

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕДОГРЕВА НА ТРЕТИЙ КРИЗИС ТЕПЛОТДАЧИ**АННОТАЦИЯ**

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния недогрева жидкости до температуры насыщения на третий кризис теплоотдачи в условиях большого объема при квазистационарном тепловыделении в нагревателе. Приведены экспериментальные данные по пороговым значениям перегревов и плотностей тепловых потоков, выше которых возникали фронты испарения и третий кризис теплоотдачи при недогревах от 0,3 до 10 К. Приведены результаты фотосъемок этого явления.

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованиям кризисов теплоотдачи обусловлен необходимостью обеспечения устойчивого охлаждения энергонапряженных элементов современного оборудования. Высокая интенсивность теплосъема при пузырьковом кипении сохраняется лишь до критических плотностей теплового потока, выше которых нарушается контакт жидкости с теплонапряженной поверхностью, что ведет к ухудшению теплоотдачи (кризису теплоотдачи). Безаварийная работа аппаратов с жидкостным теплоносителем определяется правильным выбором режимных условий их эксплуатации, исключающим возможность возникновения кризиса теплоотдачи.

При исследовании теплоотдачи и критических плотностей тепловых потоков в жидкостях, кипящих при давлениях ниже 0,3 бара на рабочих участках малых размеров, рядом исследователей [1-4] наблюдалось вырождение режима пузырькового кипения, когда первое же возникновение паровой фазы приводило к формированию устойчивой паровой пленки, минуя режим пузырькового кипения. Согласно авторам этих работ, такой кризис теплоотдачи обусловлен испарением микрослоя жидкости под паровым пузырем. Это приводит к росту температуры нагревателя в области образовавшегося сухого пятна и распространению паровой пленки на всю теплоотдающую поверхность.

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 высоких уровнях метастабильности жидкости. При перегревах жидкости перед вскипанием ΔT_v выше пороговых значений $\Delta T_{п.фр}$ на поверхности парового пузыря,

растущего на теплоотдающей поверхности, развивается неустойчивость. Это приводит к формированию фронтов испарения, которые распространяются в метастабильной пристенной жидкости с постоянной во времени скоростью, на порядки превышающую скорость распространения тепла в нагревателе и скорость испарения жидкости. Термин «фронт испарения» обозначает лобовую часть поверхности парового образования, возникшего в результате неустойчивости межфазной поверхности. Скорость фронтов испарения сильно зависит от перегрева 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. Для этой разновидности кризиса 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 $q_{кр.1}$. Определена область режимных параметров, когда возможна реализация этой разновидности кризисов в условиях насыщения. 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.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Опыты проводились с ацетоном в условиях большого объема при квазистационарном тепловыделении на рабочем участке. В качестве рабочего участка использовалась трубка из нержавеющей стали наружным диаметром 2,5 мм, толщиной стенки 0,5 мм и длиной 82 мм. Внутри трубки размещалась термонара, которая использовалась для определения перегрева жидкости перед вскипанием. Для получения данных по изменению средней температуры рабочего участка и мощности, выделяемой в рабочем участке, в зависимости от времени при кипении рабочий участок использовался в качестве термометра сопротивления. Предварительно в стационарных условиях определялась зависимость электрического сопротивления рабочего участка от температуры. По температурной зависимости

сопротивления определялась средняя температура рабочего участка.

В опытах запуск процесса парообразования проводился с помощью инициатора, изготовленного из платиновой проволоки диаметром 100 мкм, длиной 8 мм и расположенном у края рабочего участка вблизи теплоотдающей поверхности. Величина и длительность тепловой нагрузки, подаваемой на инициатор парообразования, для различных значений недогрева жидкости подбирались так, чтобы максимальный перегрев платиновой проволоки составлял $120 \div 150$ К и временная задержка от момента наброса тепловой нагрузки на инициатор до вскипания была от 3 до 5 мс. 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 пережога рабочего участка после возникновения кризиса теплоотдачи.

