

УДК 536.248

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛОТДАЧИ К ВОДЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ ТЕПЛОПОДВОДЕ

Б.П. АВКСЕНТЮК, В.В. ОВЧИННИКОВ

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Проведены экспериментальные исследования кризисов теплообмена в воде при ступенчатом подводе тепловой нагрузки на поверхность нагрева, обедненной центрами парообразования. Рабочим участком служила трубка из нержавеющей стали. Перегревы перед вскипанием превышают пороговые значения, когда появляются фронты испарения, но имеют значения меньше тех, при которых возникает третий кризис теплообмена в условиях естественной конвекции. Распад метастабильной пристенной жидкости происходит в виде фронтов испарения, распространяющихся вдоль теплоотдающей поверхности. При этом минимальный критический тепловой поток при нестационарном тепловыделении оказался близким к значению первого критического теплового потока.

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных изучению кризиса теплоотдачи при нестационарном тепловыделении. Исследования показали, что для большинства жидкостей значения минимальных критических тепловых потоков при ступенчатом подводе тепловой нагрузки q_{cr}^{\min} могут быть существенно ниже значений первого критического теплового потока q_{cr1} при стационарном тепловыделении (особенно при низких давлениях). С увеличением давления значения q_{cr}^{\min} приближаются к q_{cr1} . Исключение составляют лишь вода и гелий-1 [1 – 4]. Для этих жидкостей при ступенчатом тепловыделении во всем исследованном диапазоне давлений значения q_{cr}^{\min} совпадают с q_{cr1} . Отличительной особенностью воды и гелия-1 являются низкие перегревы поверхности нагрева перед активацией центров парообразования.

Исследования динамики парообразования [5 – 8] показали, что при перегревах жидкости выше пороговых значений пузырьковая структура неустойчива. На поверхности пузыря формируются фронты испарения, которые распространяются в метастабильной жидкости с постоянной во времени скоростью. Для воды, в отличие от органических жидкостей, трудно достигнуть такого перегрева перед вскипанием, который бы превышал пороговые значения. Для этого необходимо, чтобы поверхность нагрева была обеднена центрами парообразования. В опытах с водой при субатмосферных давлениях в условиях квазистационарного нагрева рабочего участка [9] были достигнуты перегревы, при которых наблюдались фронты испарения. Пороговое значение перегрева ΔT_* составило 50 К. Перегревы, достигнутые в этом исследовании, не превысили 75 К, что меньше минимального перегрева ΔT_{cr3}^{\min} , выше которого возникает третий кризис кипения — установление пленочного режима кипения после однофазной конвекции, минуя режим

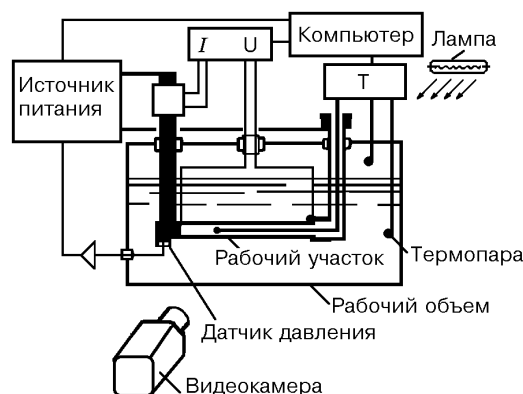


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

пузырькового кипения [5, 10]. Расчетное значение ΔT_{cr3}^{\min} по кавитационной модели [10] для воды при давлении $2 \cdot 10^3$ кПа составляет 105 К.

