

УДК 536. 248

РАСПРОСТРАНЕННЫЙ КРИЗИС ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ТЕЧЕНИИ НЕДОГРЕТЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Б.П. АВКСЕНТЮК, В.В. ОВЧИННИКОВ

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Предлагается гипотеза о единстве механизмов возникновения распространённого кризиса теплоотдачи (РКТ) при вынужденном течении и третьего кризиса теплоотдачи в условиях естественной конвекции. При дефиците готовых центров парообразования на теплоотдающей поверхности перегрев пристенной жидкости относительно температуры насыщения может превысить пороговое значение, при котором возникают фронты испарения при плотностях тепловых потоков q , существенно меньших критических плотностей тепловых потоков при обычных кризисах теплоотдачи. Если q достаточно велика для того, чтобы испарить остаточный слой жидкости, изолированный от основной массы жидкости паровым образованием, то возникнет РКТ. Предложена расчетная зависимость, которая в пределах погрешности эксперимента описывает нижнюю границу области, где возможна реализация РКТ при вынужденном течении недогретой жидкости.

Одним из наиболее эффективных и простых способов отвода высоких плотностей тепловых потоков при малых перегревах теплоотдающей поверхности является пузырьковый режим кипения жидкостей. Однако высокая интенсивность теплосъема сохраняется только до некоторой плотности теплового потока (критической), при которой происходит так называемый кризис теплоотдачи — резкое ухудшение теплообмена вследствие образования на теплоотдающей поверхности устойчивой паровой пленки. Для систем с контролем плотности теплового потока при кризисе теплоотдачи происходит быстрый рост температуры теплоотдающей поверхности, что может привести к ее разрушению. Безаварийная работа устройств с жидкостным теплоносителем в значительной степени определяется правильным выбором режимных параметров, исключающим возможность возникновения кризиса теплоотдачи — нарушения контакта жидкости с теплонапряженной поверхностью.

Для решения проблемы отвода большой плотности теплового потока от компонентов термоядерного реактора были проведены экспериментальные исследования критических плотностей теплового потока при низких давлениях, высоких скоростях потока теплоносителя и высоких недогревах [1 – 3]. Результаты этих работ явились проверкой правильности существующих моделей для описания кризиса теплоотдачи при вынужденном течении недогретой жидкости. Анализы, проведенные в этих исследованиях, показали, что большинство моделей не способны дать удовлетворительный расчет критической плотности теплового потока при вынужденном течении недогретой жидкости в области низких давлений. Исключение составила модель, изложенная в [4,

5]*, которая с точностью $\pm 25\%$ описывает большинство имеющихся в литературе экспериментальных данных по критическим плотностям теплового потока при вынужденном течении в широком диапазоне режимных параметров (диаметры труб от 0,3 до 8 мм, массовые расходы от 500 до 40000 кг/(м²·с), давление от 0,1 до 20 МПа, недогревы теплоносителя от 0 до 149 К).

Однако при исследовании кризисов теплоотдачи при больших недогревах и высоких скоростях течения этилового спирта [7] наряду с обычными кризисами (когда ухудшению теплоотдачи предшествует режим развитого пузырькового кипения) наблюдались кризисы, для которых характерны необычно низкие значения критических плотностей тепловых потоков. Кризис возникал в любой части обогреваемой трубы, иногда по всей длине трубы одновременно, поэтому этот процесс был назван автором [7] распространенным кризисом теплоотдачи (РКТ). Отмечалось слабое влияние недогрева на значения критических плотностей тепловых потоков для данной разновидности кризисов.

В работе [3], где проводились экспериментальные исследования кризисов теплоотдачи при вынужденном течении недогретой воды в трубах малых диаметров (от 0,3 до 2,7 мм), в нескольких сериях опытов также наблюдались распространенные кризисы теплоотдачи. Значения критических плотностей тепловых потоков в этих случаях были более чем на 20 % ниже таковых при обычном кризисе теплоотдачи. РКТ появлялся либо в момент начала парообразования на теплоотдающей поверхности, либо при немного более высоких плотностях тепловых потоков. Этот кризис мог возникать как при увеличении теплового потока, так и при стационарных условиях. Однако во всех случаях он развивался, когда на некоторой области теплоотдающей поверхности, свободной от пузырей, происходил процесс вскипания.

В отличие от обычного кризиса теплоотдачи значения критической плотности теплового потока при РКТ не зависят от основных режимных параметров (массового потока, недогрева, давления) [3]. Авторы последней работы отмечают, что средняя шероховатость теплоотдающих поверхностей трубок, для которых имел место РКТ, была в четыре раза меньше, чем для трубок, где РКТ не возникал. Увеличение шероховатости способствует стабилизации процесса пузырькового кипения, что предотвращает возникновение распространенного кризиса теплоотдачи. В [3] высказано предположение, что такие РКТ есть результат неустойчивости, обусловленной процессом вскипания: либо термогидравлической, либо неустойчивости спонтанного типа зародышеобразования.

Наличие РКТ является существенным препятствием для использования в практике высокоскоростных потоков недогретой до температуры насыщения жидкости [3], поэтому представляется важным понять механизм его возникновения и определить область режимных параметров, при которых возможна его реализация.

Чтобы понять механизм, обуславливающий возникновение РКТ в условиях вынужденного течения недогретой жидкости, обратимся к некоторым результатам исследований кризисов теплоотдачи в условиях естественной конвекции. Для жидких металлов характерно нестабильное пузырьковое кипение, и в зависимости от состояния теплоотдающей поверхности возможно изменение значений критических плотностей теплового потока в несколько раз [8 – 11]. Чем меньше действующих центров парообразования на теплоотдающей поверхности, тем ниже значения критических плотностей теплового потока. Для металлов стабильного кипения и кризисов теплоотдачи при раз-

* В статье [4] в выражении для k_1 из [6] допущена опечатка (вместо P напечатана плотность жидкости ρ). В связи с этим в [2] на основании неверного расчета сделан ошибочный вывод о несоответствии модели экспериментальным данным.

