

УДК 536.248

Третий кризис теплоотдачи при недогреве

Б.П. Авксентюк¹, В.В. Овчинников²

¹Винницкий торгово-экономический институт Киевского национального торгово-экономического университета, Украина

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Исследовано влияние недогрева жидкости до температуры насыщения на третий кризис теплоотдачи в условиях большого объема. Представлены экспериментальные данные по пороговым значениям перегревов и плотностям тепловых потоков, выше которых возникают фронт испарения и третий кризис теплоотдачи для ацетона при недогревах от 0,3 до 10 К. Для возникновения третьего кризиса теплоотдачи при недогреве формирование фронтов испарения является необходимым, но не достаточным условием. Обнаружено, что формирование устойчивой паровой пленки после прохождения фронтов конденсации по поверхности нагревателя возможно при тепловых потоках существенно меньших первого критического.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее высокие значения коэффициентов теплоотдачи реализуются при пузырьковом режиме кипения. Такой режим теплосъема представляет наибольший интерес для обеспечения охлаждения энергонапряженных элементов современного оборудования. Однако для безаварийной работы теплообменного оборудования, использующего кипящий теплоноситель, необходим правильный выбор режимных условий его эксплуатации, исключающий возможность возникновения кризиса теплоотдачи, при котором нарушается контакт жидкости с теплоотдающей поверхностью. Из-за этого происходит резкое ухудшение теплоотдачи с последующим разрушением теплообменника.

Обычно формирование паровой пленки на теплоотдающей поверхности происходит после режима пузырькового кипения. Такой кризис теплоотдачи получил название первый кризис теплоотдачи, а соответствующая ему плотность теплового потока — первая критическая плотность теплового потока $q_{кр.1}$. К настоящему времени этот вид кризиса наиболее полно исследован.

При исследовании теплоотдачи и критических плотностей тепловых потоков в жидкостях, кипящих при давлениях ниже 0,3 бара на рабочих участках малых размеров, в работах [1–4] наблюдалось возникновение кризиса теплоотдачи после режима однофазной конвекции, минуя режим пузырькового кипения. Первое же возникновение паровой фазы приводило к формированию устойчивой паровой пленки. Согласно этим работам, возникновение такого кризиса теплоотдачи обусловлено испарением микрослоя жидкости и образованием сухого пятна под паровым пузырем. В образовавшейся сухой области происходил рост температуры теплоотдающей поверхности. Вследствие этого площадь сухой области увеличи-

влась и в итоге на всей теплоотдающей поверхности устанавливался режим пленочного кипения. Таким образом, формирование паровой пленки при этой разновидности кризиса теплоотдачи обусловлено диффузией тепла вдоль теплоотдающей поверхности рабочего участка.

В работах [5–7] было показано, что возможен иной механизм перехода от однофазной конвекции к пленочному режиму кипения, обусловленный потерей устойчивости пузырьковой структуры парообразования. При перегревах жидкости перед вскипанием ΔT_v выше пороговых значений $\Delta T_{п.фр}$ на поверхности парового пузыря, растущего на теплоотдающей поверхности, развивалась неустойчивость. Это приводило к формированию фронтов испарения, которые распространялись в метастабильной пристенной жидкости с постоянной во времени скоростью, на порядок превышающей скорость распространения тепла в нагревателе. Скорость фронтов испарения сильно зависит от уровня метастабильности жидкости и при высоких перегревах может достигать десятки метров в секунду. Паровое образование, возникшее в результате распространения фронтов испарения, изолирует теплоотдающую поверхность от основной массы жидкости, что приводит к кризису теплоотдачи. Формирование паровой пленки в этом случае обусловлено действием импульса отдачи пара (реактивной силы) на межфазную поверхность жидкость — пар. Для этой разновидности кризиса был введен термин “третий кризис теплоотдачи”. Показано, что в условиях насыщения плотности теплового потока, при которых возможно возникновение третьего кризиса теплоотдачи, могут быть существенно ниже первых критических плотностей тепловых потоков.

