

УДК 536.248

Исследование третьего кризиса теплоотдачи на вертикальной поверхности*

Б.П. Авксентюк¹, В.В. Овчинников²

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

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

E-mail: avks@itp.nsc.ru

Экспериментально исследован процесс возникновения третьего кризиса теплоотдачи при вертикальном расположении поверхности нагрева. опыты проводились с ацетоном в условиях насыщения при давлениях в рабочем объеме от 20 до 28 кПа. Во всех опытах возникновению третьего кризиса теплоотдачи предшествовало распространение вдоль теплоотдающей поверхности фронта испарения. Пороговые значения плотностей тепловых потоков, выше которых формируется устойчивая паровая пленка на всей поверхности нагрева, при вертикальном расположении теплоотдающей поверхности меньше, чем при горизонтальном. Получены данные по пороговым значениям плотностей теплого потока и перегревов перед вскипанием, выше которых наблюдалось формирование фронтов испарения. Определена область для режимных параметров, при которых после вскипания происходило образование на поверхности нагревателя очагов неустойчивого пленочного кипения.

Ключевые слова: кипение, кризис теплоотдачи, фронт испарения, недогрев.

Введение

Исследования явления вырождения режима пузырькового кипения, проведенные в работах [1–3], показали, что переход от однофазной конвекции к пленочному режиму кипения, минуя режим пузырькового кипения, носит пороговый характер и обусловлен потерей устойчивости пузырьковой структуры парообразования. При перегревах жидкости относительно температуры насыщения выше пороговых значений на поверхности парового пузыря, растущего на теплоотдающей поверхности, развивается неустойчивость. Рост в перегретой пристенной жидкости возмущений, возникших на межфазной поверхности жидкость–пар, происходит с постоянной во времени скоростью, на порядки превышающей скорость распространения тепла в нагревателе и скорость испарения жидкости. Для окрестности критической точки лобовой части парового образования, растущего в метастабильной жидкости с постоянной скоростью, нами был введен термин «фронт

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант НШ 8888.2010.8) и РФФИ (грант № 08 08 00120).

испарения». Процесс кипения, при котором происходит формирование и распространение фронтов испарения, получил название взрывного кипения, что обусловлено высокими значениями скоростей распространения фронтов испарения (десять-ки метров в секунду).

Чем выше уровень метастабильности жидкости перед вскипанием, тем на более ранней стадии роста парового пузыря формируются фронты испарения, тем выше скорость их распространения. Паровое образование, возникшее в результате распространения фронтов испарения, изолирует теплоотдающую поверхность от жидкости. Вследствие этого происходит ухудшение теплоотдачи от нагревателя, быстрый рост температуры теплоотдающей поверхности, то есть возникает кризис теплоотдачи. Для этой разновидности кризиса был введен термин «третий кризис теплоотдачи» [4]. Плотности теплового потока, при которых возможно возникновение третьего кризиса теплоотдачи, могут быть существенно ниже плотности теплового потока при первом кризисе теплоотдачи, возникающем после режима развитого пузырькового кипения, что обуславливает практическую значимость исследований третьего кризиса теплоотдачи.

Экспериментальные исследования гетерогенного взрывного кипения проводились в основном при горизонтальном расположении поверхности нагрева. Лишь в работе [5] приведены результаты экспериментальных исследований взрывного кипения бензола на вертикальной поверхности. Выяснилось, что изменение ориентации теплоотдающей поверхности не оказывает существенного влияния на динамику фронта испарения. Исследований влияния ориентации поверхности нагревателя относительно сил гравитации на третий кризис теплоотдачи не проводилось. При вертикальном расположении нагревателя паровые пузыри всплывают вдоль теплоотдающей поверхности, что может оказать влияние на формирование фронтов испарения и на формирование устойчивой паровой пленки на верхней части нагревателя. Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований процесса возникновения третьего кризиса теплоотдачи на вертикальной поверхности.

Методика измерений

В качестве рабочей жидкости использовался ацетон марки «ХЧ». Опыты проводились в условиях большого объема. В жидкости и в паровой области располагались термопары для измерения температуры пара и жидкости в рабочем объеме. Рабочий участок в жидкости, которым служила трубка из нержавеющей стали наружным диаметром 2,5 мм, толщиной стенки 0,5 мм, длиной 80,5 мм, располагалась вертикально. Чистота теплоотдающей поверхности соответствовала 9–10 классу. Внутри трубки размещалась термопара, «горячий» спай которой находился в центральной части рабочего участка. Квазистационарное тепловыделение на рабочем участке осуществлялось пропусканием тока непосредственно через данный участок. Требуемая мощность энерговыделения обеспечивалась регулировкой величины напряжения, подаваемой на обмотку возбуждения электрогенератора постоянного тока от источника питания с системой электронной стабилизации напряжения. Подача электрического напряжения и отключение рабочего участка производились с помощью электронного ключа.