Проводилась фотография процесса кипения в различные моменты времени после вскипания. В рабочем объеме располагался акустический датчик давления, который использовался для регистрации начала парообразования. Перед набросом мощности на инициаторе на рабочем участке устанавливался заданный тепловой поток в режиме однофазной конвекции и проводились измерения плотности теплового потока, температуры поверхности рабочего участка, температуры жидкости и пара, давление в рабочем объеме. Подача импульса на инициатор производилась автоматически, когда температура внутри рабочего участка достигала программно установленного уровня. Измерения после запуска парообразования проводились с помощью подключенного к персональному компьютеру Pentium-100 программируемого 4-х

канального 12 разрядного АЦП с временным разрешением 11,2 мкс на канал. По измеренным значениям тока и напряжения рассчитывалось электрическое сопротивление и электрическая мощность, выделяемая в рабочем участке. Опыты проводились при давлении в рабочем объеме от 15 до 45 кПа и недогрева жидкости до температуры насыщения от 0,3 до 10 К.

Недогрев жидкости создавался добавлением в рабочий объем воздуха. Растворимость воздуха в ацетоне при температуре 295 К составляет примерно 0,02%. Для уменьшения влияния растворенного воздуха на величину перегрева перед вскипанием воздух в паровую область рабочего объема добавлялся только на время проведения одного опыта (порядка 30 минут). После отключения тепловой нагрузки на рабочем участке воздух из рабочего объема удалялся вакуумированием.

3. 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, формирование фронтов испарения являлось необходимым, но не достаточным условием для возникновения кризиса теплоотдачи. При перегревах ниже порогового значения для третьего кризиса теплоотдачи, но выше порогового значения для фронта испарения, после прохождения фронтов испарения вдоль поверхности рабочего участка, формировалась неустойчивая паровая пленка, после разрушения которой в зависимости от величины теплового потока устанавливался либо режим пузырькового кипения, либо режим однофазной конвекции.

Для ацетона в условиях насыщения при температуре насыщения 295 К, пороговое значение

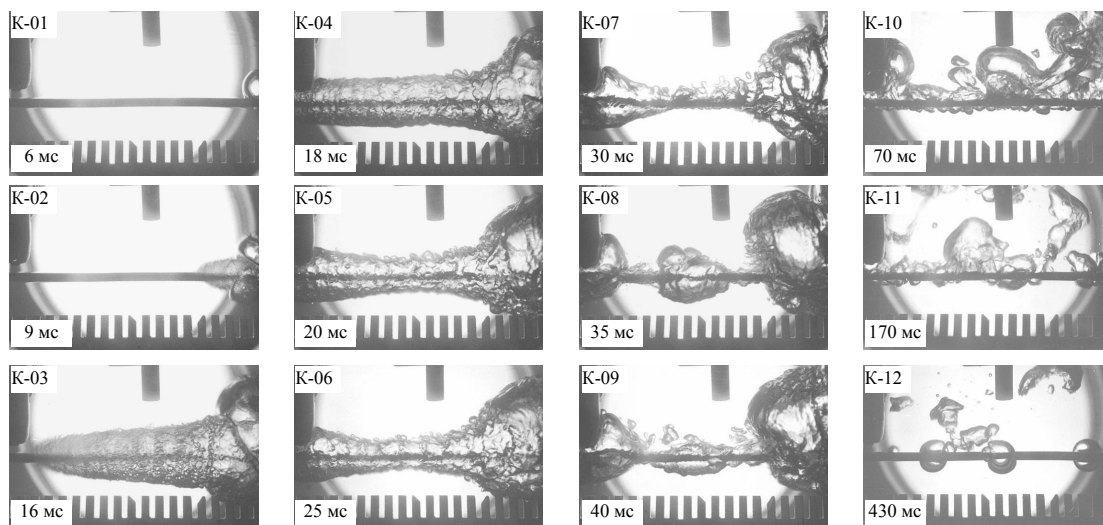


Рис.1 Фотографии процесса формирования и разрушения неустойчивой паровой пленки при насыщении. Ацетон, $T_{\text{нас}} = 295$ К, $\Delta T_{\text{в}} = 65$ К, $q = 49$ кВт/м².

