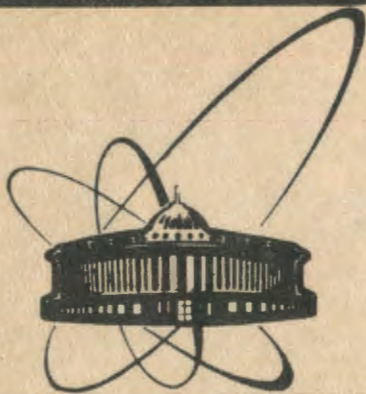


91-26



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

P8-91-26

А.И.Алексеев, В.М.Микляев, А.В.Скрыпник,
Ю.П.Филиппов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ
К ВЫНУЖДЕННЫМ ПОТОКАМ ГЕЛИЯ

1991

1. ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение сверхпроводящих (СП) систем, криостатируемых гелием, обусловило необходимость исследования теплофизических процессов, влияющих на динамику возникновения и распространения нормальной зоны в СП-материале. К таким процессам относятся, например, термоконвекция однофазного криоагента, расслоение двухфазного потока, локальный разогрев СП-обмотки. Эти процессы исследуются как при полномасштабных экспериментах, так и путем экспериментального или компьютерного моделирования^{1/1}. Большое влияние на процессы разогрева обмотки и, следовательно, возникновения и распространения нормальной зоны оказывает динамика нестационарной теплоотдачи к криоагенту.

В настоящее время имеется довольно обширный материал по нестационарной теплопередаче к гелию в большом объеме, например,^{2-4/}. Ведутся исследования, ориентированные на системы с охлаждением вынужденными потоками криоагента^{5-6/}. Становится существенным интерес к СП-системам, в которых криостабилизация СП-обмоток обеспечивается двухфазным гелием^{7-8/}, однако экспериментальные данные по теплопередаче в условиях вынужденного движения этих потоков весьма ограничены, например,^{9-10/}.

В настоящей работе приведена довольно подробная информация об экспериментальном оборудовании, используемом для изучения нестационарной и стационарной теплопередачи к одно- и двухфазным потокам гелия. Горизонтальная ориентация охлаждаемых каналов и кольцевая форма их поперечных сечений обусловлены стремлением максимально приблизиться к условиям реальных конструкций.

В состав экспериментального оборудования входят: малоинерционные тепловыделяющие элементы (ТВЭ), электронное оборудование для импульсного нагрева ТВЭ и динамического измерения температур, проточные криостаты, система циркуляции гелия.

2. ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТЕРМОМЕТРИЯ

2.1. Выбор методики измерения температур

Суть эксперимента по нестационарной теплопередаче при импульсном нагреве поясняется рис.1, где приведены зависимости мощности тепло-

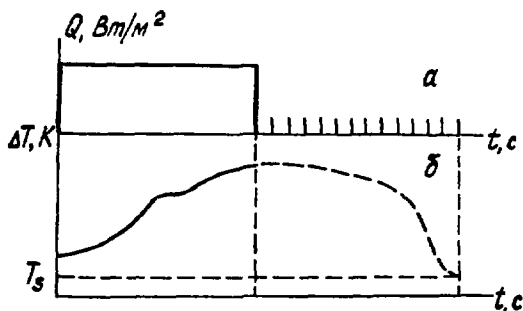


Рис.1. Характеристики импульса мощности $Q(t)$ и пробных импульсов для режима релаксации (а); динамика изменения перегрева поверхности $\Delta T(t)$ относительно температуры T_s криоагента (б).

выделения и изменения температуры поверхности объекта в среде криоагента от времени. Для

таких экспериментов необходимы ТВЭ и термодатчики, которые отличаются относительно низкой тепловой инерционностью и сравнительно высокой чувствительностью. Известны различные решения этой задачи, удовлетворяющие условиям тех или иных конкретных экспериментов.