Для получения данных по изменению средней по объему трубки температуры рабочего участка во времени он использовался в качестве термометра сопротивления. Зависимость электрического сопротивления рабочего участка от температуры предварительно определялась в стационарных условиях.

Для запуска процесса парообразования использовался инициатор, который представлял собою платиновую проволочку диаметром 100 мкм и длиной 6 мм, расположенную вблизи теплоотдающей поверхности на расстоянии 10 мм от нижнего

края рабочего участка. Величина тепловой нагрузки, подаваемой на инициатор парообразования, и ее длительность подбирались так, чтобы максимальный перегрев платиновой проволоочки составлял $120 \div 150$ К. До включения инициатора на рабочем участке устанавливался стационарный режим однофазной конвекции при заданном значении плотности теплового потока. Подача электрического импульса на инициатор проводилась автоматически, когда температура теплоотдающей поверхности рабочего участка достигала программно установленного уровня. Эта температура определялась по показаниям термодпары, расположенной в центре рабочего участка, с учетом поправок на перепад температуры в стенке нагревателя. Начало парообразования после подачи напряжения на инициатор регистрировалось акустическим датчиком давления, который располагался в рабочем объеме. Время после подачи тепловой нагрузки до вскипания на инициаторе составляло порядка миллисекунды.

Фотографирование и видеосъемка исследуемых процессов проводились цифровым фотоаппаратом Casio EXILIM EX-F1. Видеосъемка проводилась с частотой 300 и 600 кадр/с, время экспозиции 0,8 мс. Частота кадров при различных режимах видеосъемки определялась при помощи видеосъемки лампового электронного таймера, у которого обновление индикации цифрового табло происходило каждые 10 мс. Сигнал, возникающий в акустическом датчике при вскипании, использовался для включения импульсной лампы ИФК-120. Время включения импульсной фотолампы задавалось относительно момента включения инициатора. Вблизи этой лампы располагался фотодатчик. Сигнал от него вместе с сигналом от датчика давления использовался при определении времени задержки съемки по отношению к началу парообразования.

Отключение энерговыделения на рабочем участке для каждой плотности теплового потока проводилось при различных задержках относительно момента включения инициатора. Длительность таких задержек задавалась программно и выбиралась таким образом, чтобы не допустить пережога рабочего участка в случае возникновения кризиса теплоотдачи. Варьирование величины задержки начиналось с 40 мс и затем увеличивалось с шагом 40 мс до полного выяснения вопроса — возможен или нет кризис теплоотдачи при данных режимных параметрах.

Данные с первичных датчиков во время эксперимента записывались с помощью подключенного к персональному компьютеру программируемого многоканального 14 разрядного АЦП “Л-Кард” L-780 со временем измерения от 5 мкс на канал. В опытах измерялись давление, температура жидкости и пара в рабочем объеме, плотность теплового потока, выделяемого на рабочем участке, температура теплоотдающей поверхности перед вскипанием. Подача напряжения на рабочий участок, опрос датчиков, определение момента вскипания, обеспечение требуемого времени для измерений до и после вскипания осуществлялись автоматизированным контрольно-измерительным комплексом на основе микроконтроллера Atmel AT90S8535. Система управления работала с тактовой частотой 3,6 МГц, обеспечивая достаточно высокую степень надежности. Программа для микроконтроллера написана для компилятора AVR-GCC. Повышение температуры рабочего участка проводилось в квазистационарном режиме. По измеренным значениям тока и напряжения рассчитывались электрическое сопротивление и электрическая мощность, выделяемая в рабочем участке.

Для достижения перегревов жидкости в пристенном слое, превышающих пороговые значения (когда возникают фронты испарения), требовалась теплоотдающая поверхность, обедненная готовыми центрами парообразования. В этих целях проводилась приработка рабочего участка в нестационарном режиме при повышенном давлении в рабочем объеме. Для удаления с теплоотдающей поверхности

адсорбированного газа проводилась серия набросов на рабочий участок тепловых нагрузок, превышающих первую критическую плотность теплового потока. Количество импульсов, их длительность и пауза между ними подбирались так, чтобы перегрев теплоотдающей поверхности в режиме пленочного кипения не превышал 200 К.

