

УДК 536.248

## ТРЕТИЙ КРИЗИС ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ ТЕПЛОПОВОДЕ

Б. П. Авксентюк, В. В. Овчинников

Институт теплофизики СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены результаты экспериментальных исследований кризисов теплоотдачи при ступенчатом подводе тепла к нагревателю, когда распад метастабильной жидкости происходит в виде фронтов испарения. Приводятся данные по динамике развития кризисов теплоотдачи при насыщении и недогреве. Показано, что под паровым образованием, возникшим в результате распространения фронтов испарения, микрослой жидкости отсутствует.

**Введение.** Интерес к исследованиям переходных процессов при кипении, включая кризисы теплоотдачи, обусловлен необходимостью обеспечения устойчивого охлаждения поверхностей нагрева современных энергонапряженных аппаратов при локальных тепловых возмущениях в элементах оборудования. Высокая интенсивность теплосъема при пузырьковом кипении сохраняется лишь до определенных плотностей теплового потока, выше которых нарушается контакт жидкости с теплонапряженной поверхностью, что ведет к резкому уменьшению (кризису) теплоотдачи. Безаварийная работа устройств с жидкостным теплоносителем в значительной степени определяется правильным выбором режимных параметров, исключающим возможность возникновения кризиса теплоотдачи.

В работах [1–3] при исследовании кипения щелочных металлов и органических жидкостей в условиях естественной конвекции при квазистационарном подводе тепла к теплоотдающей поверхности обнаружена новая разновидность кризиса теплоотдачи, когда переход от однофазной конвекции к пленочному режиму кипения обусловлен распространением фронтов испарения. Для этой разновидности процесса кипения введен термин “третий кризис теплоотдачи”. Показано, что плотности теплового потока, при которых возможно возникновение третьего кризиса теплоотдачи, могут быть существенно ниже критических плотностей тепловых потоков при пузырьковом кипении  $q_{cr1}$ . Определена область режимных параметров, когда возможна реализация этой разновидности кризисов в условиях естественной конвекции [1, 2, 4, 5]. Экспериментальных исследований третьего кризиса теплоотдачи в условиях нестационарного подвода тепла не проводилось.

К настоящему времени опубликовано много работ, посвященных экспериментальному исследованию теплоотдачи, включая кризисы, при нестационарном тепловыделении (см., например, [6–10]). Особенность представленных в настоящей работе результатов исследований кризисов теплоотдачи при ступенчатом подводе тепла к нагревателю состоит в том, что распад метастабильной пристенной жидкости происходил в виде фронтов испарения. Приводятся данные по динамике развития кризисов теплоотдачи при насыщении и недогреве.

**Методика измерений.** Опыты проводились с толуолом марки ХЧ в большом объеме спокойной жидкости. Рабочий участок изготовлен из платиновой проволоки диаметром

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 98-02-17588).

100 мкм и длиной 68 мм, припаянной к медным стержням диаметром 10 мм. Рабочий участок в рабочем объеме располагался горизонтально. Уровень жидкости над ним составлял 65 мм. В жидкости на уровне рабочего участка и в паровой области располагались термомпары для измерения температур жидкости и пара в рабочем объеме.

Нагрев осуществлялся пропусканием электрического тока непосредственно через рабочий участок, на который подавался импульс напряжения в виде ступеньки с крутизной фронта порядка  $10^4$  В/с. Параметры электрического импульса задавались регулированием напряжения на источнике питания с системой электронной стабилизации напряжения. Система управления работала с частотой 50 кГц, обеспечивая достаточно высокую степень надежности. Рабочий участок использовался также в качестве термометра сопротивления. Предварительно в стационарных условиях определялась зависимость электрического сопротивления рабочего участка от температуры.

В рабочем объеме располагался акустический датчик давления, который использовался для регистрации начала парообразования. Перед набросом мощности на рабочий участок проводились измерения давления и температур жидкости и пара в рабочем объеме. Измерения в нестационарном режиме осуществлялись с помощью подключенного к персональному компьютеру программируемого четырехканального 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя с временным разрешением 11,2 мкс на канал.