Цель настоящей работы — исследование кризиса теплоотдачи к воде при ступенчатом подводе тепла к поверхности нагрева, обедненной центрами паро-

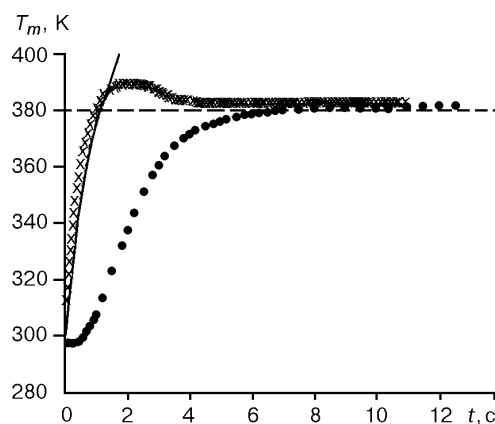
образования, когда распад метастабильной пристенной жидкости происходит в виде фронтов испарения, распространяющихся вдоль теплоотдающей поверхности. Эксперименты с дистиллированной водой проводились в условиях большого объема спокойной жидкости. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В качестве рабочего участка использовалась трубка из нержавеющей стали с наружным диаметром 2,5 мм, толщиной стенки 0,5 мм и рабочей длиной 82 мм. Внутри трубки размещалась термопара, которая применялась при определении в стационарных условиях зависимости электросопротивления рабочего участка от температуры. Рабочий участок располагался горизонтально; уровень жидкости над ним составлял 60 мм. Для измерения времени ожидания вскипания жидкости при ступенчатом тепловыделении применялся пьезоэлектрический датчик давления, крепленный к токоподводу рабочего участка. По возникающему в нем сигналу регистрировалось начало парообразования в воде.

Нагрев осуществлялся пропусканием переменного электрического тока (частота 50 Гц) непосредственно через рабочий участок от вторичной обмотки силового трансформатора ОСУ-20, напряжение на первичной цепи которого изменялось с помощью регулятора напряжения РНО-10. Подача и отключение электрической мощности на рабочем участке осуществлялись с помощью специальной электрической схемы, управляемой сигналами от датчиков, расположенных в рабочем объеме.

Перед подачей ступенчатой мощности измерялись температуры жидкости и пара в рабочем объеме. В нестационарном режиме измерения осуществлялись с помощью программируемого процессора МС1610, управляющего работой 10-разрядного коммутатора — АЦП с временным разрешением 10 мкс. В экспериментах регистрировали напряжение на рабочем участке и ток. По значениям этих параметров рассчитывалось электрическое сопротивление, а затем, используя температурную зависимость сопротивления, определялась средняя температура рабочего участка T_m .

Рис. 2. Температура рабочего участка при ступенчатом тепловыделении ($q = 187$ кВт/м²).

Измерения: × — по электрическому сопротивлению, • — термопарой; расчет: сплошная линия — для нестационарной теплопроводности, штриховая — для стационарной естественной конвекции.



Время от подачи мощности на рабочий участок до вскипания измерялось электронным таймером. Для избежания пережога рабочего участка из-за возникновения кризиса теплоотдачи отключение обогрева этого участка происходило не позднее чем через 0,4 с после начала вскипания. Съемка исследуемых процессов проводилась видеокамерой М7 с интервалом между кадрами 20 мс и экспозицией кадра 1 мс. Временные параметры видеокамеры контролировались съемкой цифрового табло электронного таймера с индикацией до 0,1 мс.

Для проверки методики определения температуры рабочего участка по его электрическому сопротивлению были проведены специальные опыты. На рис. 2 показаны результаты одного из них. Давление в рабочем объеме равнялось атмосферному, температура воды составляла 296 К. На рабочий участок ступенькой подавалась мощность 288 Вт, при которой парообразование на теплоотдающей поверхности не происходило. В течение 1,3 с теплосъем осуществлялся в режиме нестационарной теплопроводности. Затем устанавливался стационарный режим естественной конвекции. Из рисунка видно, что в стационарном режиме естественной конвекции значения температуры, найденные по электрическому сопротивлению, близки к измеренным термомпарой.