Например, в работах^{1,3,9} используют отдельные схемы питания ТВЭ и измерения температуры. В этом случае роль ТВЭ играет электропроводящая поверхность (металлическая трубка или пластина), а роль измерителя температуры — термопара (или термодатчик), укрепленная на ТВЭ. В таких схемах применяется серийное электронное оборудование для питания ТВЭ, однако типичные недостатки термопар приводят к довольно высокой погрешности определения температуры поверхности, особенно в нестационарном случае.

Другие авторы^{2,4,6} применяют так называемые совмещенные схемы, когда ТВЭ одновременно служит и термодатчиком. Практически это реализуется либо в виде проволочек малого (~ 60 мкм) диаметра, либо электропроводящих пленок на подложках. Такие нагреватели-термометры (НТ) отличаются как малой тепловой инерционностью, так и способностью точно измерять температуру поверхности. Однако при использовании НТ требуется специальное электронное оборудование, ориентированное на конкретную быстро изменяющуюся величину сопротивления $R(T)$. Кроме того, необходимо обеспечить стабилизацию мощности джоулеа тепловыделения во времени.

В ряде случаев второй путь представляется предпочтительным, и наш выбор остановлен на нем. Предварительные исследования и опыт других исследователей^{2,6} показали, что в качестве подходящего материала для нагревателя-термометра может быть выбран углерод в виде тонкой пленки.

Для исследования тепловых процессов на гелиевом температурном уровне пленки должны удовлетворять следующим основным требованиям:

— толщина не более $2\div 3$ мкм, что обусловлено, во-первых, допустимым перепадом температур (менее $5 \cdot 10^{-3}$ К) по толщине пленки, во-вторых, тепловой инерцией ($\epsilon < 10^{-8}$ с) слоя как термодатчика нестационарных температур ;

— чувствительность при $T \cong 4\div 5$ К не хуже 200 Ом/К;

— относительно медленный темп старения после многократного термоциклирования в диапазоне $4\div 300$ К;

— согласованность сопротивления R в рабочем диапазоне температур с максимально допустимым напряжением — около 200 В — усилителя мощности, что обусловлено прочностью на электрический пробой миниатюрных разъемов и соображениями безопасности;

— соблюдение условий автономности исследуемого процесса.

2.2. Тепловыделяющие элементы (ТВЭ)

В соответствии с перечисленными требованиями была разработана технология нанесения пленочных покрытий из углерода и изготовлены экспериментальные образцы трех типов, показанные на рис.2. В качестве подложки служила керамическая трубка* диаметром 11,1 мм. Образец первого типа (рис.2-1) предназначен для экспериментов в условиях

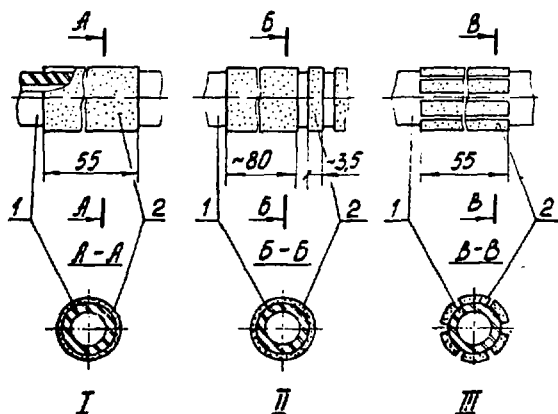


Рис.2. Экспериментальные образцы. 1 — керамическая трубка ;
2 — углеродные плечки (размеры в мм).

* Состав этой трубки следующий: 94,5% Al_2O_3 , 2% TiO_2 , 2% MnO_2 , 1% Fe_2O_3/Fe_3O_4 ; Mg, Ca, SiO_2 — 0,5%.

так называемого большого объема. Два других (рис.2-11 и 2-111) — для исследований при вынужденном движении гелия. В зависимости от требований эксперимента покрытия выполнены различно: первый тип (рис.2-1) — в виде одиночного цилиндрического пояска длиной 55 мм; второй (рис.2-11) — в виде чередующихся цилиндрических поясков (длины ≈ 80 мм и $\approx 3,5$ мм, количество — 12 шт.); третий (рис.2-111) — в виде параллельных оси сегментных полосок (длина 55 мм, количество — 6 шт.).