Подача напряжения на рабочий участок, опрос датчиков, определение момента вскипания, обеспечение требуемого времени для измерений до и после вскипания осуществлялись автоматизированным контрольно-измерительным комплексом, управляемым с помощью специальной программы. По измеренным значениям тока и напряжения рассчитывались электрическое сопротивление и электрическая мощность, выделяемая в рабочем участке. По температурной зависимости электрического сопротивления определялась средняя температура рабочего участка. Проводилась видеосъемка процесса парообразования на рабочем участке.

Опыты проводились при давлениях толуола в рабочем объеме от 1,7 до 75 кПа и недогревах жидкости до температуры насыщения в диапазоне 3–82 К. Температура насыщения вблизи теплоотдающей поверхности определялась с учетом веса столба жидкости. Недогрев жидкости создавался добавлением в рабочий объем воздуха.

Зависимости средней температуры рабочего участка и мощности, выделяемой в рабочем участке, от времени при различных значениях набрасываемой мощности аппроксимировались кусочно-гладкими функциями (среднеквадратичная ошибка аппроксимаций соответствовала погрешности измерений). Эти функции использовались для расчета среднеинтегральных по теплоотдающей поверхности значений плотности теплового потока, отводимого от рабочего участка в различные моменты времени, по формуле

$$q_1(\tau) = q(\tau) - 0,25 d \rho c_p \frac{dT(\tau)}{d\tau},$$

где  $q$  — скорость генерации тепла в рабочем участке;  $\tau$  — время;  $d$ ,  $c_p$ ,  $\rho$  — диаметр, теплоемкость и плотность рабочего участка соответственно;  $T$  — средняя температура рабочего участка.

**Результаты экспериментов.** Видеосъемка показала, что во всех опытах, когда возникал кризис теплоотдачи при набросе тепловой мощности, парообразование в метастабильной жидкости происходило в виде фронтов испарения.

Эксперименты в условиях насыщения проводились при давлении в рабочем объеме  $P = 2,3 \div 2,7$  кПа. На рис. 1, 2 приведены экспериментальные данные, иллюстрирующие динамику развития кризиса теплоотдачи при насыщении. Значения средней температуры рабочего участка в зависимости от времени при начальной скорости генерации тепла в