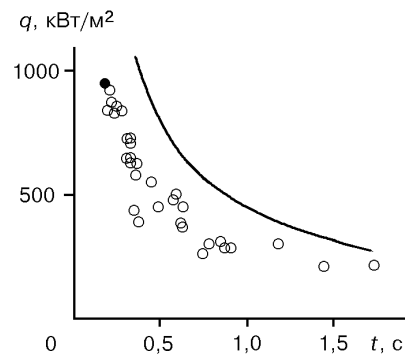
Исследования кризисов теплообмена в азоте и органических жидкостях при нестационарном тепловыделении [11 – 13] показали, что парообразование на нагревателе происходит в виде фронтов испарения, распространяющихся вдоль теплоотдающей поверхности. В этом случае значения минимальных критических тепловых потоков были ниже, чем при квазистационарном нагреве. Для воды и гелия-1 возникновению кризиса всегда предшествовал пузырьковый режим кипения [14] и перегрев перед вскипанием ΔT_b не достигал пороговых значений, выше которых пузырьковая структура становится неустойчивой, и значения q_{cr}^{\min} совпадают с q_{cr1} . В связи с этим возникает вопрос — окажет ли изменение структуры парообразования влияние на значения минимальных критических тепловых потоков при нестационарном нагреве для воды?

Опыты проводились при температуре воды в рабочем объеме 288 – 292 К под давлением собственных паров. Температура насыщения у теплоотдающей поверхности определялась с учетом веса столба жидкости. Недогрев жидкости до температуры насыщения составлял 4 – 5 К. Обычной “приработки” рабочего участка (кипячения жидкости в течение часа и более) не проводилось во избежание образования на теплоотдающей поверхности устойчивых центров парообразования. Исследования при нестационарном тепловыделении проводились лишь после того, как в условиях квазистационарного нагрева путем дегазации жидкости и теплоотдающей поверхности были достигнуты перегревы перед вскипанием, превышающие пороговое значение, когда распад метастабильной пристенной жидкости происходит в виде фронтов испарения.

На рис. 3 приведена зависимость времени ожидания вскипания воды t от “набрасываемой” плотности теплового потока q . Видно, что с увеличением q значения t уменьшаются. Кривая описывает время развития свободной конвекции, рассчитанное из условия достижения критического значения критерия Рэлея ($Ra_{cr} = 1708$ [15]) в нарастающем тепловом слое. Возникновению паровой фазы предшествовал режим нестационарной теплопроводности.

Рис. 3. Зависимость времени ожидания вскипания воды от “набрасываемой” плотности теплового потока.

Линия — время развития конвекции, ● — кризис теплоотдачи, ○ — пузырьковое кипение.



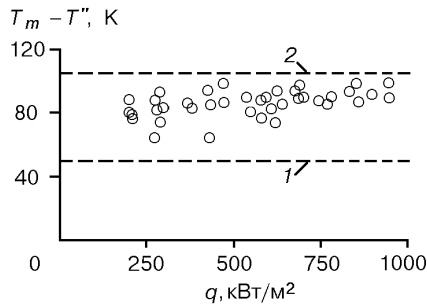


Рис. 4. Зависимость перегрева рабочего участка перед вскипанием воды от “набрасываемой” плотности теплового потока.
1 — ΔT_* , 2 — ΔT_{cr3}^{\min} .

Данные по перегреву рабочего участка относительно температуры насыщения перед вскипанием в зависимости от “набрасываемой” плотности теплового потока приведены на рис. 4 (T'' — температура насыщения). Видно, что увеличение “набрасываемой” мощности не привело к существенному росту перегрева перед вскипанием. Кривая 1 соответствует пороговому значению перегрева, выше которого формируются фронты испарения, 2 — минимальное значение перегрева, выше которого вскипание приводит к возникновению третьего кризиса теплоотдачи, минуя режим пузырькового кипения. Все экспериментальные данные расположены в области между линиями 1 и 2.

Видеосъемка позволила проследить динамику парообразования при ступенчатом тепловыделении. На рис. 5 приведены характерные кадры видеосъемки при различных значениях плотности теплового потока (вплоть до критической). На фотографиях светлый фон — жидкость, горизонтальная темная полоса — рабочий участок. Здесь же для каждого кадра указано время от начала вскипания. Соответствующие этим опытам значения средней температуры рабочего участка в зависимости от времени показаны на рис. 6.