Исследований третьего кризиса теплоотдачи при недогреве $\Delta T_{нед}$ не проводилось. Ниже излагаются результаты экспериментальных исследований влияния недогрева жидкости до температуры насыщения на это явление.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Опыты проводились в условиях большого объема при квазистационарном тепловыделении на рабочем участке. В качестве рабочей жидкости использовался ацетон. В жидкости на уровне рабочего участка и в паровой области располагались термодатчики для измерения температур жидкости и пара в рабочем объеме. Рабочим участком служила трубка из нержавеющей стали наружным диаметром 2,5 мм, толщиной стенки 0,5 мм и длиной 82 мм. Внутри трубки размещалась термодатчик, которая использовалась для определения перегрева жидкости перед вскипанием. При определении температуры поверхности нагрева вводилась поправка, учитывающая температурный перепад в стенке трубы.

Для получения данных по изменению средней по объему трубки температуры рабочего участка $T_{ср}$ в зависимости от времени, рабочий участок использовался в качестве термометра сопротивления. Предварительно в стационарных условиях определялась зависимость электрического сопротивления рабочего участка от температуры. Расчет температуры теплоотдающей поверхности по результатам измерения электрического сопротивления нагревателя не проводился из-за отсутствия данных по распределению температуры по объему трубки и вдоль теплоотдающей поверхности [8]. Данные по изменению средней по объему трубки температуры рабочего участка использовались для фиксации возникновения кризиса теплоотдачи и для определения характерных времен развития третьего кризиса теплоотдачи при недогреве. Мощность энерговыделения на рабочем участке задавалась регулировкой величины напряжения, подаваемой на обмотку возбуждения электрогенератора постоянного тока от источника питания с системой электронной стабилизации напряжения.

Запуск процесса парообразования проводился с помощью инициатора. Инициатор, изготовленный из платиновой проволоки диаметром 100 мкм и длиной 8 мм, располагался у края рабочего участка в непосредственной близости от теплоотдающей поверхности. До включения инициатора на рабочем участке устанавливался стационарный режим однофазной конвекции при заданном тепловом потоке, затем проводились измерения значений плотности теплового потока, температуры поверхности рабочего участка, температуры жидкости и пара, давления в рабочем объеме. Наброс тепловой нагрузки на инициаторе проводился автоматически, когда температура рабочего участка достигала уровня, установленного программой. Измерения после начала парообразования проводились с помощью 12-разрядного АЦП с временным разрешением 11,2 мкс.

Проводились видеосъемки и фотографирование процесса кипения в различные моменты времени после вскипания. В рабочем объеме располагался акустический датчик давления, который использовался для регистрации начала парообразования. Кроме того, сигнал с этого датчика использовался для включения импульсной лампы ИФК-120. Вблизи этой лампы располагался фотодатчик, сигнал от которого вместе с сигналом от датчика давления использовались для определения времени задержки фотосъемок по отношению к началу кипения.

Отключение нагрузки на рабочем участке для каждого заданного значения перегрева поверхности рабочего участка относительно температуры насыщения и недогрева жидкости проводилось с различной задержкой от момента включения инициатора. Длительность этой задержки задавалась программно и выбиралась так, чтобы не допустить разрушения рабочего участка после возникновения кризиса теплоотдачи. Как правило, варьирование величины задержки начиналось с 20 мс и затем она увеличивалась с шагом 10 мс до полного выяснения вопроса: возможен или нет кризис теплоотдачи для заданных режимных параметров. Система управления работала с тактовой частотой 50 кГц, обеспечивая достаточно высокую степень надежности.