Учитывая сходство образцов и технологии их изготовления, ограничимся детальным описанием только одного из них — образца третьего типа.

Технология изготовления углеродных пленок основана на методе вакуумного напыления углерода с помощью электронно-ионного испарения¹¹³. Под действием бомбардировки электронами углерод сублимируется, и частично ионизированный поток пара углерода конденсируется на равномерно-вращаемой керамической трубке при температуре около 300°C . В качестве испаряемого материала использовался реакторный графит. Вакуум в процессе напыления составлял $\sim 10^{-6}$ Торр, мощность испарителя ~ 10 кВт. Напыление углерода производилось на керамическую трубку через металлические маски. Толщину углеродного слоя, напыленного на керамическую трубку, измеряли с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4. Для этого одновременно напыляли пленку на стекле-"спутнике", которое использовалось для измерений. Требуемая толщина пленки ~ 1 мкм была гарантирована контролем сопротивления нарастающего углеродного слоя в процессе напыления с учетом термической поправки.

Исследование структуры углеродных пленок, отделенных от стеклянных подложек, было проведено с использованием электронного трансмиссионного микроскопа JEM-7. Диффузный характер полученных электронограмм свидетельствует о том, что пленки углерода полностью аморфны. По предварительным замерам на стекле-"спутнике" неравномерность толщины пленки по длине и диаметру была соответственно не хуже 5% и 2% от номинала. Можно предположить, что неравномерность удельной электропроводности по длине и диаметру такого же порядка, как и неравномерность по толщине.

Диапазон изменения сопротивления углеродного покрытия от температуры ($\sim 1\div 6$ кОм) был подобран так, чтобы, во-первых, обеспечить устойчивый режим работы усилителя мощности, входящего в состав электронной аппаратуры, во-вторых, обеспечить относительно широкий диапазон удельных тепловыделений с НТ ($\sim 50\div 10^5$ Вт/м²).

2.3. Градуировка ТВЭ

Градуировка углеродных пленок проводилась как по давлению насыщенных паров гелия (в диапазоне $4,2 \div 5$ К), так и по показаниям германиевых термометров (в диапазоне $5 \div 20$ К). Величина сопротивления определялась по четырехпроводной схеме на постоянном токе 1 и 10 мкА. При таких токах в пленках рассеивается мощность порядка нановатт, что не вызывает обнаруживаемого перегрева в них по отношению к температуре объема. Типичные температурные зависимости $R(T)$ углеродных пленок приведены на рис.3. В частности, зависимость $R(T)$ углеродных пленок третьего типа показывает приемлемость такой характеристики для работы в сверхтекучем гелии, $T < 2,17$ К.

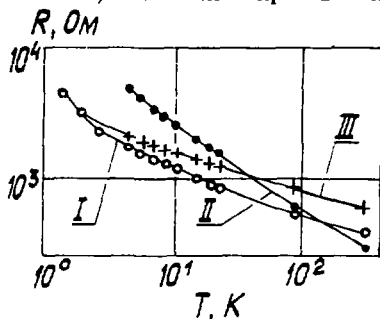


Рис.3. Температурные зависимости сопротивления R углеродных пленок от температуры T . I, II, III — образцы первого, второго и третьего типов в соответствии с рис.2.

3. ЭЛЕКТРОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Общая схема электронного оборудования показана на рис.4. Оно выполнено в стандарте КАМАК и предназначено для проведения экспериментов на линии с ЭВМ. Измерительная система включает 6 автономных усилителей мощности, обеспечивающих плотность теплового потока в импульсе до 10^5 Вт/м², 8-канальный 12-разрядный АЦП с минималь-

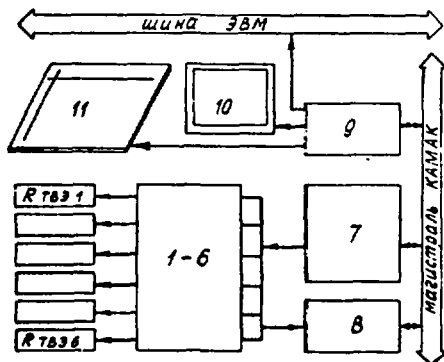


Рис.4. Схема электронного оборудования. 1-6 — усилители мощности, 7 — управляющие блоки, 8 — измерительные блоки, 9 — интерфейсы, 10 — монитор, 11 — графопостроитель, ТВЭ — тепловыделяющие элементы.

ным временем разрешения 30 мкс и буферной памятью объемом 8К на один канал. Особенность усилителя мощности состоит в обеспечении режима стабилизации мощности джоулева тепловыделения в ТВЭ (погрешность — 2÷4%). Как отмечалось, этот режим необходим в связи с тем, что величина сопротивления ТВЭ в рабочей области может изменяться от 6 до 1 кОм. Подробности приведены в ¹¹⁻¹².

4. ПРОТОЧНЫЕ КРИОСТАТЫ

Для проведения экспериментов по нестационарной теплопередаче к вынужденным потокам гелия тепловыделяющие элементы помещались в проточные криостаты горизонтальной ориентации. В одном из таких криостатов, схематично изображенном на рис.6, размещен шестиканальный секционированный ТВЭ (СТВЭ), показанный на рис.2-III и рис.5.

Углеродные пленки 2 СТВЭ (рис.5) подключены к измерительной аппаратуре с помощью электрических выводов 5, припаянных к контактным серебряным площадкам 3 в точках 4. При этом используются отверстия 6 в трубке и герморазъем 7. Керамическая трубка 1 соединена с центрирующими вставками из ковара 8 и 9 посредством эпоксидного клея и впаянного герморазъема 7, что обеспечивает вакуум внутри нее при гелиевых температурах. Для измерения температуры потока гелия с обеих сторон СТВЭ на верхней и нижней образующих установлены малогабаритные 1x1x1 мм германиевые термодатчики 10, смонтированные в углублениях заподлицо с поверхностями центрирующих вставок. Это позволяет измерять температуры жидкой и газовой фаз расслоенных потоков.

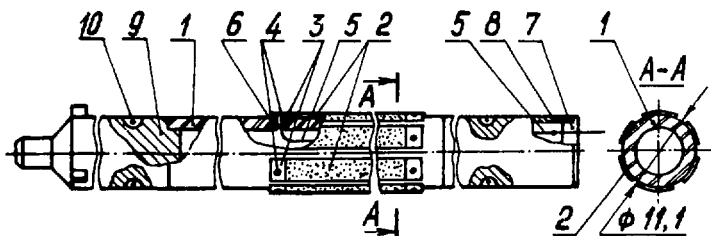


Рис.5. Секционированный тепловыделяющий элемент в сборе. 1 — керамическая трубка, 2 — углеродные пленки, 3 — контактные площадки, 4 — контакты, 5 — электрические выводы, 6 — отверстия, 7 — герморазъем; 8, 9 — центрирующие вставки, 10 — германиевые термодатчики.