При вскипании на теплоотдающей поверхности обычно появлялся один паровой пузырь, у основания которого формировались фронты испарения. Чем выше был перегрев перед вскипанием, тем на более ранней стадии роста пузыря возникали фронты. Паровое образование распространялось на всю теплоотдающую поверхность; далее наблюдался рост парового образования с последующей стадией сжатия.

При низких значениях плотности теплового потока (меньше 500 кВт/м^2) остаточный микрослой жидкости на теплоотдающей поверхности, по-видимому, не успевал испариться. Поэтому после отрыва парового образования от рабочего участка либо устанавливался режим пузырькового кипения, либо парообразование прекращалось. В этом случае происходил разогрев рабочего участка в режиме однофазной конвекции (последний кадр на рис. 5, а, кривая 1 на рис. 6) и в стационарном режиме токоподвода на теплоотдающей поверхности устанавливался автоколебательный процесс [16] — периодическая смена процессов распада метастабильной жидкости в виде фронтов испарения и нагрева пристенной жидкости в режиме однофазной конвекции.

При $q > 500 \text{ кВт/м}^2$ после отрыва парового образования на поверхности нагрева наряду с паровыми пузырями наблюдались неустойчивые паровые пленки, возникшие, по-видимому, вследствие частичного испарения микрослоя жидкости. Чем выше была мощность тепловыделения, тем дольше становилось время существования паровых пленок. На рис. 5, б приведены кадры процесса парообразования при $q = 845 \text{ кВт/м}^2$. Паровая пленка разрушилась через 263 мс после начала вскипания. Несмотря на наличие неустойчивой паровой пленки на теплоотдающей поверхности, средняя температура рабочего участка интенсивно снижалась (кривая 2 на рис. 6).

