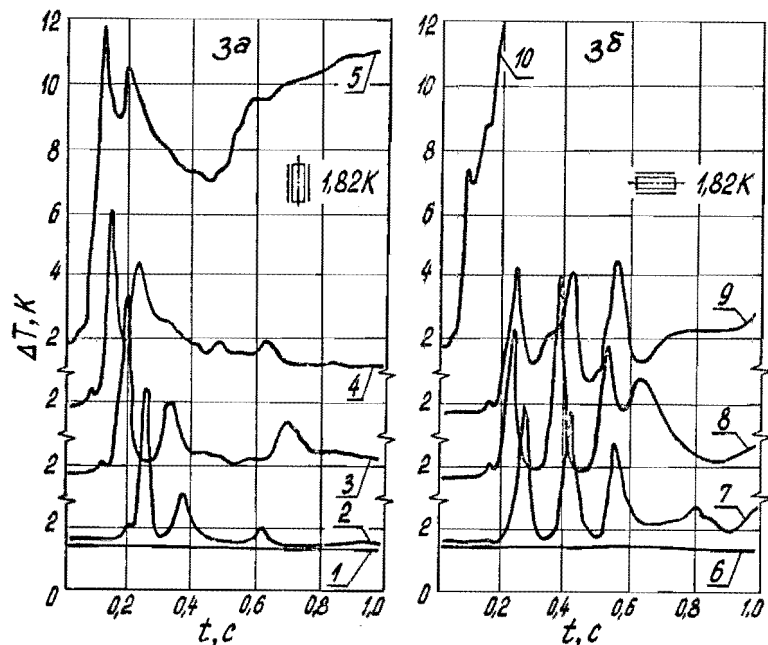


Рис. 3. Зависимости $\Delta T(t)_W$ в области переходов при вертикальной (а) и горизонтальной (б) ориентациях образца в стесненных условиях. 1 - $W = 3,1$ Вт; 2 - 3,9 Вт; 3 - 4,5 Вт; 4 - 5,3 Вт; 5 - 6,8 Вт; 6 - 3,1 Вт; 7 - 3,9 Вт; 8 - 4,2 Вт; 9 - 4,3 Вт; 10 - 6,6 Вт. (Для лучшей различимости кривых сделано смещение оси ординат от отметки 2,0).

Существование при стесненных условиях области переходов и характер происходящих в ней процессов можно объяснить следующим образом. Возникновение первого пика перегрева вызвано, вероятно, турбулизацией сверхтекучей компоненты $He II$ в кольцевом канале вокруг поверхности нагревателя-термометра. Это подтверждается неплохим согласованием моментов наступления τ первых пиков со временем вихреобразования $t_{вх}$ в $He II$, рассчитанными по соотношению [5]

$$t_{вх} = C(T) q^{-3/2}, \quad (2)$$

где $C(T)$ - эмпирическая константа, которая зависит от геометрии канала и температуры гелия T и имеет величину порядка $0,1 \text{ Вт}^{3/2} \cdot \text{см}^{-3}$. В этом смысле пороговая тепловая нагрузка $\approx 3,1$ Вт (линии 1 и 6) отвечает стационарному критическому потоку вихреобразования $q_{вх}$. Отметим, что полученное значение $q_{вх}$ примерно на порядок превышает величину $10+100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ стационарного критического потока вихреобразования, известную для длинных узких каналов [1,4].

Таблица. Характеристики пиков перегревов при различных ориентациях и тепловых нагрузках

Ориентация	W , Вт	1-й пик			2-й пик			3-й пик		
		τ , мс	A , К	G , мс	τ , мс	A , К	G , мс	τ , мс	A , К	G , мс
вертикальная	3,9	260	4,00	40	370	1,50	45	-	-	-
	4,5	195	5,20	30	330	1,90	60	-	-	-
	5,3	145	4,60	40	235	3,10	55	-	-	-
горизонтальная	3,9	265	4,35	35	415	4,00	45	555	3,10	45
	4,2	230	4,40	40	380	6,10	30	530	4,00	40
	4,3	240	3,90	50	420	4,00	65	545	4,15	75

Вслед за этим турбулизированный слой гелия быстро прогревается, что может привести к фазовому переходу метастабильный жидкий гелий II \rightarrow метастабильный жидкий гелий I \neq I/2 с последующим фазовым переходом $He I \rightarrow$ пар He . По всей видимости, этими процессами вызвано образование второго пика перегрева.