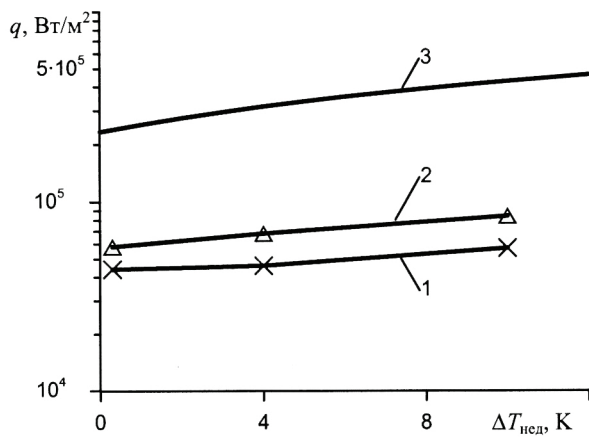


Рис. 2 Первая критическая плотность теплового потока (кривая 3) и пороговые значения плотностей тепловых потоков для фронтов испарения (кривая 1) и третьего кризиса теплоотдачи (кривая 2) в зависимости от недогрева.

Таблица 1.

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

перегрева перед вскипанием, выше которого развивалась неустойчивость на межфазной поверхности парового пузыря с формированием фронтов испарения, составило 60 К, соответствующая ему плотность теплового потока $q_{п.фр} = 44 \text{ кВт/м}^2$. 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 возникали неустойчивые паровые пленки.

На рис. 1 приведены фотографии процесса образования и разрушения неустойчивой паровой пленки в условиях насыщения при перегреве перед вскипанием 65 К. Здесь же для каждого кадра указано время от момента вскипания до съемки. Горизонтальная темная полоса – рабочий участок. На первом кадре справа можно видеть паровой пузырь, возникший в результате наброса нагрузки на инициатор. На следующем кадре зафиксирован распространяющийся вдоль теплоотдающей поверхности рабочего участка фронт испарения. Паровое образование, возникшее в результате распространения фронтов испарения, изолировало теплоотдающую поверхность от основной массы жидкости. После увеличения поперечного размера парового слоя (кадр 3) наступала стадия его уменьшения (кадры 4-6). Далее происходило частичное разрушение парового слоя (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 1 на рис. 2). Увеличение пороговых значений для третьего кризиса теплоотдачи с ростом недогрева существенно (кривая 2). При недогреве, так же как и при насыщении, существует диапазон перегревов перед вскипанием, когда паровые пленки, возникшие в результате распространения фронтов испарения разрушаются и третий кризис теплоотдачи не возникает (область между кривыми 1 и 2).

Таким образом, при $\Delta T_{в} < \Delta T_{п.фр}$ на поверхности нагрева возникают обычные паровые пузыри, при $\Delta T_{п.фр} < \Delta T_{в} < \Delta T_{п.кр.3}$ образуется неустойчивая паровая пленка, после разрушения которой устанавливается режим пузырькового кипения, и при $\Delta T_{в} > \Delta T_{п.кр.3}$ возникает третий кризис теплоотдачи. На рис. 2 приведены также результаты расчетов при температуре насыщения 295 К критической плотности теплового потока при недогреве по формуле Кутателадзе [8]

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

Можно видеть, что значения критических плотностей теплового потока при третьем кризисе существенно ниже значений критических плотностей тепловых потоков при пузырьковом кипении и в условиях недогрева жидкости в рабочем объеме до температуры насыщения.

При недогреве 4 К и $\Delta T_{в}$ немного выше $\Delta T_{п.фр}$ разрушение парового образования 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, и затем на всем нагревателе устанавливался режим пузырькового кипения. При более высоких перегревах перед вскипанием, процесс парообразования был аналогичен процессу парообразования в условиях насыщения.

При более высоких недогревах и $\Delta T_{в} > \Delta T_{п.фр}$ наряду с фронтами испарения наблюдались фронты конденсации. Значения скорости распространения фронта конденсации были близки к значениям скорости фронта испарения. На рис. 3 приведены фотографии, иллюстрирующие возникновение третьего кризиса теплоотдачи при $\Delta T_{в} = 95 \text{ К}$, $\Delta T_{нед} = 9,7 \text{ К}$, $T_{нас} = 306,5 \text{ К}$, $q = 87 \text{ кВт/м}^2$. На рис. 4 приведена средняя по объему рабочего участка