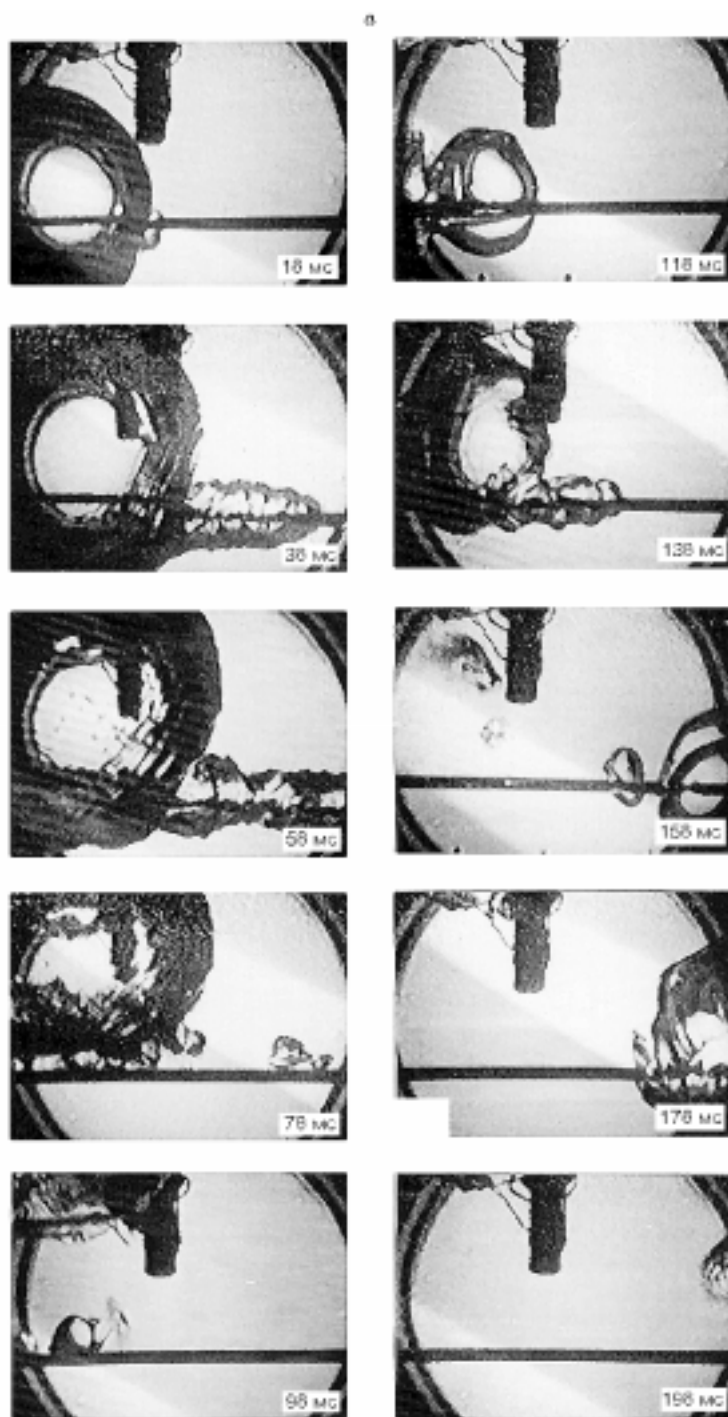


Рис. 5. Фотографии процесса парообразования в воде при $q = 436,2 \text{ кВт/м}^2$ (a), 845 кВт/м^2 (b), 949 кВт/м^2 (c).