Опыты проводились при давлении в рабочем объеме от 20 до 28 кПа, под давлением собственных паров рабочей жидкости. Недогрев жидкости до температуры насыщения вдоль теплоотдающей поверхности определялся высотой столба жидкости и для нижней части теплоотдающей поверхности не превышал 1,5 К.

Результаты измерений и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что при вертикально ориентированной теплоотдающей поверхности возможно возникновение третьего кризиса теплоотдачи. Во всех опытах возникновению третьего кризиса теплоотдачи предшествовало распространение вдоль поверхности нагрева фронта испарения. На рис. 1 показаны отдельные кадры видеосъемки процесса возникновения третьего кризиса теплоотдачи при плотности теплового потока равной $47,3 \text{ кВт/м}^2$, давлении в рабочем объеме 20,4 кПа, перегреве перед вскипанием 104 К. Здесь же для каждого кадра указано время от момента вскипания на инициаторе до съемки. На кадрах светлый фон — жидкость, вертикальная темная полоса — рабочий участок, слева от рабочего участка масштабные метки. На первом кадре зафиксирована начальная стадия парообразования. Вблизи нижнего токоподвода можно видеть два светлых пятнышка — это лучи света, отраженные от поверхности пузырька, возникшего в результате наброса тепловой нагрузки на инициаторе. На кадрах 2 - 5 зафиксирован процесс распространения вдоль теплоотдающей поверхности рабочего участка фронта испарения. Фронт испарения в этом опыте распространялся со скоростью 11 м/с. Видно, что возникшее при взрывном кипении паровое образование состояло как бы из двух частей. Одна часть образована в результате роста начального пузыря, а другая — в результате распространения фронта испарения. Далее примерно в течение 8,3 мс происходил рост поперечного размера парового образования (кадры 6 - 7). Затем наступала стадия уменьшения его поперечного размера (кадры 8 - 9). Наибольшее уменьшение поперечного размера происходило в переходной зоне от части парового образования, возникшей от начального пузыря, и части, возникшей вследствие распространения фронта испарения. Следует отметить, что при вертикальном расположении теплоотдающей поверхности увеличение и последующее уменьшение поперечного размера парового образования было не столь существенным в сравнении с опытами при горизонтальном расположении рабочего участка [2]. Паровое образование, возникшее в результате распространения фронта испарения, изолировало теплоотдающую поверхность от основной массы жидкости, что приводило к ухудшению теплоотдачи и, следовательно, к развитию третьего кризиса теплоотдачи. На кадрах 11–15 можно видеть паровую пленку на освобождающейся, вследствие всплытия парового образования, теплоотдающей поверхности.

При плотностях теплового потока, больших 48 кВт/м^2 , режим пленочного кипения устанавливался на всей поверхности нагрева. При более низких плотностях теплового потока (меньше 46 кВт/м^2) в верхней части теплоотдающей поверхности рабочего участка после вскипания формировался режим пленочного кипения, а на нижней части — режим пузырькового кипения, что затрудняло фиксацию возникновения кризиса теплоотдачи по росту средней температуры рабочего участка,