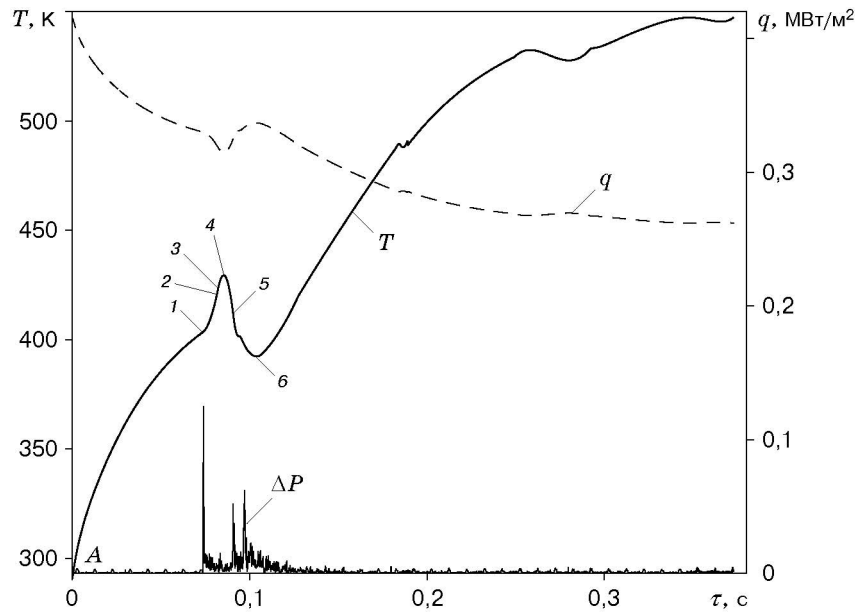


Рис. 1

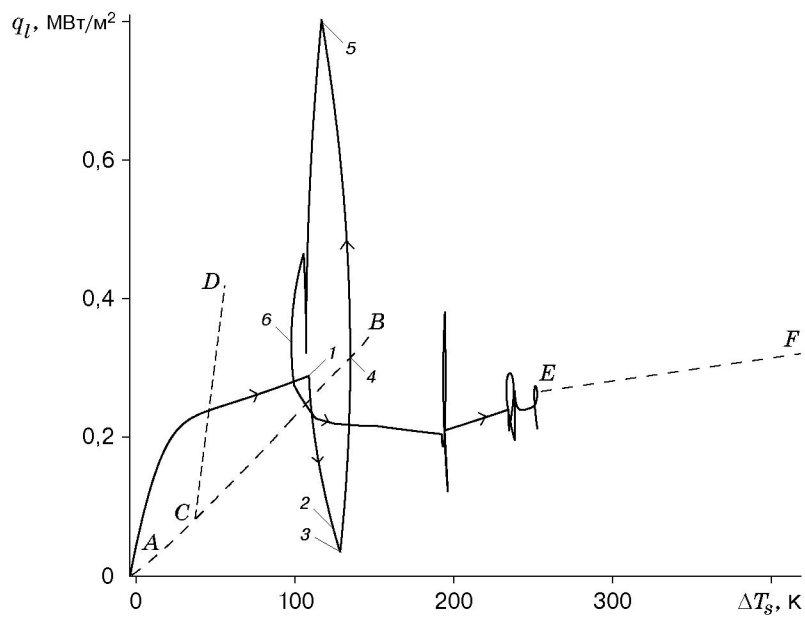


Рис. 2

рабочем участке  $q_0 = 0,42 \text{ МВт/м}^2$  представлены на рис. 1. Давление  $P$  в рабочем объеме составляло  $2,6 \text{ кПа}$ , недогрев жидкости относительно температуры насыщения  $\Delta T_{sub}$ , обусловленный весом столба жидкости, составил  $4,2 \text{ К}$ . Здесь же приведены значения скорости тепловыделения в рабочем участке и импульс давления  $\Delta P$ , который возникал в акустическом датчике давления при кипении. Зависимость плотности теплового потока, отводимого от поверхности рабочего участка, от перегрева рабочего участка  $\Delta T_s$  относительно температуры насыщения представлена на рис. 2 (сплошная линия). Стрелками показано направление изменения во времени величины  $q_l$ . Здесь же для сравнения приведены данные, полученные при квазистационарном нагреве (штриховые кривые): кривая  $ACB$  соответствует режиму однофазной конвекции в жидкости,  $CD$  — режиму пузырькового

кипения,  $EF$  — режиму пленочного кипения. Точка  $D$  соответствует первой критической плотности теплового потока.

После наброса мощности теплоотдача от рабочего участка осуществлялась теплопроводностью (кривые  $A1$  на рис. 1, 2). Вскипание произошло через 73,5 мс после наброса мощности при перегреве 108,6 К (точка 1 на рис. 1, 2). Тепловой поток, отводимый в жидкость, в этот момент был равен  $0,29 \text{ МВт/м}^2$ . Пузырек возник на расстоянии 11 мм от края рабочего участка. Скорость фронта испарения  $v_f$  в этом опыте составила 7,7 м/с. Фронты испарения распространились на всю теплоотдающую поверхность за 7,4 мс (точка 2). После вскипания амплитуда акустического сигнала и скорость роста температуры нагревателя увеличились, а плотность теплового потока, отводимого от нагревателя, начала снижаться.

После распространения фронтов на всю теплоотдающую поверхность продолжался рост температуры нагревателя, а амплитуда акустического сигнала снизилась. Отводимая плотность теплового потока уменьшилась до  $0,034 \text{ МВт/м}^2$  при  $\tau_b = 8,6$  мс (точка 3 на рис. 1, 2), а температура рабочего участка увеличилась до 429 К при  $\tau_b = 12$  мс (точка 4) ( $\tau_b$  — время, отсчитываемое с момента вскипания). Затем отводимый тепловой поток увеличивался до  $0,8 \text{ МВт/м}^2$  при  $\tau_b = 17,2$  мс (точка 5), что существенно превышает значение  $q_{cr1}$ , а температура рабочего участка понижалась до 392 К при  $\tau_b = 30$  мс (точка 6). Процесс сопровождался увеличением амплитуды акустического сигнала. В то же время происходило частичное разрушение, деформация, отрыв парового образования от теплоотдающей поверхности рабочего участка. На следующей стадии температура рабочего участка увеличивалась до значения, соответствующего стационарному режиму пленочного кипения.