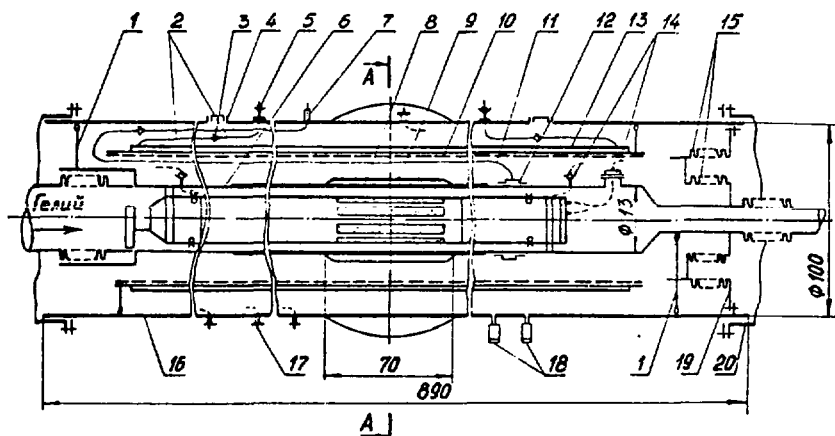


Рис.6. Схематичная конструкция проточного криостата для СТВЭ. 1 — центрирующая вставка; 2 — азотные трубки; 3 — разъемное соединение; 4 — люк; 5 — герметичный узел с тепловой развязкой; 6 — гелиевый канал; 7 — узел вывода импульсной трубки; 8 — труба из молибденового стекла; 9 — окно; 10 — промежуточный экран; 11 — импульсная трубка; 12 — камера отбора давления; 13 — азотный экран; 14, 17 — герметичные разъемы на гелиевом канале и вакуумном корпусе соответственно; 15 — тепловой мост; 16 — вакуумный корпус; 18 — средства измерения вакуума; 19 — узел уплотнения; 20 — вакуумная муфта. (Сечение А-А см. на рис.7).

В криостате, показанном на рис.6, СТВЭ размещен коаксиально внутри трубы 8 из молибденового стекла, позволяющего регистрировать структуру двухфазного потока. В этом случае для вынужденного потока образуется канал кольцевого сечения. Величина кольцевого зазора δ может меняться. Углеродные пленки расположены в канале на расстояниях $\sim 160\delta$ и $\sim 60\delta$ от входа и выхода соответственно, что обеспечивает гидродинамически стабилизированный поток гелия. Электрические провода СТВЭ и термодатчиков выведены к измерительной аппаратуре через герметичные разъемы 14, 17 соответственно на гелиевом канале и вакуумном корпусе. Для измерения давления потока предусмотрена камера отбора давления 12, соединенная с преобразователем давления "Сапфир-22" (на рис.6 не показан) посредством тонкостенной импульсной трубки 11 и узла ее вывода 7. Гелиевый канал 6 и азотный экран 13 установлены коаксиально в вакуумном корпусе 16 с помощью центрирующих вставок 1. Внутри азотного экрана размещен промежуточный

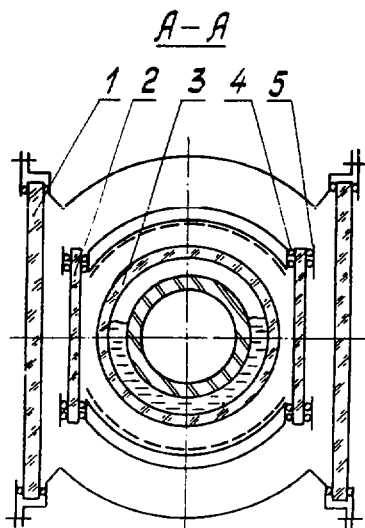


Рис.7. Конструкция иллюминатора для визуализации процессов в гелиевом канале. 1,2 — стекла; 3 — трубка из молибденового стекла; 4 — индиевые прокладки; 5 — пластина.

экран 10 из листовой полированной меди. Он имеет только точечные контакты с азотным экраном. Азот подается на экран через герметичный узел с тепловой развязкой 5 на вакуумном корпусе, разъемное соединение 3 и азотные трубки 2, монтаж которых производится из люков 4. Криостат снабжен средствами измерения вакуума 18, имеет автономный вакуумный объем, который образован узлом уплотнения 19 с тепловым мостом 15 и вакуумными муфтами 20.