Что касается третьего пика, то, поскольку его наличие или отсутствие зависит от ориентации образца, ответственным за него механизмом может быть гидродинамика взаимодействия образовавшегося в кольцевом канале $He I$ с окружающим объемом $He II$.

Таким образом, первый пик перегрева связан, вероятно, с переходом $He II \rightarrow He I$ по квантовым причинам. Второй - с переходом $He II \rightarrow He I$ по термодинамическим причинам. Третий - с динамикой удаления образовавшегося $He I$ из кольцевого канала. Вследствие этих

* Фазовый переход $He II \rightarrow He I$ происходит в метастабильной области, т.к. давление у поверхности НТ (с учетом гидростатики) составляет около 2140 Па, что существенно ниже $P_d = 5036$ Па.

процессов, по всей видимости, и происходит ускоренный (по сравнению со случаем свободных условий) переход к пленочному кипению.

В настоящее время разрабатываются методики экспериментальной проверки предложенной интерпретации исследованных процессов.

В заключение авторы выражают признательность В.Ф.Минашкину и С.Ю.Селюнину за помощь в настройке электронной аппаратуры и участие в проведении ряда экспериментов, а также В.В.Данилову за полезные обсуждения.

Литература

1. Немировский С.К. - ИФЖ, 1982, т.43, с. 676.
2. Seyfert P. - In: Proc. ICSC9. Guildford, 1982, p. 263-268.
3. Van Sciver S.W. - Adv. Cryog. Engng., 1982, v. 27, p. 375.
4. Паттерман С. Гидродинамика сверхтекучей жидкости. М.: Мир, 1978.
5. Vinen V.F. - Progr. Low Temp. Phys., 1961, v. 3, p. 1.
6. Айри П. - В кн.: Теплопередача при низких температурах. М.: Мир, 1977, с. 346-380.
7. Snyder N.S. - Cryogenics, 1970, v. 10, p. 89.
8. Микляев В.М. и др. Препринт ОИЯИ Р8-86-583. Дубна, 1986.
9. Katerberg J.A., Anderson A.C. - J. Low Temp. Phys., 1981, v. 42, p. 165.
10. Kobayashi H., Yasukochi K. - Adv. Cryog. Engng., 1980, v. 25, p. 372.
11. Немировский С.К. - ФНТ, 1966, т.12, с. 756.
12. Frederking T.H.K. - Chem. Engng. Progr. Symp. Series, 1968, v. 64, p. 21.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 января 1987 года.

Микляев В.М., Сергеев И.А., Филиппов Ю.П.
Особенности нестационарной теплопередачи
к сверхтекучему гелию

Р8-87-33

Представлены результаты экспериментального исследования теплопередачи от цилиндрического образца к объему сверхтекучего гелия в условиях ступенчатого наброса мощности. Выявлены и обсуждены особенности He II как криоагента в сравнении с He I: относительно малое время установления стационарных режимов отвода тепла и сравнительно большое время наступления кризиса. В определенных условиях получены качественно новые данные: область переходов, характеризующаяся пиками перегрева теплоотдающей поверхности, и следующее за ней ускоренное наступление кризиса. Проведено обсуждение механизма зарегистрированных процессов: рассмотрены турбулизация сверхтекучей компоненты, фазовые переходы He II \rightarrow He I, He I \rightarrow пар He, взаимодействие образовавшейся фазы He I и объема He II.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Miklyaev V.M., Sergeyev I.A., Filippov Yu.P.

Р8-87-33

The Peculiarities of Transient Heat Transfer In Superfluid Helium

The experimental results of investigation of heat transfer from cylindrical sample into volume of superfluid helium under step power input conditions are presented. In comparison with He I the He II peculiarities are enlisted and discussed: comparatively short time of stationary heat transfer rate establishment and comparatively long time of crisis reaching. Under certain conditions the qualitatively new data are obtained: the region of transitions, which include the peaks of heat transfer surface superheating and the following crisis rapid reaching. The mechanism of processes registered is discussed: superfluid turbulence, the phase transitions He II \rightarrow He I, He I \rightarrow vapour He as well, the interaction between the arisen He I phase and He II volume.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987