Опыты проводились при давлении в рабочем объеме от 15 до 45 кПа и недогревах жидкости до температуры насыщения от 0,3 до 10 К. Температура насыщения у теплоотдающей поверхности определялась с учетом веса столба жидкости. Недогрев жидкости создавался добавлением в паровую область рабочего объема воздуха. Чтобы исключить влияние растворенного воздуха на параметры, определяющие возникновение третьего кризиса теплоотдачи, порция воздуха в паровую область рабочего объема добавлялась только на время проведения одного опыта (не превышало 30 минут). Оценочное характерное время достижения равновесного состояния системы жидкость — пар — воздух для наших условий составляло порядка 20 часов. После отключения тепловой нагрузки на рабочем участке воздух из паровой области и жидкости удалялся путем вакуумирования рабочего объема.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Съемки процесса парообразования показали, что во всех опытах возникновению третьего кризиса теплоотдачи предшествовал распад метастабильной пристенной жидкости в виде фронтов испарения. Однако их формирование являлось необходимым, но не достаточным условием для возникновения третьего кризиса теплоотдачи. При перегревах ниже порогового значения для третьего кризиса теплоотдачи, но выше порогового значения для фронта испарения после прохождения фронтов испарения вдоль теплоотдающей поверхности формировалась паровая пленка, которая вскоре разрушалась и, в зависимости от величины теплового потока, теплосъем осуществлялся либо в режиме пузырькового кипения, либо в режиме однофазной конвекции. Например, для ацетона при недогреве 0,3 К и

температуре насыщения 295 К пороговое значение перегрева перед вскипанием, выше которого развивалась неустойчивость на межфазной поверхности парового пузыря с формированием фронтов испарения, составило 60 К, соответствующая ему плотность теплового потока равна $q_{п.фр} = 44 \text{ кВт/м}^2$. Пороговое значение перегрева, выше которого вскипание приводило к возникновению третьего кризиса теплоотдачи $\Delta T_{п.кр.3}$ оказалось равным 75 К, соответствующая ему плотность теплового потока $q_{п.кр.3} = 58 \text{ кВт/м}^2$. В диапазоне перегревов от 60 до 75 К после прохождения фронтов испарения вдоль поверхности рабочего участка, формировались паровые пленки, которые впоследствии разрушались и третий кризис теплоотдачи не возникал.

На рис. 1 приведены фотографии процесса образования и разрушения паровой пленки при недогреве 0,3 К и при перегреве перед вскипанием 65 К. Здесь же для каждого кадра указано время от момента вскипания до съемки. На фотографиях светлый фон — жидкость, горизонтальная темная полоса — рабочий участок, над рабочим участком — акустический датчик давления, под рабочим участком — масштабные метки. На первом кадре справа можно видеть паровой пузырь, возникший в результате наброса тепловой нагрузки на инициаторе. На следующем кадре зафиксирован распространяющийся вдоль теплоотдающей поверхности рабочего участка фронт испарения. Паровое образование, возникшее в результате распространения фронтов испарения, изолировало теплоотдающую поверхность

