

УДК 536.49;536.423;536.248

Динамика взрывного кипения и третий кризис теплоотдачи при недогреве на вертикальной поверхности

Б.П. Авксентюк¹, В.В. Овчинников²

¹*Винницкий торгово-экономический институт
Киевского национального торгово-экономического университета*

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

E-mail: avks@itp.nsc.ru

Приводятся результаты экспериментальных исследований динамики взрывного кипения и третьего кризиса теплоотдачи в условиях недогрева жидкости при вертикальном расположении теплоотдающей поверхности. В опытах использовался ацетон при давлении в рабочем объеме от 20 до 46 кПа, недогреве от 0 до 20 К. Проводились видеосъемки исследуемых процессов. Получены данные по скорости распространения фронта испарения при недогревах жидкости. Приведено сопоставление этих данных с результатами расчетов по имеющимся в литературе моделям. Исследовано влияние недогрева жидкости на области режимных параметров, при которых реализуется взрывное кипение и третий кризис теплоотдачи.

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

Введение

Гомогенная теория кипения [1, 2] определяет верхнюю границу для перегрева жидкости перед вскипанием. Эта теория рассматривает лишь стадию возникновения паровых пузырьков. В реальных условиях, как правило, имеет место гетерогенное зародышеобразование. Даже когда наблюдается согласование опытных значений перегрева перед вскипанием с результатами расчетов по гомогенной теории кипения, фотографии процесса вскипания свидетельствуют о гетерогенной природе зародышеобразования [3].

При гетерогенном кипении паровые пузыри образуются на готовых центрах парообразования — углублениях на теплоотдающей поверхности, заполненных газом. Наличие готовых центров парообразования обуславливает существенное снижение значений перегревов жидкости при гетерогенном вскипании в сравнении с предельными перегревами. Парообразование на готовых центрах происходит в виде пузырей, т.е. на теплоотдающей поверхности реализуется пузырьковый режим кипения.

Пузырьковый режим кипения жидкости широко используется в различных областях промышленности (в энергетике, ракетной и лазерной технике, химической и холодильной промышленности, криогенной технике, микроэлектронике, металлургии и т.д.) как наиболее эффективный способ отвода высоких плотностей тепловых потоков при относительно низких температурах тепловыделяющих поверхностей. Однако высокая

интенсивность теплосъема при пузырьковом кипении сохраняется лишь до определенных (критических) значений плотности теплового потока, при которых на теплоотдающей поверхности образуется паровая пленка. Нарушение контакта жидкости с поверхностью нагрева ведет к резкому ухудшению теплоотдачи с последующим разрушением теплоотдающей поверхности. Для безаварийной работы устройств с жидкостным теплоносителем необходимо обеспечивать диапазон режимных параметров, исключающий возможность возникновения кризиса теплоотдачи. Кризис теплоотдачи, возникающий после режима пузырькового кипения, получил название «первого кризиса теплоотдачи». Плотность теплового потока, при которой он возникает, называется первой критической плотностью теплового потока $q_{кр.1}$. Этой разновидности кризиса теплоотдачи посвящено большое количество экспериментальных и теоретических исследований.

Некоторое время назад считалось, что в жидкостях, хорошо смачивающих поверхность, кризис теплоотдачи возникает только после пузырькового режима кипения, пока в экспериментальных исследованиях кипения органических жидкостей на тонких проволочках при давлениях ниже 0,3 бар [4–6], не было обнаружено возникновение кризиса теплоотдачи после режима однофазной конвекции. Отсутствие режима пузырькового кипения авторы работ [4, 5] связывали с высокими перегревами перед вскипанием и большими отрывными диаметрами пузырей при субатмосферных давлениях в сравнении с атмосферным давлением. Согласно этим работам возникновение такого кризиса теплоотдачи происходит по следующей схеме. В жидкостях, хорошо смачивающих поверхность, паровой пузырь отделен от теплоотдающей поверхности микрослоем жидкости. Растущий паровой пузырь обволакивает тонкую проволочку и изолирует микрослой жидкости от ее основной массы. Вследствие этого жидкость под пузырем испаряется. В области образовавшегося сухого пятна из-за ухудшения теплоотдачи происходит рост температуры теплоотдающей поверхности, что приводит к увеличению сухой области. После распространения сухой области на всю теплоотдающую поверхность на рабочем участке устанавливается режим пленочного кипения. Таким образом, первопричиной формирования паровой пленки при этой разновидности кризиса теплоотдачи является диффузия теплоты в нагревателе.