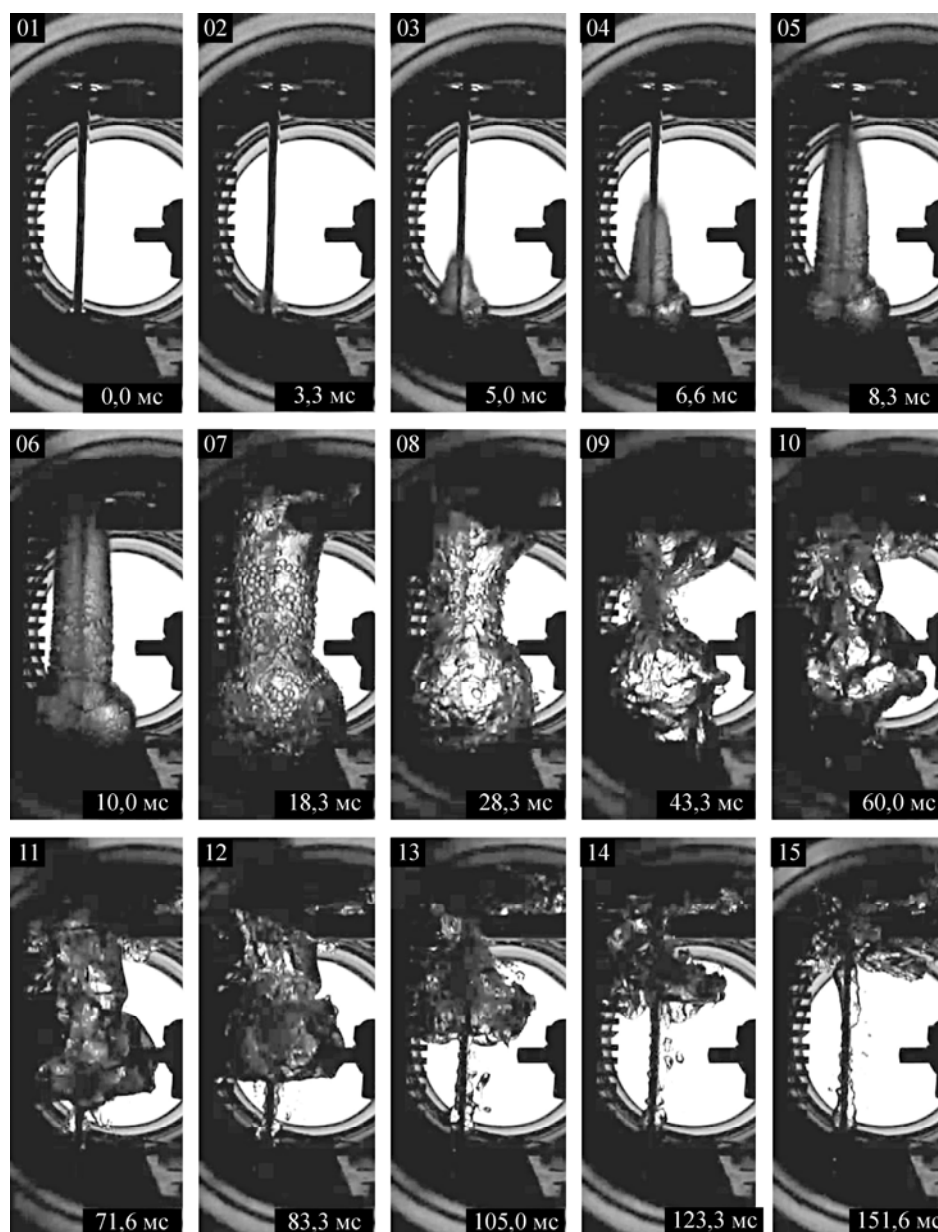


Рис. 1. Кадры видеосъемки процесса возникновения третьего кризиса теплоотдачи. Ацетон, $P = 20,4$ кПа, $\Delta T_{\text{в}} = 104$ К, $q_{\text{в}} = 47,3$ кВт/м².

рассчитываемой по значению электрического сопротивления рабочего участка, поскольку повышение температуры в зоне пленочного кипения компенсировалось ее снижением в зоне пузырькового кипения.

На рис. 2 приведены изменения средней температуры рабочего участка после вскипания в зависимости от времени для трех значений плотности теплового потока. Эти опыты проведены при температуре насыщения равной 293 К. Отсчет времени проводился от момента вскипания на инициаторе. Мелкомасштабные пульсации на кривых 1–3 обусловлены электрическими помехами. При плотности теплового потока 43 кВт/м² и перегреве перед вскипанием (кривая 3), равном 98 К,

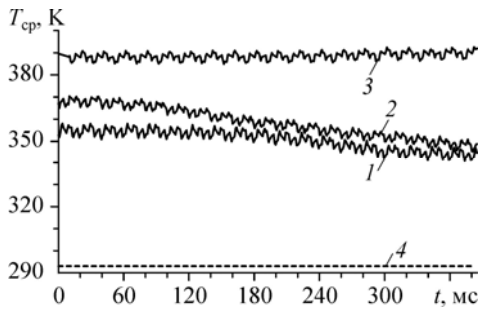


Рис. 2. Средняя температура рабочего участка T_{cp} в зависимости от времени t .
Ацетон, $T_s = 293$ К.