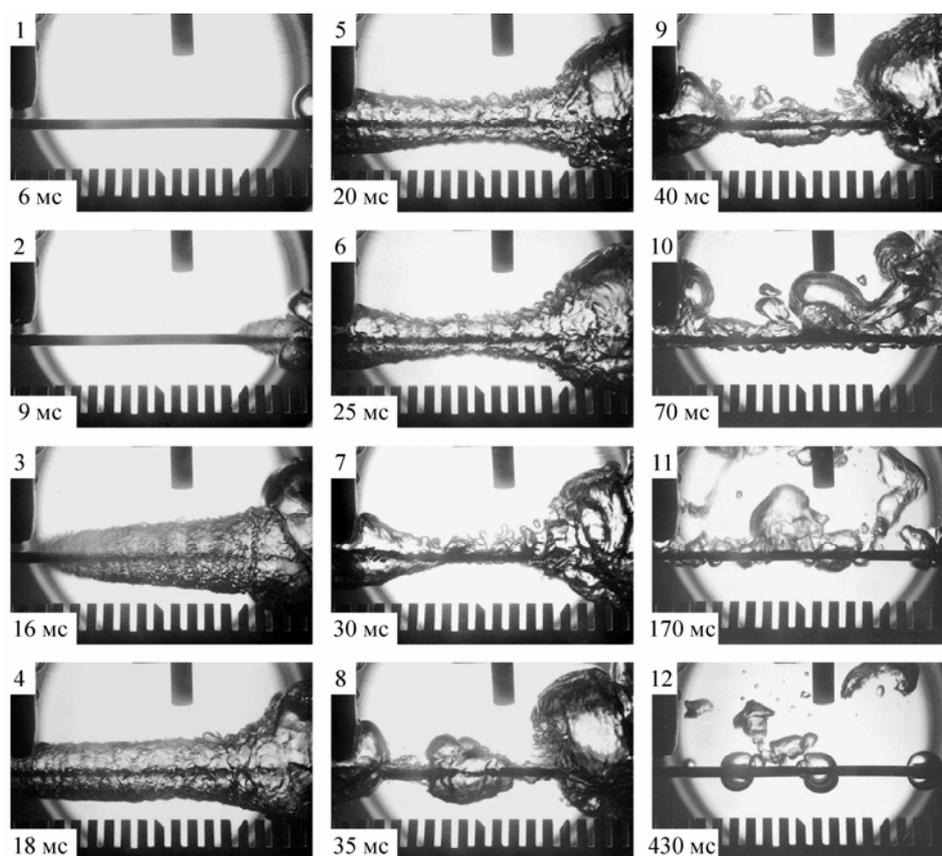


Рис. 1. Фотографии процесса формирования и разрушения неустойчивой паровой пленки. Ацетон, $T_{нас} = 295 \text{ К}$, $\Delta T_{в} = 65 \text{ К}$, $q_{в} = 49 \text{ кВт/м}^2$, $\Delta T_{исд} = 0,3 \text{ К}$.

Таблица

$\Delta T_{\text{нед}}, \text{ К}$	$T_{\text{нас}}, \text{ К}$	$\Delta T_{\text{п.фр}}, \text{ К}$	$q_{\text{п.фр}}, \text{ Вт/м}^2$	$\Delta T_{\text{п.кр.3}}, \text{ К}$	$q_{\text{п.кр.3}}, \text{ Вт/м}^2$
0,3	295	60	44000	75	58000
4,0	295	58	46000	81	68000
10,0	306	63	57000	94	84000

от основной массы жидкости. После увеличения поперечного размера парового слоя (кадр 3) наступала стадия его уменьшения (кадры 4–6). Далее происходило частичное разрушение (кадр 7) и отрыв его частей от рабочего участка (кадры 10, 11). На кадрах 8–12 можно проследить разрушение паровой пленки, расположенной на центральной части рабочего участка.

Экспериментальные данные по влиянию недогрева на пороговые значения перегревов и плотностей тепловых потоков для фронта испарения и третьего кризиса теплоотдачи приведены в таблице и на рис. 2. В исследованном диапазоне режимных параметров недогрев жидкости до температуры насыщения в рабочем объеме не оказывал существенного влияния на пороговые значения перегрева и плотности теплового потока перед вскипанием для фронта испарения (кривая 2, см. рис. 2). Увеличение пороговых значений для третьего кризиса теплоотдачи с ростом недогрева существенно (кривая 3). С увеличением недогрева область, где происходит разрушение паровых пленок, увеличивается.

На рис. 2 приведены также результаты расчетов критической плотности теплового потока в зависимости от недогрева по формуле из работы [9] при температуре жидкости 295 К

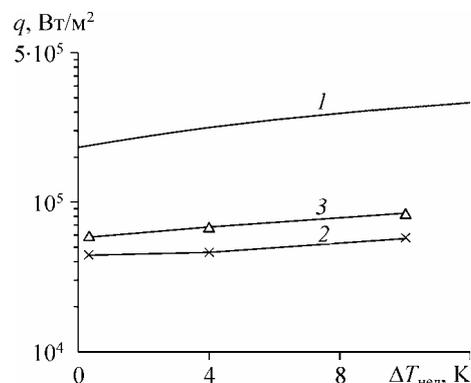
$$q_{\text{кр1.нед}} = 0,14r\sqrt{\rho''}\sqrt[4]{\sigma g(\rho' - \rho'')} \left[1 + 0,065(\rho'/\rho'')^{0,8} c_p' \Delta T_{\text{нед}}/r \right].$$

Здесь r — теплота парообразования, ρ' и ρ'' — плотности жидкости и пара соответственно, σ — коэффициент поверхностного натяжения, g — ускорение свободного падения, c_p' — удельная теплоемкость жидкости. Можно видеть, что в условиях недогрева значения критических плотностей теплового потока при третьем кризисе существенно ниже значений при первом кризисе теплоотдачи.