Экспериментальные исследования с применением скоростной киносъемки, проведенные в работах [7–11], показали, что при высоких уровнях метастабильности пристенной жидкости перед вскипанием реализуется иной механизм формирования устойчивой паровой пленки после режима однофазной конвекции, обусловленный потерей устойчивости пузырьковой структуры парообразования. При перегревах теплоотдающей поверхности $T_{ст}$ относительно температуры насыщения $T_{нас}$ перед вскипанием $\Delta T_{в} = (T_{ст} - T_{нас})$, превышающих пороговые значения $\Delta T_{п}$, у основания парового пузыря на его поверхности из-за развития неустойчивости возникают возмущения, растущие в метастабильной пристенной жидкости с постоянной скоростью, на порядки превышающей скорость распространения тепла в нагревателе и скорость испарения жидкости. Для обозначения лобовой части поверхности парового образования, растущего с высокой скоростью (до десятков метров в секунду) вдоль теплоотдающей поверхности, авторами настоящей работы был введен термин «фронт испарения». Вследствие высоких скоростей распространения фронтов испарения процесс парообразования при высоких уровнях метастабильности получил название «взрывного кипения» [12]. Паровая каверна, образовавшаяся в результате распространения фронтов испарения, изолирует теплоотдающую поверхность от жидкости, вследствие чего возникает кризис теплоотдачи. Формирование паровой пленки обусловлено действием реактивной силы на межфазную поверхность жидкость–пар. Для этой разновидности кризиса был введен термин «третий кризис теплоотдачи» [13]. Плотность теплового потока, при которой он возникает, называется третьей критической плотностью теплового потока $q_{кр.3}$. Динамика взрывного кипения исследовалась также в работах [14–19].

Поскольку скорость распространения фронта испарения V_{ϕ} на порядки превышает скорость диффузии теплоты в нагревателе, переход от однофазной конвекции к пленочному режиму кипения по механизму, рассмотренному в работах [4, 5], возможен лишь при перегревах перед вскипанием, меньших пороговых значений $\Delta T_{\text{п}}$, когда фронты испарения не возникают.

В работах [7, 8] были определены области режимных параметров, в которых возникает третий кризис теплоотдачи в условиях насыщения. Плотности теплового потока для этого кризиса теплоотдачи могут быть существенно ниже критических плотностей тепловых потоков при пузырьковом кипении $q_{\text{кр.1}}$. Влияние недогрева жидкости до температуры насыщения на это явление исследовалось в работе [20].

Экспериментальные исследования третьего кризиса теплоотдачи проводились в основном при горизонтальном расположении поверхности нагрева. Лишь в работе [21] исследования третьего кризиса теплоотдачи в условиях насыщения проводились при вертикальном расположении поверхности нагрева. Ниже излагаются результаты экспериментальных исследований влияния недогрева на динамику взрывного кипения и на процесс возникновения третьего кризиса теплоотдачи при вертикальном расположении теплоотдающей поверхности.

1. Методика измерений

Рабочим участком в проводимых экспериментах служила трубка из нержавеющей стали наружным диаметром 2,5 мм, толщиной стенки 0,5 мм, длиной 80,5 мм. Чистота теплоотдающей поверхности соответствовала 9–10 классу. Внутри трубки размещалась термопара, «горячий» спай которой находился в центральной части рабочего участка. По показаниям этой термопары определялась температура теплоотдающей поверхности с учетом поправок на перепад температуры в стенке нагревателя. Для получения данных по изменению средней по объему трубки температуры рабочего участка во времени рабочий участок использовался в качестве термометра сопротивления. Зависимость электрического сопротивления рабочего участка от температуры предварительно определялась в стационарных условиях. Тарировка проводилась при горизонтальном положении трубки. По изменению средней по объему трубки температуры рабочего участка определялись характерные времена развития третьего кризиса теплоотдачи и фиксировалось его возникновение. Квазистационарное тепловыделение на рабочем участке осуществлялось при пропускании через него постоянного тока. В жидкости и в паровой области располагались термопары для измерения температур пара и жидкости в рабочем объеме. Погрешность измерения температуры термопарами не превышала 0,5 К, по электрическому сопротивлению рабочего участка — 1,5 К.