При насыщении перегрев перед вскипанием превышал 100 К и возникал кризис теплоотдачи. При набросах низких плотностей тепловых потоков вскипания не происходило. На нагревателе устанавливался режим однофазной естественной конвекции. Для получения более низких значений перегревов перед вскипанием использовалась следующая методика проведения эксперимента. После наброса тепловой нагрузки, достаточной для парообразования, через 50 мс после вскипания производилось ее отключение. Через 200 мс проводился повторный наброс более низкой тепловой нагрузки. Это позволяло получать низкие перегревы перед вскипанием.

При набросах плотности теплового потока, равной  $0,8q_{cr1}$ , и перегревах перед вскипанием ниже 64 К на теплоотдающей поверхности после вскипания устанавливался режим неустойчивого пузырькового кипения. В диапазоне  $\Delta T_s = 64 \div 72$  К вскипание могло приводить либо к пузырьковому режиму кипения, либо к пленочному. При более высоких перегревах перед вскипанием всегда возникал кризис теплоотдачи.

При недогреве жидкости относительно температуры насыщения наряду с фронтами испарения наблюдалось распространение фронтов конденсации [11]. На рис. 3 показано изменение во времени средней температуры рабочего участка, импульса давления и выделяемой мощности при  $q_0 = 0,77 \text{ МВт/м}^2$ ,  $P = 13,1$  кПа,  $\Delta T_{sub} = 32,6$  К. На рис. 4 приведена зависимость  $q_l$  от перегрева при тех же условиях (жирная линия). Обозначения на штриховых линиях (квазистационарный режим) те же, что на рис. 2. Вскипание произошло через 90,8 мс после наброса мощности при перегреве 167 К (точка 1 на рис. 3, 4). Пузырек возник на расстоянии 24 мм от края рабочего участка. Скорость фронта испарения составила 29,5 м/с. За время  $\tau_b = 1,4$  мс фронты испарения распространились на всю теплоотдающую поверхность (точка 2).

После вскипания, как и в опытах при насыщении, скорость роста температуры нагревателя увеличилась, а плотность теплового потока, отводимого от нагревателя, начала снижаться и через 1,54 мс достигла минимального значения  $0,26 \text{ МВт/м}^2$  (точка 3), после