Таким образом, при $\Delta T_{\text{в}} < \Delta T_{\text{п.фр}}$ (ниже кривой 2, см. рис. 2) на поверхности нагрева при вскипании возникают обычные паровые пузыри, при $\Delta T_{\text{п.фр}} < \Delta T_{\text{в}} < \Delta T_{\text{п.кр.3}}$ (область между кривыми 2 и 3) образуется неустойчивая паровая пленка, после разрушения которой устанавливается режим пузырькового кипения, и при $\Delta T_{\text{в}} > \Delta T_{\text{п.кр.3}}$ (выше кривой 3) возникает третий кризис теплоотдачи.

На рис. 3 приведены кадры видеосъемок процессов парообразования при недогреве 10 К для значений перегревов перед вскипанием, лежащих в области $\Delta T_{\text{п.фр}} < \Delta T_{\text{в}} < \Delta T_{\text{п.кр.3}}$. Время между кадрами 33 мс. Для перегревов перед вскипанием ниже 75 К, разрушение паровой пленки происходило аналогично, что и при недогревах 0,3 К и 4 К. На рис. 3 на первом кадре опыта 1 показано паровое образование, возникшее в результате распространения фронта испарения. Разрушение парового образования

Рис. 2. Первая критическая плотность теплового потока (1), пороговые значения плотностей тепловых потоков для фронтов испарения (2) и третьего кризиса теплоотдачи (3) в зависимости от недогрева.