Для визуализации структуры двухфазных потоков гелиевый канал (см. рис.7) сделан из стеклянной трубки 3 (молибденовое стекло). Наблюдение осуществляется через иллюминаторы 1 и 2 на вакуумном корпусе и азотном экране. Отметим, что стекла 2 выполняют функции как оптических окон, так и радиационных экранов. Надежный тепловой контакт пары стекло-металл (12Х18Н10Т) обеспечивают индиевые прокладки 4 диаметром менее 1 мм, прижимаемые к азотному экрану пластинами 5.

В другом проточном криостате размещен тепловыделяющий элемент, показанный на рис.2-11. Оба криостата во многом аналогичны, однако второй не содержит участка для наблюдения за структурой потока.

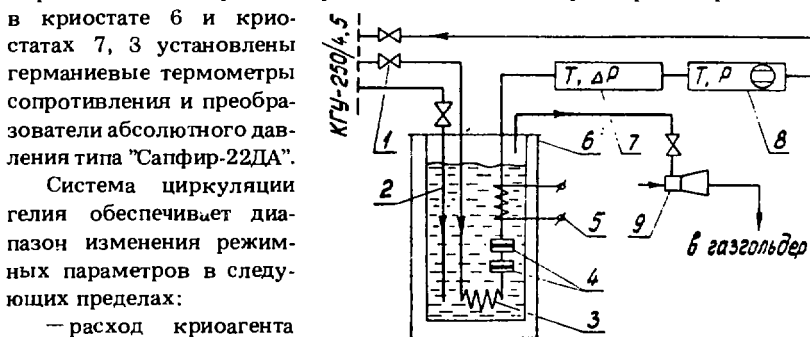
В заключение раздела отметим, что рассмотренные проточные криостаты и тепловыделяющие элементы позволяют исследовать динамику нестационарной теплопередачи как по длине, так и по образующей канала, обеспечивая визуализацию гидродинамических процессов. При этом удовлетворяются следующие требования:

- обеспечение условий гидродинамического подобия;
- обеспечение надежности контакта пленок с электрическими выводами в условиях "термоударов";
- отсутствие возмущений потока гелия на измерительном участке;
- устранение трудно учитываемого конвективного теплообмена;

— реализация гидродинамически стабилизированного потока гелия в зоне углеродных пленок.

5. СИСТЕМА ЦИРКУЛЯЦИИ ГЕЛИЯ

Проточные криостаты смонтированы в криогенном стенде, схема которого приведена на рис.8. Прямой поток гелия из установки КГУ-250/4,5 проходит регулирующий вентиль 1, теплообменник 3 в криостате 6, последовательно соединенные проточные криостаты 7, 8 и возвращается в КГУ. За счет разности давлений в криостате 6 и теплообменнике 3 поток гелия охлаждается до состояния недогретой жидкости. При необходимости создать разрежение в криостате 6 включается эжектор 9. В криостате также установлены диафрагмы 4 для измерения расхода и формирователь входного паросодержания 5. Наполнение криостата гелием осуществляется через магистраль 2 из сборника КГУ. Для измерения и контроля термодинамических параметров криоагента в криостате 6 и криостатах 7, 8 установлены германиевые термометры сопротивления и преобразователи абсолютного давления типа "Сапфир-22ДА".



Система циркуляции гелия обеспечивает диапазон изменения режимных параметров в следующих пределах:

- расход криоагента $(0,3 \div 13) \cdot 10^{-3}$ кг/с;
- относительная энтальпия потока (расходное массовое паросодержание) $0,15 \div 1$;
- давление ≥ 120 кПа.

Рис.8. Схема криогенного стенда. 1 — регулирующий вентиль; 2 — магистраль пополнения гелием; 3 — теплообменник; 4 — расходомерные диафрагмы; 5 — формирователь входного паросодержания; 6 — криостат; 7, 8 — проточные криостаты; 9 — эжектор.

6. ХАРАКТЕРНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанное оборудование использовалось для исследования нестационарных теплофизических процессов в одно- и двухфазных потоках гелия^{110/}.