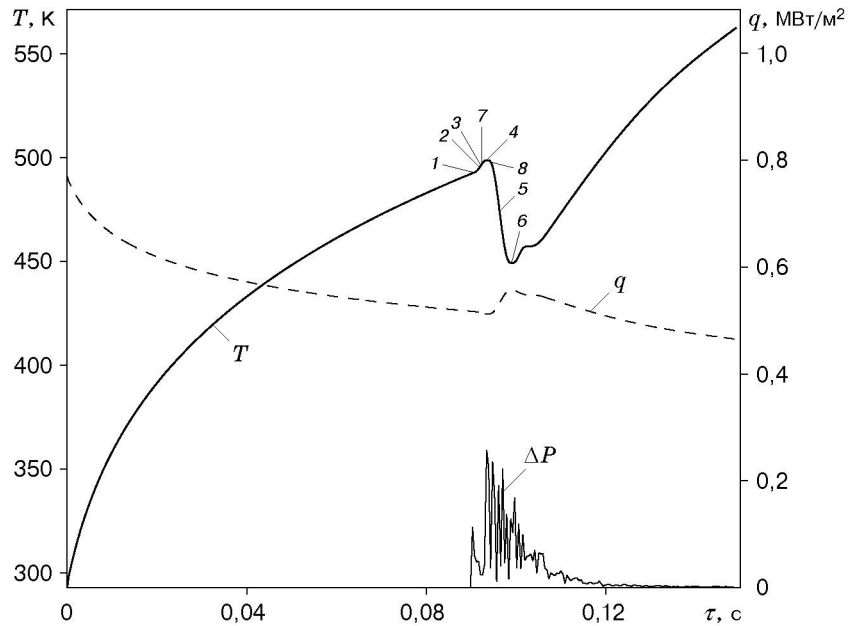


Рис. 3

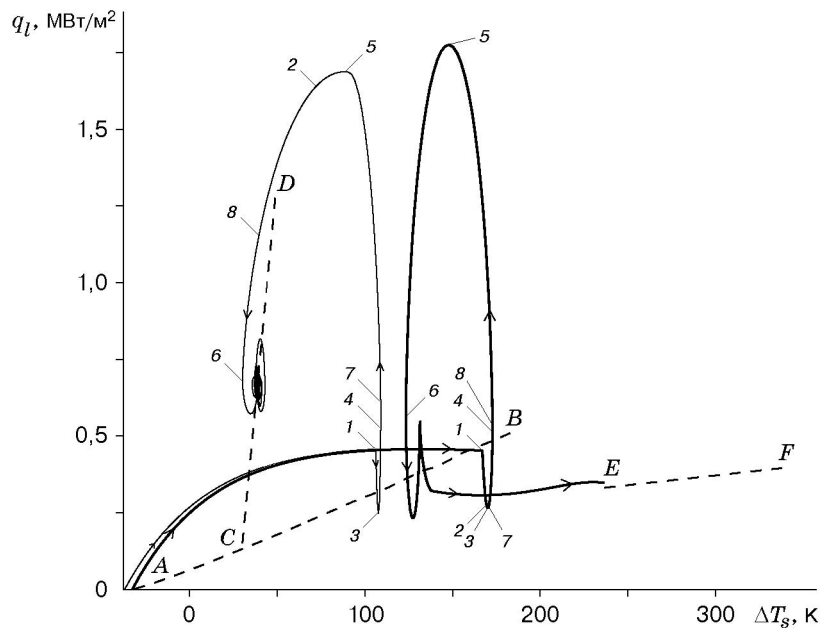


Рис. 4

чего вновь начала увеличиваться. При  $\tau_b = 1,1$  мс началось уменьшение поперечного размера парового образования в месте возникновения пузырька. Фронты конденсации сформировались через 1,5 мс после вскипания (точка 7) и в течение примерно 1,6 мс распространялись вдоль теплоотдающей поверхности (точка 8). Температура рабочего участка достигла максимального значения 499 К при  $\tau_b = 3,1$  мс (точка 4), после чего наблюдалось ее понижение до 449 К при  $\tau_b = 8,47$  мс (точка 6), а также увеличение отводимого теплового потока до  $1,78 \text{ MW/m}^2$  при  $\tau_b = 5,78$  мс (точка 5). Затем температура нагревателя вновь увеличилась до значения, соответствующего режиму стационарного пленочного кипения.

На рис. 4 приведены также результаты эксперимента (тонкая линия), проведенного приблизительно в тех же условиях ( $q_0 = 0,79$  МВт/м<sup>2</sup>,  $P = 13,8$  кПа,  $\Delta T_{sub} = 37,2$  К), что и описанный выше опыт. Отличие состоит лишь в том, что перегрев перед вскипанием оказался существенно меньше ( $\Delta T_s = 106$  К) и на нагревателе после вскипания установился режим пузырькового кипения. Скорость распространения фронта испарения составила 12 м/с. Фронты конденсации сформировались через 1,2 мс после вскипания. Скорости их распространения равны 8 м/с. В режиме пузырькового кипения вследствие образования пузырьков наблюдались пульсации температуры рабочего участка. Поэтому траектория процесса пузырькового кипения представляла собой петли, описываемые против часовой стрелки вокруг точки ( $\Delta T_{st} = 38,7$  К,  $q_{st} = 0,66$  МВт/м<sup>2</sup>), расположенной на кривой стационарного пузырькового кипения.

При недогреве наблюдалась следующая особенность развития кризисов теплоотдачи. Время от вскипания до формирования устойчивой паровой пленки, когда начинается рост температуры до значения, соответствующего режиму стационарного пленочного кипения, даже при набросе на рабочий участок одной и той же плотности теплового потока могло существенно меняться (от 10 до сотен миллисекунд).