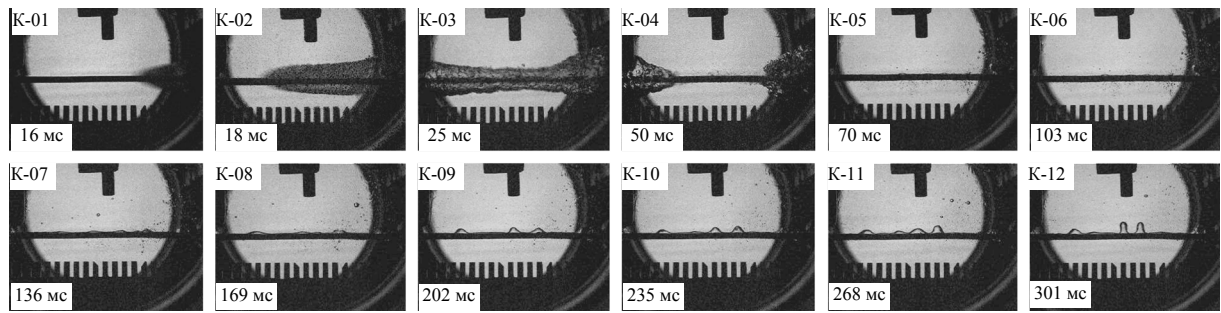


Рис. 3 Фотографии процесса возникновения третьего кризиса теплоотдачи при недогреве. Ацетон $\Delta T_{\text{нед}} = 9,7 \text{ K}$, $T_{\text{нас}} = 306,5 \text{ K}$, $\Delta T_{\text{нас}} = 95 \text{ K}$, $q = 87 \text{ кВт/м}$.

температура в зависимости от времени, полученная при этих же режимных параметрах. Поскольку рабочий участок 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 условиях насыщения - возникновение после вскипания фронтов испарения и изоляция теплоотдающей поверхности от основной массы жидкости паровым образованием, выросшим в результате распространения фронтов испарения. После стадий роста и уменьшения поперечного размера парового образования 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 формировалась устойчивая паровая пленка, при этом средняя температура рабочего участка снижалась. На кадрах 5 - 12 запечатлен рост возмущений на паровой пленке.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ НШ-5234.2006.1

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

c'_p теплоемкость жидкости, Дж/кг К;
 g ускорение свободного падения, м/с²;
 q тепловой поток, Вт/м²;
 r теплота фазового перехода, Дж/кг;
 T температура, К;
 ΔT перегрев относительно температуры насыщения, К;
 $\Delta T_{\text{нед}}$ недогрев жидкости относительно температуры насыщения, К;
 t время, с;
 ρ плотность, кг/м³;
 σ поверхностное натяжение, Н/м.

Индексы:

" жидкость;
 " пар;
 в параметры в момент вскипания;
 кр.1 первый кризис теплоотдачи;
 нас насыщение;
 нед недогрев;

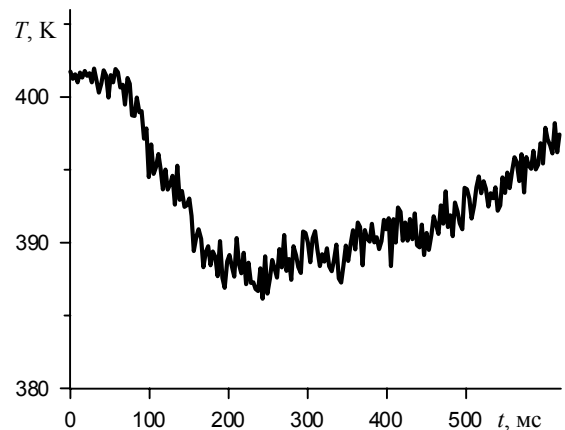


Рис. 4 Средняя температура рабочего участка в зависимости от времени. Режимные параметры см. на рис. 3.

п.кр.3 пороговое значение для 3 кризиса теплоотдачи;
 п.фр пороговое значение для фронта испарения.

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. V. 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. V. 85. N 3. P. 261-272.
3. **Rallis C.J., Jawurek H.H.** Latent heat transport in saturated nucleate boiling. // Intern. J. Heat Mass Trans. 1964. V.7. N10. 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 free 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.
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. **Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена. М.-Л.: Машгиз. 1962. 456 с.