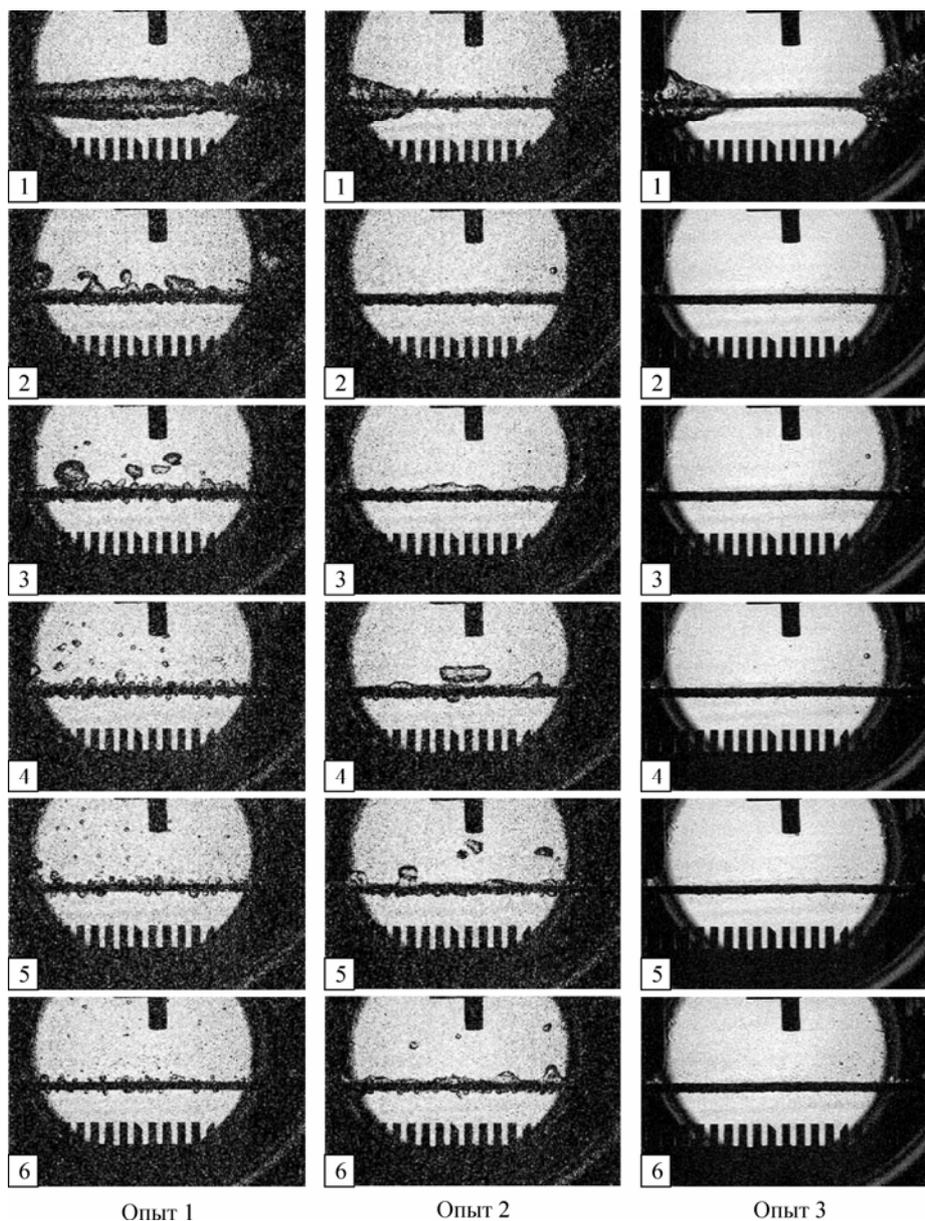


Рис. 3. Кадры видеосъемок процесса парообразования. Время между кадрами 33 мс.
 Ацетон. $\Delta T_{\text{нед}} = 10 \text{ К}$, $T_{\text{нас}} = 307 \text{ К}$.
 $\Delta T_{\text{в}} = 64$ (опыт 1), 80 (опыт 2), 94 (опыт 3) К, $q_{\text{в}} = 49$ (1), 73 (2), 84 (3) кВт/м².

происходило в окрестности границы между первичным паровым пузырем и конусообразной частью паровой полости. На месте разрушения после отрыва от нагревателя первичного парового пузыря наблюдались небольшие паровые пузырьки, а на другой части нагревателя оставалась паровая пленка. Эта паровая пленка постепенно уменьшалась в размерах (кадры 2–3), и затем на всем нагревателе устанавливался режим пузырькового кипения (кадры 4–6).

При значениях перегрева перед вскипанием больших 75 К наряду с фронтами испарения наблюдались фронты конденсации. На первых кадрах опытов 2 и 3 (см. рис. 3) можно видеть фронт конденсации, распространяющийся справа налево

вдоль теплоотдающей поверхности рабочего участка. Значения скорости распространения фронта конденсации близки к значениям скорости фронта испарения. После прохождения фронта конденсации на поверхности рабочего участка, по-видимому, оставалась тонкая паровая пленка, поскольку на кадрах 3–6 опыта 2 зафиксирован рост возмущений на поверхности паровой пленки и ее разрушение. В опыте 3 также зафиксирована паровая пленка после прохождения фронта конденсации, однако рост возмущений на ее поверхности и последующее ее разрушение происходило на бóльших временах в сравнении с опытом 2. Во всех опытах после вскипания имело место монотонное снижение средней температуры рабочего участка, несмотря на наличие паровой пленки на теплоотдающей поверхности. Чем выше становился уровень метастабильности пристенной жидкости перед вскипанием, тем с меньшей скоростью происходило снижение средней температуры рабочего участка.