На рис. 5 кривые *a*, *b*, *c* получены при одной и той же начальной скорости генерации тепла, равной 1,19 МВт/м<sup>2</sup> ( $\Delta T_{sub} = 36$  К,  $P = 13$  кПа). Из рис. 5 следует, что процесс теплообмена после вскипания протекает по-разному. При наиболее высоком перегреве перед вскипанием  $\Delta T_s = 164$  К (кривая *a* на рис. 5) температура рабочего участка снизилась до значения, превышающего значение, соответствующее кривой стационарного пузырькового кипения. В этом опыте время развития кризиса с момента вскипания (точка 1) до начала роста температуры (точка 6) равно 12,4 мс.

При перегреве перед вскипанием 131 К (кривая *b*) температура рабочего участка уменьшилась до значения, меньшего значения, соответствующего пузырьковому кипению. Затем в течение 10 мс она увеличилась до температуры пузырькового кипения и оставалась примерно постоянной в течение 350 мс, пока не была отключена нагрузка. При более низком перегреве перед вскипанием 95 К (кривая *c*) температура рабочего участка уменьшилась до температуры пузырькового кипения и в течение 154 мс не менялась. Затем она

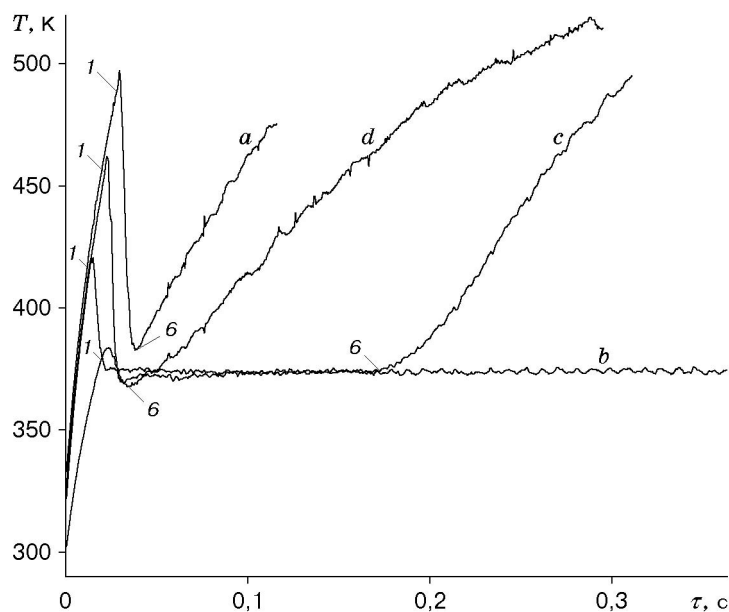


Рис. 5

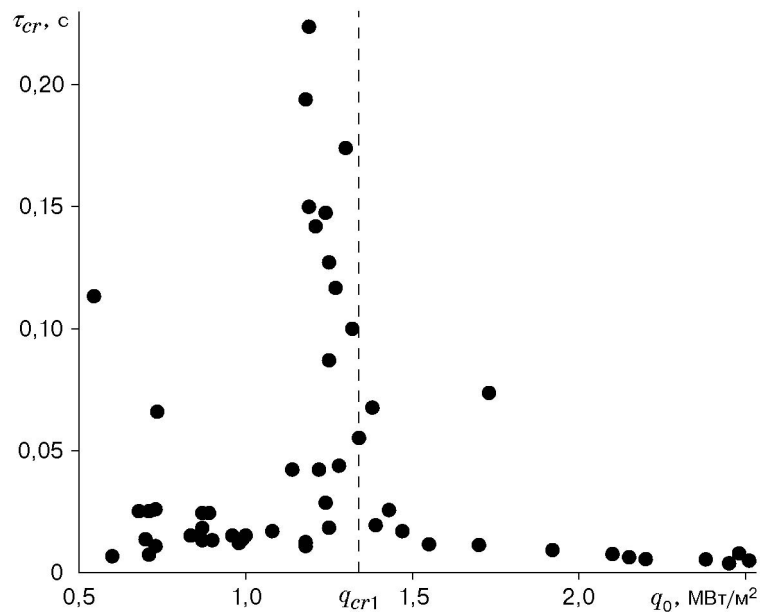


Рис. 6

начала монотонно увеличиваться со скоростью примерно 900 К/с, что свидетельствовало о возникновении кризиса теплоотдачи.