Опыты проводились с ацетоном марки «ХЧ» в условиях естественной конвекции при вертикальном расположении рабочего участка. Для обеспечения заданных уровней метастабильности жидкости перед вскипанием использовался инициатор вскипания, который представлял собой платиновую проволочку диаметром 100 мкм и длиной 6 мм, расположенную в непосредственной близости от теплоотдающей поверхности на расстоянии 10 мм от нижнего края рабочего участка. Перед запуском процесса парообразования на рабочем участке устанавливался стационарный режим однофазной естественной конвекции при заданном значении плотности теплового потока. Затем проводились измерения плотности теплового потока, температуры поверхности рабочего участка, температуры пара и жидкости, давления в рабочем объеме.

Подача электрического импульса на инициатор вскипания производилась автоматически по достижении температурой теплоотдающей поверхности рабочего участка программно установленного уровня. Эта температура определялась по показаниям термопары, размещенной в центре рабочего участка. Акустический датчик давления, расположенный в рабочем объеме, регистрировал начало парообразования после подачи

напряжения на инициатор вскипания. Время задержки парообразования на инициаторе составляло порядка миллисекунды. Измерения после вскипания проводились с помощью 14-разрядного АЦП с временным разрешением от 5 мкс на канал. Измерение плотности теплового потока q_v выполнялось перед включением инициатора вскипания.

В ходе эксперимента проводились видеосъемка и фотографирование процесса кипения. Сигнал акустического датчика при вскипании применялся для включения импульсной лампы, вблизи которой располагался фотодатчик. Сигналы от фотодатчика и датчика давления использовались при определении времени задержки съемок по отношению к началу парообразования. Скорость видеосъемки составляла 600 к/с, время экспозиции — 0,4 мс. При скорости движения межфазной границы менее 5 м/с точность определения скорости составляла 5 %, при скорости порядка 20 м/с погрешность увеличивалась до 15 %.

Давление в рабочем объеме измерялось образцовым вакуумметром класса точности 0,6. Опыты проводились при давлении в рабочем объеме от 20 до 46 кПа и недогревах жидкости до температуры насыщения от 0 до 20 К. Недогрев жидкости создавался добавлением в паровую область рабочего объема воздуха. Температура насыщения $T_{\text{нас}}$ вычислялась по давлению в рабочем объеме с точностью примерно 0,3 К. Недогрев $\Delta T_{\text{нед}}$ определялся как разность между температурой насыщения и температурой жидкости в рабочем объеме: $\Delta T_{\text{нед}} = (T_{\text{нас}} - T_{\text{ж}})$. В целях обеспечения требуемых для исследований уровней метастабильности жидкости процессы парообразования рассматривались на теплоотдающей поверхности, обедненной готовыми центрами парообразования. Методика получения таких поверхностей приведена в работе [20].

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Скоростная видеосъемка позволила проследить влияние недогрева жидкости в рабочем объеме до температуры насыщения на динамику взрывного кипения и на процесс формирования паровой пленки при третьем кризисе теплоотдачи на вертикально расположенной теплоотдающей поверхности.