Пороговые значения: 1 — $\Delta T_b = 53$ К, $q_b = 21$ кВт/м² — для фронта испарения, 2 — $\Delta T_b = 78$ К, $q_b = 32$ кВт/м² — для третьего кризиса теплоотдачи; 3 — $\Delta T_b = 98$ К, $q_b = 43$ кВт/м² — граничные значения, выше которых третий кризис теплоотдачи диагностировался по росту средней температуры; 4 — температура насыщения.

во время возникновения начального пузыря и прохождения фронта испарения вдоль теплоотдающей поверхности средняя температура рабочего участка оставалась постоянной, и лишь после всплытия парового образования, когда примерно на 70 % площади теплоотдающей поверхности установился режим пленочного кипения, наблюдался ее монотонный рост. Плотность теплового потока 43 кВт/м² являлась граничным значением, выше которого было возможно диагностировать возникновение третьего кризиса теплоотдачи по росту средней температуры рабочего участка.

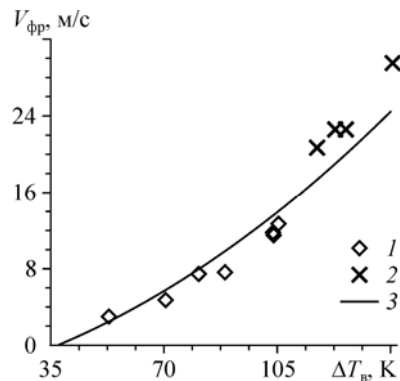
При плотностях тепловых потоках меньших 41 кВт/м² наблюдалось монотонное снижение средней температуры рабочего участка в течение более 600 мс. При температуре насыщения 293 К пороговое значение перегрева теплоотдающей поверхности относительно температуры насыщения, выше которого вскипание приводило к возникновению третьего кризиса теплоотдачи, оказалось равным 78 К, соответствующая ему плотность теплового потока — 32 кВт/м². На рис. 2 кривая 2 описывает изменение средней температуры рабочего участка при этих пороговых значениях режимных параметров. При плотностях теплового потока, больших 32 кВт/м², наблюдалось формирование устойчивой паровой пленки на площади более 25 % от площади теплоотдающей поверхности рабочего участка.

Пороговое значение перегрева перед вскипанием, выше которого развивалась неустойчивость на межфазной поверхности парового пузыря с формированием фронта испарения, составило 53 К, соответствующая ему плотность теплового потока равна 21 кВт/м². Изменение средней температуры рабочего участка при этих пороговых значениях описывает на рис. 2 кривая 1. Скорость фронта испарения в этом опыте составила 3 м/с.

На рис. 3 приведены данные по скорости фронта испарения, полученные в настоящей работе, и данные, полученные в работе [3] при горизонтальном расположении теплоотдающей поверхности. Здесь же приведены результаты расчетов (кривая 3) по модели для фронта испарения, предложенной в работе [6]. Согласование расчетных значений с экспериментальными данными подтверждает сделанный ранее вывод (см. [5]), что изменение ориентации теплоотдающей поверхности относительно гравитационных сил не оказывает существенного

Рис. 3. Скорость фронта испарения $V_{фр}$ в зависимости от перегрева перед вскипанием ΔT_b .
Ацетон, $P = 20 \div 28$ кПа.

Рабочие участки: 1 — вертикальный, 2 — горизонтальный [3]; 3 — расчет по модели [6] при $P = 20$ кПа.



влияния на динамику фронта испарения. Чем ниже перегрев перед вскипанием, тем больше время задержки, т. е. на более поздней стадии роста пузыря формируется фронт испарения. Время пребывания пузыря на рабочем участке ограничено. Этими обстоятельствами, возможно, обусловлены более высокие экспериментальные значения пороговых перегревов, выше которых возникали фронты испарения, в сравнении с расчетными значениями.

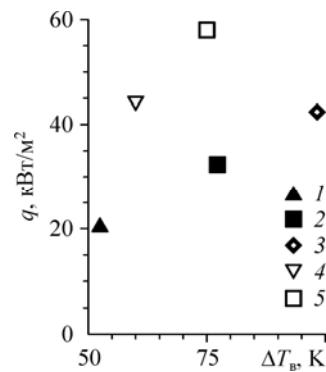
При вертикальном расположении рабочего участка подъем парового пузыря происходит вдоль теплоотдающей поверхности, что обуславливает некоторые особенности формирования фронтов испарения в сравнении с горизонтальным расположением рабочего участка. Во время роста на теплоотдающей поверхности паровой пузырь имел форму близкую к сферической. При всплытии пузыря происходило трансформирование его формы. Лобовая часть имела форму, близкую к сферической, радиус кривизны которой рос со временем, а форма кормовой части со временем изменялась от сферической с положительным радиусом кривизны до сферической с отрицательным радиусом кривизны. Если время задержки появления фронтов испарения оказывалось больше времени, за которое происходила смена знака радиуса кривизны кормовой части парового пузыря, то фронт испарения формировался только на лобовой части пузыря. В кормовой области наблюдалось появление отдельных пузырьков в следе за всплывающим паровым образованием. С увеличением перегрева перед вскипанием время задержки уменьшалось, и формирование фронтов происходило на более ранней стадии роста пузыря. Когда асимметрия формы пузыря была незначительной, фронты испарения образовывались на лобовой и кормовой частях пузыря.