На рис. 4 приведены фотографии, иллюстрирующие возникновение третьего кризиса теплоотдачи при $\Delta T_{\text{в}} = 95 \text{ К}$, $\Delta T_{\text{нед}} = 9,7 \text{ К}$, $T_{\text{нас}} = 306,5 \text{ К}$, $q_{\text{в}} = 87 \text{ кВт/м}^2$. Характерные времена развития третьего кризиса теплоотдачи при этих же режимных параметрах можно проследить на рис. 5, где приведена средняя по объему рабочего участка температура в зависимости от времени. Поскольку рабочий участок

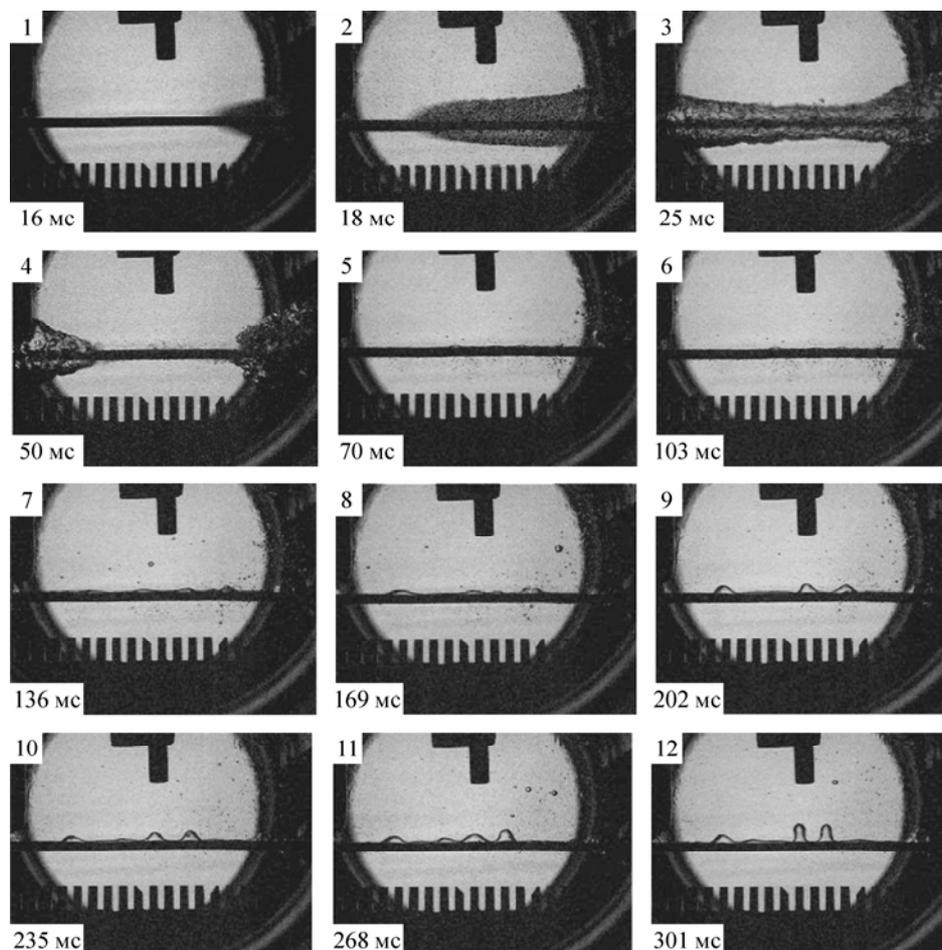


Рис. 4. Фотографии процесса возникновения третьего кризиса теплоотдачи при недогреве. Ацетон, $\Delta T_{\text{нед}} = 9,7 \text{ К}$, $T_{\text{нас}} = 306,5 \text{ К}$, $\Delta T_{\text{в}} = 95 \text{ К}$, $q_{\text{в}} = 87 \text{ кВт/м}^2$.

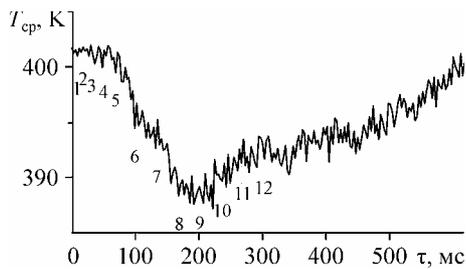


Рис. 5. Средняя температура рабочего участка $T_{ср}$ в зависимости от времени (режимные параметры см. рис. 4).