На рис. 1 показаны кадры видеосъемки процесса возникновения третьего кризиса теплоотдачи при недогреве, равном 9,6 К, и при перегреве теплоотдающей поверхности относительно температуры насыщения перед вскипанием, составляющем 115 К, что выше порогового значения для третьего кризиса теплоотдачи. На каждом кадре указано время от момента включения инициатора вскипания до съемки. На кадрах светлый фон — жидкость, вертикальная темная полоса — рабочий участок, слева от которого расположены масштабные метки. Акустический датчик зафиксировал вскипание через 5,08 мс после включения инициатора вскипания (кадр 1). На кадрах 2 и 3 запечатлено взрывное кипение — распространение фронта испарения вверх вдоль теплоотдающей поверхности рабочего участка с постоянной во времени скоростью, равной 15,6 м/с. Высокие скорости роста паровых образований обуславливают взрывообразный характер кипения. На кадрах 4, 5 видно, что возникшее при взрывном кипении паровое образование состоит из двух частей: одна часть сформирована в результате роста начального пузыря, а другая — в результате распространения фронта испарения. Паровое образование изолировало теплоотдающую поверхность от жидкости. Далее примерно в течение 5 мс происходил рост поперечного размера парового образования (кадр 4), затем наступала стадия его уменьшения (кадры 5, 6). Наибольшее сокращение поперечного размера имело место в переходной зоне от части парового образования, возникшей от начального пузыря, к части, возникшей вследствие распространения фронта испарения. Процесс частичного разрушения паровой пленки прослеживается на кадрах 7–14. На кадре 15 можно видеть, что на нижней и центральной частях теплоотдающей поверхности теплосъем осуществлялся