Формирование фронтов испарения являлось необходимым, но не достаточным условием для возникновения третьего кризиса теплоотдачи. При перегревах перед вскипанием от 53 К до 58 К после прохождения фронтов испарения вдоль рабочего участка и всплытия парового образования на теплоотдающей поверхности паровые пленки отсутствовали. При температурах насыщения 290 – 294 К и при перегревах перед вскипанием от 59 К до 75 К после прохождения фронтов испарения образовывались паровые пленки на различных участках нагревателя, но они были неустойчивые. Первопричиной их разрушения являлись поднимающиеся вдоль теплоотдающей поверхности паровые пузыри. Взаимодействие паровых пузырей с паровой пленкой вызывало сильное волнообразование на поверхности пленки с последующим разрушением ее на отдельные пузыри несферической формы.

На рис. 4 для давления в рабочем объеме 24 кПа приведено сопоставление пороговых значений режимных параметров, выше которых возникали фронты испарения и третий кризис теплоотдачи, с данными, полученными в работе [7] при горизонтальном расположении теплоотдающей поверхности. В обеих работах использовались одинаковые рабочие участки. Изменение ориентации теплоотдающей поверхности

Рис. 4. Пороговые значения $\Delta T_{\text{в}}$ и $q_{\text{в}}$ для фронта испарения и третьего кризиса теплоотдачи при вертикальном и горизонтальном расположении рабочих участков. Ацетон, $P = 24$ кПа.

Вертикальный рабочий участок, пороговые значения: 1 — для фронта испарения, 2 — для третьего кризиса теплоотдачи; 3 — граничные значения, выше которых третий кризис теплоотдачи диагностировался по росту средней температуры. Горизонтальный рабочий участок [7], пороговые значения: 4 — для фронта испарения, 5 — для третьего кризиса теплоотдачи.



относительно сил гравитации не оказало существенного влияния на пороговые значения перегревов. Так пороговое значение для перегрева перед вскипанием, выше которого возникали фронты испарения, при вертикальном расположении теплоотдающей поверхности на 13 % ниже, чем при горизонтальном. Более низкие значения плотностей тепловых потоков, в сравнении с горизонтальным расположением, обусловлены особенностями теплообмена в режиме однофазной естественной конвекции при вертикальном расположении теплоотдающей поверхности. Пороговое значение плотности теплового потока, выше которых возможен третий кризис теплоотдачи, на ~ 80 % ниже значения критической плотности теплового потока при первом кризисе теплоотдачи, возникающим после режима развитого пузырькового кипения.

Условные обозначения

P — давление в рабочем объеме, Па,	$V_{\text{фр}}$ — скорость фронта испарения, м/с,
$q_{\text{в}}$ — тепловой поток перед вскипанием, Вт/м ² ,	$\Delta T_{\text{в}}$ — перегрев теплоотдающей поверхности
$T_{\text{ср}}$ — средняя температура рабочего участка, К,	относительно температуры насыщения
t — время, с,	перед вскипанием, К.

Индексы

в — вскипание,

ср — средний по объему трубки (рабочему участку).

Список литературы

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. Vol. 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: ИТФ 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., Овчинников В.В. Исследование процесса парообразования на вертикальной поверхности при высоких перегревах // Теплофизика высоких температур. 1994. Т. 32, № 1. С. 83–86.
6. Авксентюк Б.П., Овчинников В.В. Исследование динамики гетерогенного вскипания бензола при перегревах, близких к предельным // Теплофизика и аэромеханика. 1998. Т. 5, № 1. С. 105–112.
7. Авксентюк Б.П., Овчинников В.В. Третий кризис теплоотдачи при недогреве // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 2. С. 281–289.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.