изготовлен из трубки толщиной стенки 0,5 мм, то его тепловая инерционность довольно высока — слабая чувствительность средней температуры к локальным изменениям температуры теплоотдающей поверхности.

Начальная стадия переходного процесса в режим стационарного пленочного кипения та же, что и в опытах 2, 3 (см. рис. 3), — возникновение после вскипания фронтов испарения и их распространение в метастабильной пристенной жидкости (кадры 1 и 2), изоляция теплоотдающей поверхности от основной массы жидкости паровым образованием, выросшим в результате распространения фронтов испарения. После стадий роста и уменьшения поперечного размера парового образования (кадр 3) центральная часть парового образования разрушилась. Это привело к возникновению фронтов конденсации (кадр 4), которые распространялись вдоль поверхности рабочего участка с постоянной во времени скоростью. После прохождения фронтов конденсации на теплоотдающей поверхности сформировалась устойчивая паровая пленка, при этом средняя температура рабочего участка снижалась. На кадрах 5–12 запечатлена стадия установления пленочного режима кипения. Моменту прекращения снижения средней температуры рабочего участка и началу ее роста соответствует кадр 10 на рис. 5.

ВЫВОДЫ

Проведены экспериментальные исследования влияния недогрева жидкости до температуры насыщения на третий кризис теплоотдачи в большом объеме. Показано, что для возникновения третьего кризиса теплоотдачи при недогреве и в условиях насыщения формирование фронтов испарения является необходимым, но не достаточным условием. Определена область формирования неустойчивых паровых пленок. Показано, что формирование устойчивой паровой пленки после прохождения фронтов конденсации по поверхности нагревателя возможно при тепловых потоках существенно меньших первого критического. Для ацетона при недогревах от 0,3 до 10 К получены данные по пороговым значениям перегревов, выше которых после вскипания формируются фронты испарения $\Delta T_{п.фр}$ и третий кризис теплоотдачи $\Delta T_{п.кр.3}$.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

c_p — удельная теплоемкость, Дж/кг,
 g — ускорение свободного падения, м/с²,
 r — теплота парообразования, Дж/кг,
 T — температура, К,

ΔT — перегрев теплоотдающей поверхности относительно температуры насыщения, К,
 τ — время, с,
 ρ — плотности, кг/м³,
 σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

ИНДЕКСЫ

в — вскипание,
 кр1 — первый критический,
 нас — насыщение,
 нед — недогрев,

п.кр.3 — пороговый для третьего кризиса,
 п.фр — пороговый для фронта испарения,
 ср — средний по объему трубки (рабочему участку),
 ' — жидкость,
 " — пар.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Van Stralen S.J.D.** Heat transfer to boiling binary liquid mixtures at atmospheric and sub-atmospheric pressures // Chem. Engng. Sci. — 1956. — Vol. 5. — P. 290–296.
2. **Lienhard J.H., Schrock V.E.** The effect of pressure, geometry and the equation of state upon the peak and minimum boiling heat flux // Trans. ASME, Ser. C, J. Heat Trans. — 1963. — Vol. 85, No. 3. — P. 261–272.
3. **Rallis C.J., Jawurek H.H.** Latent heat transport in saturated nucleate boiling // Inter. J. Heat Mass Trans. — 1964. — Vol. 7, No. 10. — P. 1051–1068.
4. **Мамонтова Н.Н.** Кипение некоторых жидкостей при пониженных давлениях // ПМТФ. — 1966. — № 3. — С. 140–144.
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. **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. — Vol. 7. — P. 355–362.
7. **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.
8. **Гогонин И.И., Катаев А.И.** Методические погрешности в экспериментальных исследованиях теплообмена при конденсации // Теплоэнергетика. — 2000. — № 12. — С. 48–53.
9. **Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена. — М.-Л.: Машгиз. — 1962. — 456 с.

Статья поступила в редакцию 17 мая 2007 г.