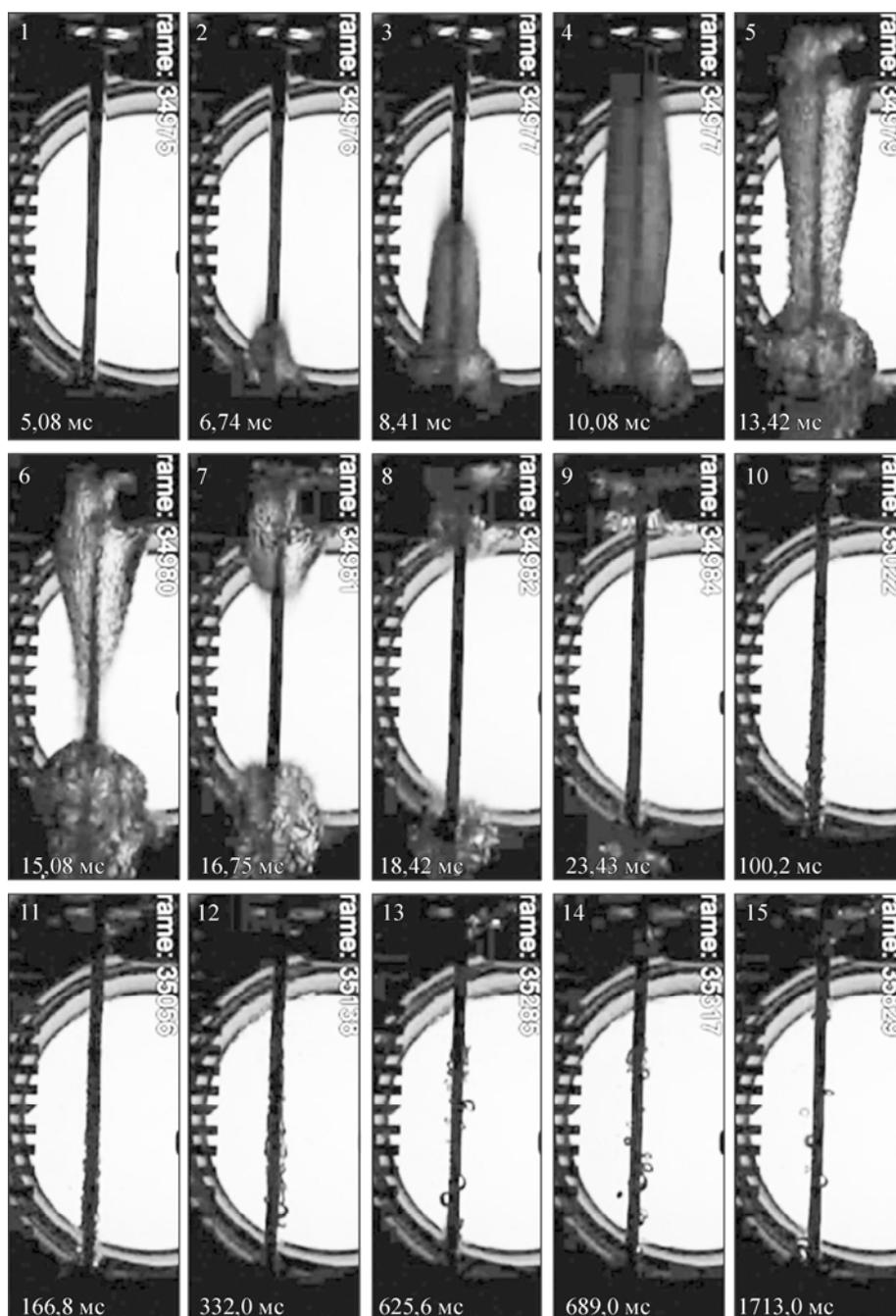


Рис. 1. Кадры видеосъемок процесса возникновения третьего кризиса теплоотдачи.

Ацетон; $T_{\text{нас}} = 304 \text{ K}$, $\Delta T_{\text{в}} = 115 \text{ K}$, $q_{\text{в}} = 58 \text{ кВт/м}^2$, $\Delta T_{\text{нед}} = 9,6 \text{ K}$.

в режиме пузырькового кипения, а на верхней части — в режиме пленочного кипения. При сосуществовании на теплоотдающей поверхности режимов пузырькового и пленочного кипения фиксация кризиса теплоотдачи по росту средней температуры рабочего участка представлялась затруднительной, поскольку увеличение температуры в зоне пленочного кипения компенсировалось ее снижением в зоне пузырькового кипения. В этих случаях пороговые значения третьего кризиса теплоотдачи определялись по

началу формирования устойчивых очагов пленочного кипения. Фиксация этих процессов проводилась с помощью скоростной видеосъемки.

Использование инициатора вскипания и рабочего участка с теплоотдающей поверхностью, обедненной готовыми центрами парообразования, позволило исследовать влияние недогрева на динамику парообразования при заданных значениях перегрева перед вскипанием. На рис. 2 приведены данные по скорости распространения фронта испарения, полученные при давлениях в рабочем объеме от 28 до 46 кПа в условиях насыщения и недогрева при вертикальном расположении теплоотдающей поверхности. Здесь же для сравнения приведены данные работы [11] для случая горизонтального расположения теплоотдающей поверхности. Разброс данных обусловлен влиянием давления на скорость фронта испарения и погрешностью измерений. Изменение ориентации теплоотдающей поверхности относительно гравитационных сил и изменение недогрева жидкости в рабочем объеме до температуры насыщения не оказывало существенного влияния на скорость распространения фронта испарения. На рис. 2 приведены также результаты расчетов по моделям для фронта испарения, предложенных в работах [22–24]. Расчетные кривые по каждой модели проведены для давлений 28 и 46 кПа.

В зависимости от наличия на теплоотдающей поверхности готовых центров парообразования взрывное кипение и третий кризис теплоотдачи реализуются в широком диапазоне перегрева перед вскипанием — от порогового значения перегрева до предельного перегрева жидкости. В связи с этим проводились исследования влияния недогрева для нижней границы области реализации взрывного кипения и третьего кризиса теплоотдачи. На рис. 3 приведены данные по влиянию недогрева на пороговые значения плотности тепловых потоков для фронтов испарения (символы 3) и третьего кризиса теплоотдачи (символы 1, 2) при вертикальном расположении теплоотдающей поверхности.

Экспериментальные исследования пороговых значений являются довольно трудоемким процессом, поскольку необходимо проводить несколько опытов (в ряде случаев до десяти) для измерения одного порогового значения с требуемой точностью. Кроме того, после каждого опыта перегрев теплоотдающей поверхности перед вскипанием существенно снижается из-за увеличения количества готовых центров парообразования вследствие гетерогенного кипения. Для достижения высоких значений перегрева перед вскипанием нужно проводить приработку теплоотдающей поверхности после каждого опыта с целью уменьшения количества готовых центров парообразования.