На рис. 5 приведены также данные, полученные при  $q_0 = 0,69 \text{ МВт/м}^2$ ,  $\Delta T_{sub} = 29,6 \text{ К}$  и  $P = 11,2 \text{ кПа}$  (кривая  $d$ ). Несмотря на более низкую начальную скорость генерации тепла и меньший перегрев перед вскипанием (58 К), кризис развился через 15 мс после вскипания, т. е. значительно раньше, чем в предыдущем опыте (кривая  $c$ ). Зависимость времени развития кризиса от начальной скорости генерации тепла в рабочем участке при  $\Delta T_{sub} = 28 \div 35 \text{ К}$ ,  $\Delta T_s = 54 \div 177 \text{ К}$  приведена на рис. 6. При  $q_0 < q_{cr1}$  наблюдается большой разброс данных. При  $q_0 > q_{cr1}$  значения  $\tau_{cr}$  существенно уменьшаются.

При больших недогревах (порядка 80 К) в ряде опытов температура рабочего участка уменьшалась до значений, меньших температуры насыщения, что свидетельствует о вовлечении в процесс теплообмена жидкости, находящейся вне перегретого слоя, сформированного к моменту вскипания после наброса тепловой мощности.

**Обсуждение результатов.** Исследования динамики развития третьего кризиса теплоотдачи при ступенчатом тепловыделении на рабочем участке малого диаметра, проведенные при насыщении и недогреве, показали, что под паровым образованием, возникшим в результате распространения фронта испарения, микрослой жидкости отсутствует. На теплоотдающей поверхности происходит процесс взрывного кипения, когда распад метастабильной жидкости в пристенном слое происходит в виде распространяющихся фронтов испарения, а теплоотдача от рабочего участка уменьшается. Несмотря на то что скорость распространения фронта испарения на порядок выше скорости испарения жидкости на нем, после прохождения фронта на теплоотдающей поверхности остаточный слой жидкости либо отсутствует, либо настолько тонкий, что его испарение не оказывает существенного влияния на динамику температуры рабочего участка.

На основе изложенных выше результатов экспериментальных исследований предлагается следующий механизм возникновения третьего кризиса теплоотдачи при насыщении. При перегревах жидкости на теплоотдающей поверхности перед вскипанием выше пороговых значений на поверхности парового пузырька, растущего на теплоотдающей поверхности, развивается неустойчивость [12]. Это приводит к формированию фронтов испарения [13], которые распространяются в метастабильной пристенной жидкости с постоянной

во времени скоростью. Скорость их распространения сильно зависит от перегрева и при больших перегревах может достигать десятков метров в секунду.

Паровое образование, возникшее в результате распространения фронтов испарения, изолирует теплоотдающую поверхность от основной массы жидкости, что приводит к уменьшению теплоотдачи (участок 1–2 на рис. 1, 2). После распространения фронтов испарения на всю теплоотдающую поверхность продолжается рост парового образования до размеров, существенно превышающих толщину паровой пленки при стационарном пленочном кипении. Поэтому уменьшение теплоотдачи происходит до значений, существенно меньших, чем при стационарном пленочном режиме кипения (участок 2–3).

После стадии расширения парового образования наступает стадия его сжатия. На межфазной поверхности жидкость — пар вследствие неустойчивости Тейлора растут возмущения. Происходит частичное разрушение парового образования и отрыв его от рабочего участка. Часть теплоотдающей поверхности смачивается жидкостью. На этой стадии (участок 3–5) теплоотдача увеличивается. Плотность теплового потока, отводимого от рабочего участка, достигает значений, существенно превышающих  $q_{cr1}$ . Затем на части теплоотдающей поверхности, изолированной от массы жидкости остатками парового образования, вследствие низкой теплоотдачи происходит рост температуры. Паровая пленка распространяется на всю теплоотдающую поверхность, и на рабочем участке устанавливается стационарный режим пленочного кипения.

При недогреве начальная стадия переходного процесса в режим стационарного пленочного кипения та же, что и в условиях насыщения: после вскипания возникают фронты испарения, и теплоотдающая поверхность изолируется от основной массы жидкости паровым образованием, возникшим в результате распространения фронтов испарения. После стадии расширения поперечные размеры пузырька и прилегающей к нему части парового образования уменьшаются вплоть до их полного разрушения. Это приводит к возникновению фронтов конденсации, которые распространяются вдоль поверхности рабочего участка с постоянной во времени скоростью. После прохождения фронтов конденсации на теплоотдающей поверхности устанавливается пузырьковое кипение при недогреве. Это приводит сначала к уменьшению скорости роста, а затем к понижению температуры рабочего участка (участок 4–6 на рис. 3, 4).