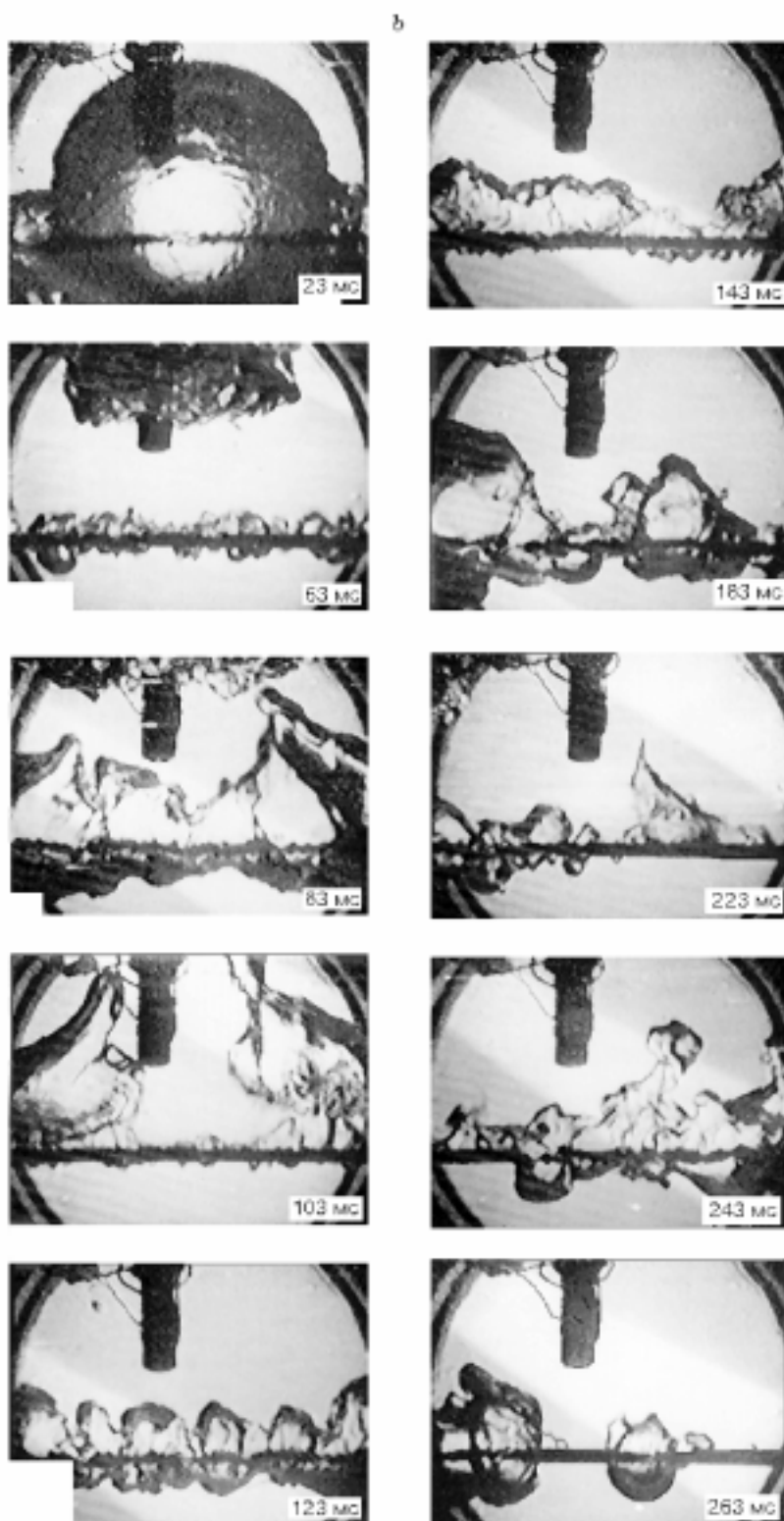


Рис. 5. Продолжение.