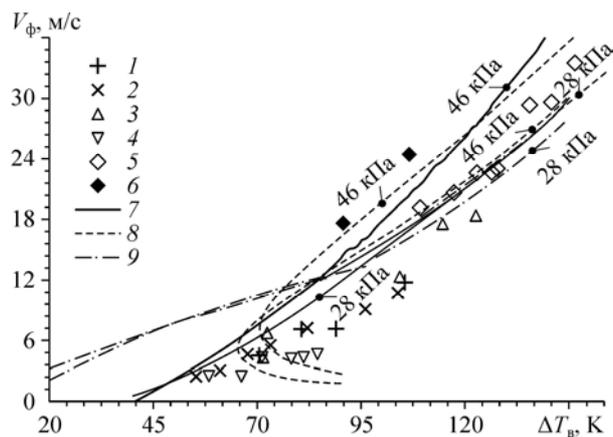
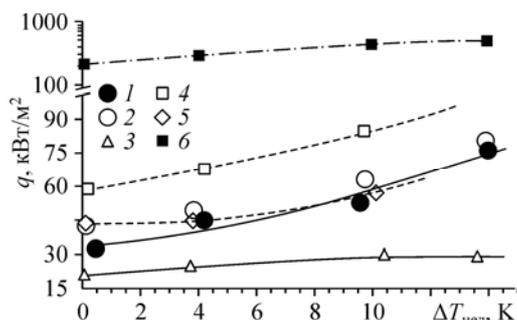


Рис. 2. Зависимость скорости фронта испарения от перегрева перед вскипанием.
 Ацетон; давление 28–46 кПа;
 вертикальный рабочий участок: насыщение (1), недогрев 4 (2), 8 (3), 10 (4) К;
 горизонтальный рабочий участок [11]: насыщение (5), недогрев 18 К (6);
 расчеты по моделям [23] (7), [24] (8), [22] (9).

Рис. 3. Пороговые значения плотностей тепловых потоков для фронтов испарения (3, 5) и третьего кризиса теплоотдачи (1, 2, 4) в зависимости от недогрева.

Ацетон; давление 20–46 кПа;
вертикальный рабочий участок: 1–3;
горизонтальный рабочий участок [11]: 4 и 5;
6 — первая критическая плотность теплового потока (расчет по формуле из работы [25]).



Пороговые значения плотности теплового потока для фронтов испарения ниже пороговых значений плотностей теплового потока для третьего кризиса теплоотдачи (рис. 3). Необходимым, но недостаточным условием возникновения третьего кризиса теплоотдачи является взрывное кипение, когда вследствие распространения фронтов испарения вдоль теплоотдающей поверхности формируется паровое образование, изолирующее теплоотдающую поверхность от жидкости в рабочем объеме. Достаточным условием является сохранение паровой пленки, образовавшейся в результате распространения фронтов испарения, после частичного разрушения парового образования при недогреве. На рис. 3 символом 1 обозначены пороговые значения для третьего кризиса теплоотдачи, которые диагностировались по формированию устойчивых очагов пленочного кипения с помощью скоростной видеосъемки. Символом 2 обозначены пороговые значения для третьего кризиса теплоотдачи, которые диагностировались по росту средней температуры рабочего участка. При недогревах, больших 5 К, обе методики измерений давали близкие значения. На рисунке приведены также результаты расчетов первой критической плотности теплового потока в зависимости от недогрева по формуле из работы [25]. Можно видеть, что в условиях недогрева пороговые значения плотностей теплового потока при третьем кризисе теплоотдачи получаются существенно ниже значений, имеющих место при первом кризисе теплоотдачи.

Таким образом, проведенные исследования динамики взрывного кипения и третьего кризиса теплоотдачи на вертикальной поверхности показали, что изменение ориентации теплоотдающей поверхности относительно сил гравитации не оказывает существенного влияния на динамику фронта испарения и на пороговые значения перегревов при насыщении и недогреве. Более низкие пороговые значения плотности теплового потока, в сравнении с горизонтальным расположением, обусловлены особенностями теплообмена в режиме однофазной естественной конвекции при вертикальном расположении теплоотдающей поверхности.