Исследования показали, что если минимальная температура рабочего участка (точка 6 на рис. 5) выше температуры, соответствующей режиму стационарного пузырькового кипения, то ее рост до значения, соответствующего режиму пленочного кипения, наблюдается сразу после достижения минимума. Если температура рабочего участка меньше этого значения, то происходит переход на кривую стационарного пузырькового кипения, а переход в режим пленочного кипения может произойти через сотни миллисекунд.

Результаты экспериментов для квазистационарного режима, приведенные на рис. 2, 4, осреднены по времени и объему рабочего участка. В описанных выше экспериментах измерялись величины, осредненные по объему рабочего участка. Несмотря на такое осреднение, измеренные значения существенно отличаются от значений, осредненных по времени. Различие локальных значений теплового потока и перегрева будет более существенным. Кривая пузырькового кипения, построенная с использованием локальных значений плотности теплового потока и перегрева, будет принципиально отличаться от стационарной кривой. Точка  $q_l(\Delta T_s)$  движется против часовой стрелки вокруг осредненного значения, соответствующего кривой стационарного пузырькового кипения, и ее траектория имеет вид петель (см. рис. 4). Наибольшие локальные значения теплового потока, существенно превышающие  $q_{cr1}$ , достигаются в области под паровым пузырьком на начальной стадии его роста, наименьшие значения — в области прогрева жидкости перед зарождением пузырька, а при появлении сухих пятен — на этих пятнах.



## ЛИТЕРАТУРА

1. **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.
2. **Avksentyuk B. P., Mamontova N. N.** Characteristics of heat-transfer crisis during boiling of alkali metals and organic fluids under free convection conditions at reduced pressure // Progress in heat and mass transfer. Oxford; N. Y.: Pergamon Press, 1973. V. 7. P. 355–362.
3. **Авксентюк Б. П., Овчинников В. В., Плотников В. Я.** Самоподдерживающийся фронт вскипания и третий кризис кипения // Нестационарные процессы в двухфазных потоках. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1989. С. 52–68.
4. **Авксентюк Б. П., Кутателадзе С. С.** Неустойчивость режима теплообмена на поверхностях, обедненных центрами парообразования // Теплофизика высоких температур. 1977. Т. 15, № 1. С. 115–120.
5. **Авксентюк Б. П.** Некоторые вопросы кризисов теплообмена при кипении в условиях естественной конвекции // Теплофизика и гидродинамика в процессах кипения и конденсации. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1985. С. 148–159.
6. **Borishanskiy V. M., Fokin B. S.** Onset of heat-transfer crisis with unsteady increase in heat flux // Heat Transfer. Sov. Res. 1969. V. 1, N 5. P. 27–55.
7. **Johnson H. A.** Transient boiling heat transfer to water // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1971. V. 14. P. 67–82.
8. **Толубинский В. И.** Теплообмен при кипении. Киев: Наук. думка, 1980.
9. **Павлов П. А.** Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1988.
10. **Okuyama K., Kozawa Y., Inoue A., Aoki S.** Transient boiling heat transfer characteristics of R113 at large stepwise power generation // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1988. V. 51. P. 2161–2174.
11. **Авксентюк Б. П., Овчинников В. В.** Динамика взрывного кипения толуола при субатмосферных давлениях // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 17, № 4. С. 606–613.
12. **Shepherd J. E., Sturtevant V.** Rapid evaporation at the superheat limit // J. Fluid Mech. 1982. V. 121. P. 379–402.
13. **Авксентюк Б. П., Овчинников В. В., Плотников В. Я.** Динамика вскипания жидкости в области высоких перегревов // Теплообмен в парогенераторах: Материалы Всесоюз. конф., Новосибирск, 28–30 июня 1988 г. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1988. С. 304–308.

*Поступила в редакцию 16/VIII 2000 г.,  
в окончательном варианте — 19/II 2001 г.*

---