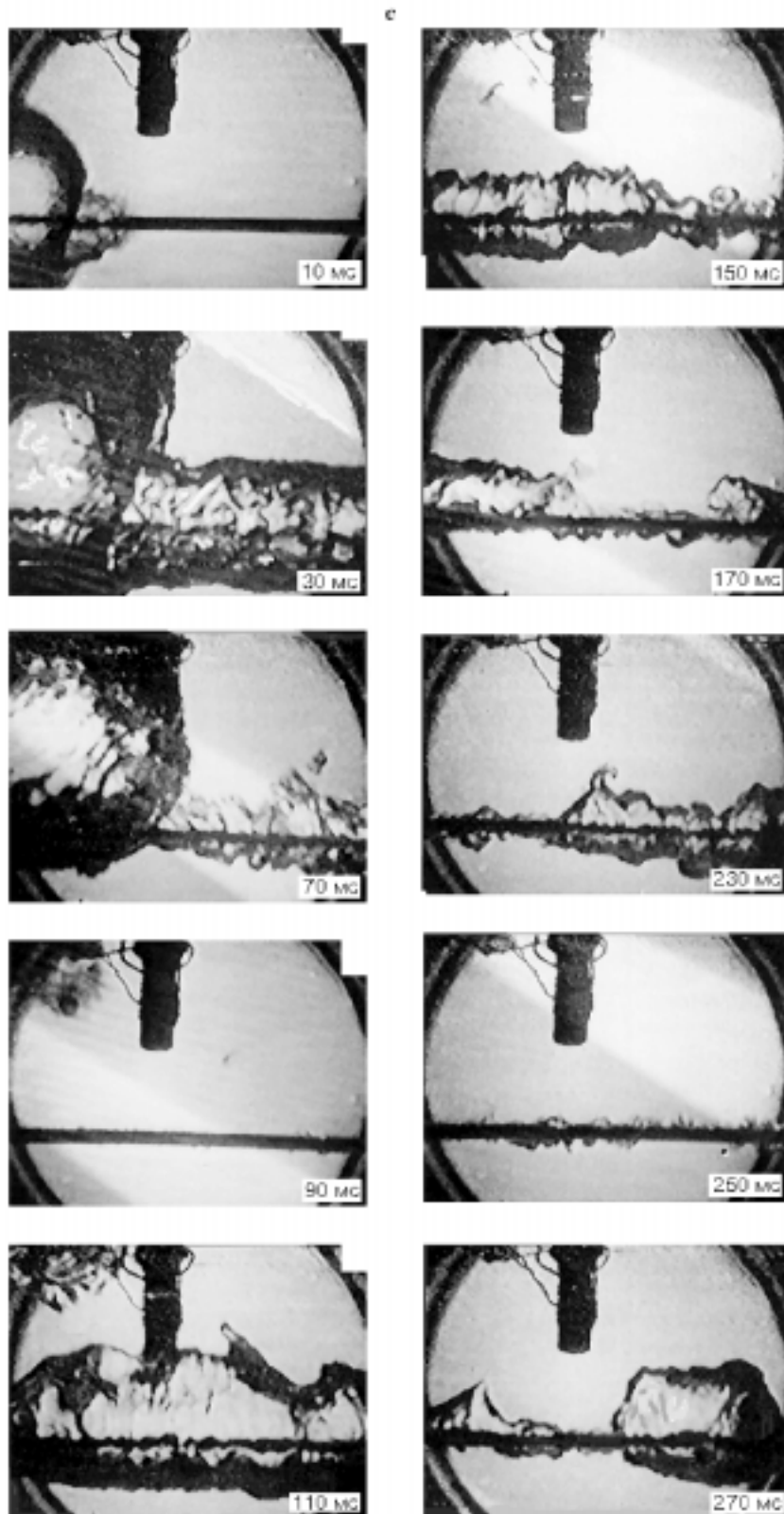


Рис. 5. Окончание.

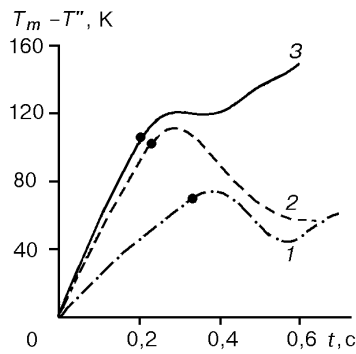


Рис. 6. Нестационарные значения температур рабочего участка при ступенчатом подводе мощности.

1 — $q = 436,2$, 2 — $q = 845$, 3 — $q = 949$ кВт/м²;

• — вскипание.

При “набросе” плотности теплового потока 949 кВт/м² возникал кризис теплоотдачи (рис. 5, с). Динамика его развития аналогична третьему кризису теплообмена. Парообразование начиналось спустя 0,2 с после включения нагрузки при плотности теплового потока с теплоотдающей поверхности в жидкость, равной 500 кВт/м². После отрыва парового образования на теплоотдающей поверхности устанавливалась паровая пленка (кадр 4 на рис. 5, с). На кадрах 4 – 10 видно, как пульсирует толщина паровой пленки. После вскипания темп роста средней температуры рабочего участка снизился, затем в течение 80 мс значение T_m сохранялось примерно постоянным, после чего начинало увеличиваться, что свидетельствует о возникновении кризиса теплоотдачи (кривая 3 на рис. 6). Минимальный критический тепловой поток при нестационарном тепловыделении стал близким к значению $q_{cr.1}$ при стационарном нагреве, полученному в работе [17] на рабочем участке той же геометрии, что и в настоящих опытах.

Таким образом, качественное изменение процесса парообразования не оказало существенного влияния на величину минимальной критической плотности теплового потока для воды при нестационарном тепловыделении. Существенное снижение q_{cr}^{min} , по-видимому, произошло бы лишь в том случае, когда перегрев перед вскипанием превысит пороговое значение, при котором возникает третий кризис теплообмена. Более низкие значения q_{cr}^{min} в сравнении с $q_{cr.1}$ для органических и криогенных жидкостей, возможно, обусловлены тем, что перегревы перед вскипанием пристенной жидкости при нестационарном нагреве превышали величину ΔT_{cr3}^{min} . Фактически q_{cr}^{min} представляет собой третий кризис теплообмена в условиях нестационарного тепловыделения, и следовательно, нижняя граница области, где реализуются кризисы теплообмена при нестационарном тепловыделении, может быть описана теми же соотношениями, что и для третьего кризиса теплообмена [10]:

$$\Delta T_b = \Delta T_{cr3}^{min}, \quad q_{cr}^{min} > q_{cr2},$$

где

$$\Delta T_{cr3}^{min} = 380 \frac{T''^{1/2} \left[\sigma^7 (\rho - \rho'')^3 g^3 \right]^{1/16}}{\left| (c_p \lambda)^2 \rho^3 \right|^{1/8}},$$