Список литературы

1. Volmer M. Kinetik der Phasenbildung. Dresden, Leipzig: Steinkopf Verl., 1939. 220 p.
2. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975. 502 с.
3. Сеницын Е.Н. Об интерпретации опытов по вскипанию перегретой жидкости в стеклянных капиллярах // Теплофизические свойства метастабильных систем. Свердловск: УРО АН СССР, 1984. С. 61–67.
4. 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.
5. 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.
6. Rallis C.J., Jawurek H.H. Latent heat transport in saturated nucleate boiling // Int. J. Heat Mass Transfer. 1964. Vol. 7, No. 10. P. 1051–1068.
7. Авксентюк Б.П., Бобрович Г.И., Кутателадзе С.С., Москвичева В.Н. О вырождении режима пузырькового кипения в условиях свободной конвекции // Прикладная механика и техническая физика. 1972. № 1. С. 69–73.
8. 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.

9. Kutateladze S.S., Avksentyuk B.P. Heat transfer crises in liquid helium // *Cryogenics*. 1979. Vol. 19, No. 5. P. 285–288.
10. Avksentyuk B.P., Ovchinnikov V.V. A study of evaporation structure at high superheatings // *Russian J. of Engng Thermophysics*. 1993. Vol. 3, No. 1. P. 21–39.
11. Avksentyuk B.P., Ovchinnikov V.V. Explosive boiling and transient regimes // *J. of Engng Thermophysics*. 2003. Vol. 12, No. 2. P. 99–130.
12. Shepherd J.E., Sturtevant B. Rapid evaporation at the superheat limit // *J. Fluid Mech.* 1982. Vol. 121. P. 379–402.
13. Авксентюк Б.П., Кутателадзе С.С. Неустойчивость режима теплообмена на поверхностях обеднённых центрами парообразования // *Теплофизика высоких температур*. 1977. Т. 15, № 1. С. 115–120.
14. Zhukov S.A., Barelko V.V. Dynamic and structural aspects of the processes of single-phase convective heat transfer metastable regime decay and bubble boiling formation // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1992. Vol. 35, No. 4. P. 759–775.
15. Mitrovic J., Fauser J. Propagation of boiling fronts along horizontally arranged heated tubes // *Chemical Engng Research and Design*. 2001. Vol. 79, iss. 4. P. 363–370.
16. Okuyama K., Kim J.H., Mori S., Iida Y. Boiling propagation of water on a smooth film heater surface // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2006. Vol. 49, iss. 13–14. P. 2207–2214.
17. Pavlenko A.N., Tairov E.A., Zhukov V.E., Levin A.A., Tsoi A.N. Investigation of transient processes at liquid boiling under nonstationary heat generation conditions // *J. of Engng Thermophysics*. 2011. Vol. 20, No. 4. P. 380–406.
18. Покусаев Б.Г., Некрасов Д.А., Таиров Э.А. Моделирование вскипания недогретых воды и этанола в условиях импульсного тепловыделения в стенке // *Теплофизика высоких температур*. 2012. Т. 50, № 1. С. 89–95.
19. Nakoryakov V.E., Misyura S.Y. Bubble boiling in droplets of water and lithium bromide water solution // *J. of Engng Thermophysics*. 2016. Vol. 25, No. 1. P. 24–31.
20. Авксентюк Б.П., Овчинников В.В. Третий кризис теплоотдачи при недогреве // *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т. 15, № 2. С. 281–289.
21. Авксентюк Б.П., Овчинников В.В. Исследование третьего кризиса теплоотдачи на вертикальной поверхности // *Теплофизика и аэромеханика*. 2012. Т. 19, № 2. С. 135–142.
22. Павленко А.Н., Лель В.В. Приближенная расчетная модель самоподдерживающегося фронта испарения // *Теплофизика и аэромеханика*. 1999. Т. 6, № 1. С. 111–124.
23. Avksentyuk B.P. Dynamics of Explosive Boiling // *Int. J. of Fluid Mechanics Research*. 2001. Vol. 27, No. 5. P. 587–610.
24. Актершев С.П., Овчинников В.В. Модель стационарного движения межфазной поверхности в слое сильно перегретой жидкости // *Прикладная механика и техническая физика*. 2008. Т. 49, № 2. С. 47–55.
25. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.–Л.: Машгиз, 1962. 456 с.

*Статья поступила в редакцию 5 октября 2016 г.,
после доработки — 17 ноября 2016 г.*