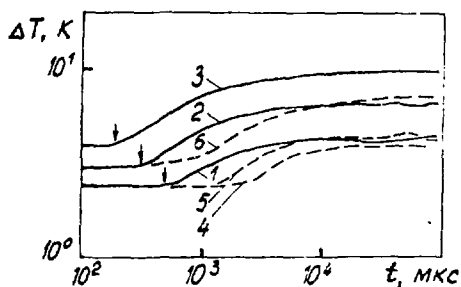


Рис.9. Зависимости перегрева ΔT от времени t при дисперсно-кольцевом режиме течения (кривые 1-3) и гомогенизированном распределении фаз (4-6) ($P = 0,13$ МПа, $m = 120$ кг/м²с): 1 - $q = 6,9 \times 10^3$ Вт/м², $x = 0,8$; 2 - $1,31 \times 10^4$ и $0,8$; 3 - $2,13 \times 10^4$ и $0,8$; 4 - $6,9 \times 10^3$ и $0,3$; 5 - $6,9 \times 10^3$ и $0,5$; 6 - $q = 1,31 \times 10^4$ Вт/м², $x = 0,3$.

В качестве примера на рис.9 приведены зависимости перегрева теплоотдающей поверхности ΔT цилиндрического образца (рис.2-11) от времени t после подачи теплового импульса при различных значениях массовой скорости m и относительной энтальпии x . Форма импульса — ступенчатая, длительность переднего фронта ~ 20 мкс. Из рис.9 видно, что структура двухфазного потока существенно влияет на динамику и интенсивность нестационарной теплопередачи к гелию. Так, при дисперсно-кольцевом режиме (кривые 1-3) четко фиксируется время перехода к кризису (отмечено стрелками ↓), что объясняется динамикой высыхания пленки на теплоотдающей поверхности. В условиях гомогенизированного распределения фаз (кривые 4-6) зависимости $\Delta T(t)$ не имеют характерных изломов, которые можно было бы интерпретировать как качественное изменение механизма теплопередачи. Как показано в [10], начальный процесс нестационарного кипения при этих режимах автомоделен относительно переменных $[T(t) - T_0] / (1 - x); q / \sqrt{T(1 - x)}$. В экспериментах при расслоенном течении обнаружено [10], что на верхней образующей нагревателя возможно образование пленки жидкости, интенсифицирующей теплоотдачу в начальные моменты.

В заключение авторы выражают благодарность Н.И.Балалыкину за содействие в работах по тонкопленочной технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Funaki K. et al. — Cryogenics, 1985, v.25, No.3, p.139.
2. Steward W.G. — Int. J. Heat and Mass Transfer, 1978, v.21, No.7, p.863.
3. Grigoriev V.A. et al. — Cryogenics, 1985, v.25, p.81.
4. Ito T., Kubota H., Uesone M. — Proc. 11th Int. Cryog. Engng. Conf., West Berlin, 1986.
5. Steward W.G. — Helium Transient Heat Transfer. Part. Two. NBS IR-78, Oct., 1, 1977.

6. Джирратано П.Дж., Стюард В.Дж. — Теплопередача, 1983, т.105, № 2, с.129.
7. Green M.A., Burns W.A., Taylor J.D. — Advances in Cryogenic Engineering, 1980, v.25, p.420.
8. Forster S. et al. — Proc. Ninth Magnetic Technology Conf. Zurich, 1985, p.32.
9. Павлов Ю.М., Антипов В.И., Романов В.И. — Труды МЭИ, М., вып.478, 1980, с.73.
10. Алексеев А.И., Микляев В.М., Филиппов Ю.П. — ИФЖ, 1990, т.58, № 6, с.885.
11. Минашкин В.Ф. и др. — Сообщение ОИЯИ, P10-88-902, Дубна, 1988.
12. Минашкин В.Ф. — Сообщение ОИЯИ, P10-89-547, Дубна, 1989.
13. Технология тонких пленок. Справочник. М.: Радио, 1977.

**Рукопись поступила в издательский отдел
16 января 1991 года.**