q_{cr2} — второй критический тепловой поток, s — поверхностное натяжение, r — плотность жидкости, r'' — плотность пара, g — ускорение силы тяжести, l — теплопроводность жидкости, c_p — теплоемкость жидкости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 98-02-17588).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боршанский В.М., Фокин Б.С.** Ухудшение температурного режима при внезапном увеличении тепловой нагрузки поверхности нагрева, расположенной в большом объеме жидкости // Тр. ЦКТИ. — 1965. — Т. 58. — С. 58 – 63.
2. **Borishanskiy V.M., Fokin B.S.** Onset of heat-transfer crisis with unsteady increase in heat flux // Heat Transfer-Soviet Res. — 1969. — Vol. 1, No. 1. — P. 27 – 55.
3. **Steward W.G.** Transient helium heat transfer. Phase I — static coolant // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1978. — Vol. 21, No. 7. — P. 863 – 874.
4. **Павленко А.Н., Чехович В.Ю.** Критический тепловой поток при нестационарном тепловыделении // Изв. СО АН СССР. Серия техн. наук. — 1990. — Вып. 2. — С. 3 – 9.
5. **Авксентюк Б.П., Бобрович Г.И., Кутателадзе С.С., Москвичева В.Н.** О вырождении режима пузырькового кипения в условиях свободной конвекции // ПМТФ. — 1972. — № 1. — С. 69 – 73.
6. **Shepherd J.E., Sturtevant V.** Rapid evaporation at the superheat limit // J. Fluid Mech. — 1982. — Vol. 121. — P. 379 – 402.
7. **Авксентюк Б.П., Овчинников В.В., Плотников В.Я.** Динамика вскипания жидкости в области высоких перегревов // Теплообмен в парогенераторах: Матер. всесоюз. конф. — Новосибирск, 1988. — С. 304 – 308.
8. **Avksentyuk B.P., Ovchinnikov V.V., Plotnikov V.Ja.** Dynamics effects on interphase surface during the disintegration of superheated nearwall liquid // Proc. Int. Cent. Heat Mass Transfer. — 1991. — Vol. 33. — P. 583 – 598.
9. **Авксентюк Б.П., Овчинников В.В.** О динамике парообразования в воде // Сибирский физ.-техн. журн. — 1992. — № 1. — С. 3 – 9.
10. **Авксентюк Б.П., Кутателадзе С.С.** Неустойчивость режима теплообмена на поверхностях, обедненных центрами парообразования // ТВТ. — 1977. — Т. 15, № 1. — С. 115 – 120.
11. **Tsukamoto O., Uyemura T.** Observation of bubble formation mechanism of liquid nitrogen subjected to transient heating // Advances in Cryogenic Eng. — 1980. — Vol. 25. — P. 476 – 482.
12. **Павленко А. Н., Чехович В. Ю.** Исследование кризиса теплоотдачи при нестационарном тепловыделении // Кипение и конденсация. — Новосибирск: Изд. ИТ СО АН СССР, 1986. — С. 66 – 85.
13. **Okuyama K., Kozawa Y., Inoue A., Aoki S.** Transient boiling heat transfer characteristics of R113 at large stepwise power generation // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1988. — Vol. 31, No. 10. — P. 2161 – 2174.
14. **Павленко А.Н.** Нестационарный критический тепловой поток в жидкости при различных заданных законах тепловыделения // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1990. — Вып. 2. — С. 131 – 137.
15. **Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.
16. **Бувеч Ю.А., Мансуров В.В., Наталуха И.А.** Автоколебательные процессы на теплоделяющих поверхностях и третий кризис кипения // ТВТ. — 1987. — Т. 25, № 6. — С. 1161 – 1167.
17. **Авксентюк Б.П., Месаркишвили З.С.** Влияние недогрева на критические тепловые потоки при кипении жидкостей в области субатмосферных давлений // Кипение и конденсация. — Новосибирск: Изд. ИТ СО АН СССР, 1986. — С. 45 – 51.

Статья поступила в редакцию 3 декабря 1997 г.