витом пузырьковым кипении удавалось достигнуть лишь на поверхностях с искусственными центрами парообразования резервуарного типа [8].

Для органических жидкостей низкие значения критических плотностей теплового потока наблюдались на поверхностях, обедненных центрами парообразования при субатмосферных давлениях [9 – 11]. Как для металлических, так и для неметаллических жидкостей данной разновидности кризиса предшествовал либо режим однофазной конвекции (третий кризис теплоотдачи), либо режим неразвитого пузырькового кипения (кризис теплоотдачи при нестационарном кипении).

В работах [9 – 16] было показано, что возникновение кризиса теплоотдачи в условиях естественной конвекции обусловлено потерей устойчивости пузырьковой структуры парообразования. При перегревах пристенной жидкости относительно температур насыщения, превышающих пороговые значения, на поверхности паровых пузырьков, растущих на нагревателе, развивается неустойчивость. Это приводит к формированию фронтов испарения, которые распространяются вдоль теплоотдающей поверхности с высокой скоростью (десятки метров в секунду). Под термином “фронт испарения” подразумевается лобовая часть поверхности парового образования, растущего в метастабильной жидкости с постоянной во времени скоростью. Чем выше уровень метастабильности жидкости, тем на более ранней стадии роста парового пузыря формируются фронты испарения, тем выше скорость их распространения.

На рис. 1 показаны кадры с киноплёнки, иллюстрирующие процесс распространения фронта испарения вдоль нагревателя для этанола при атмосферном давлении и недогреве 59 К. Светлый фон — жидкость, горизонтальная темная полоса — нагреватель. С обеих сторон первичного пузыря видны конусообразные паровые образования. Их рост обусловлен распространением фронтов испарения. Скорость фронта испарения в этом опыте была равна 10,3 м/с.

При низких давлениях пороговые значения перегревов, выше которых пузырьковая структура парообразования теряет устойчивость с последующим формированием фронтов испарения, существенно ниже предельных перегревов жидкостей. Например, для бензола при давлении $P = 10^4$ Па пороговый перегрев (ΔT^*) равен 70 К [13], тогда как предельный перегрев (ΔT_l) составляет величину порядка 210 К.

На теплоотдающей поверхности, обедненной готовыми центрами парообразования, перегрев пристенной жидкости перед вскипанием может превысить пороговые значения. В этом случае при вскипании вследствие потери устойчивости на поверхности растущего парового пузыря сформируются фронты испарения, которые распространяются вдоль всей теплоотдающей поверхности с высокой ско-

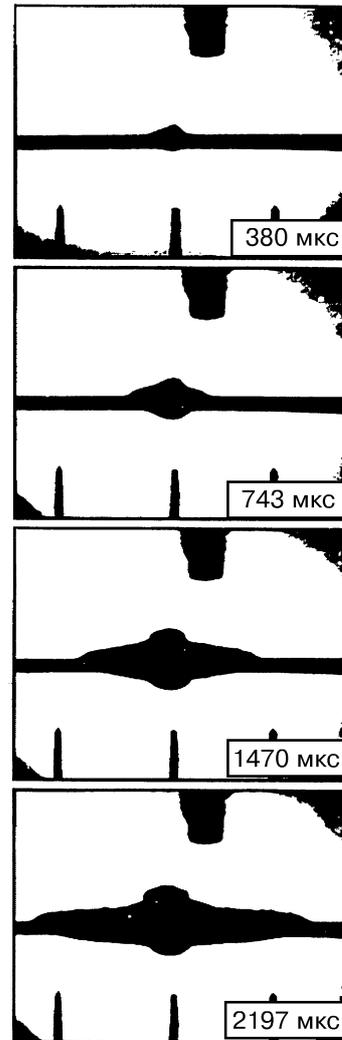


Рис. 1. Фотографии вскипания этанола при атмосферном давлении и недогреве 59 К.

ростью. Остаточный слой жидкости на нагревателе, изолированный от основной массы паровым образованием, испарится, и на теплоотдающей поверхности установится режим пленочного кипения. Весь процесс развития третьего кризиса теплоотдачи от вскипания до установления пленочного кипения можно видеть на кинокадрах, приведенных в цитированных работах.

Если в условиях естественной конвекции на одном или нескольких готовых центрах парообразования произойдет вскипание при перегревах ниже пороговых значений, то на этих центрах будут расти обычные паровые пузыри. С увеличением плотности теплового потока возрастет и температура пристенной жидкости. Если на теплоотдающей поверхности готовых центров парообразования недостаточно для того, чтобы обеспечить пузырьковое кипение на всей теплоотдающей поверхности при плотностях тепловых потоков, превышающих минимальные значения, выше которых возможен третий кризис теплоотдачи, то на части теплоотдающей поверхности, не занятой паровыми пузырями, температура пристенной жидкости может превысить пороговое значение. В таком случае при вскипании на этой части теплоотдающей поверхности возникнут фронты испарения. Остаточный слой жидкости на части теплоотдающей поверхности окажется изолированным от основной массы жидкости паровым образованием. Если плотность теплового потока достаточно велика, чтобы испарить остаточный слой жидкости до отрыва парового образования от нагревателя, то возникнет кризис теплоотдачи при нестабильном кипении.

Следует отметить, что в условиях естественной конвекции значения пороговых перегревов, выше которых возможно возникновение третьего кризиса теплоотдачи, несколько превышают значения пороговых перегревов, выше которых возникает неустойчивость пузырьковой структуры парообразования. Особенно велико это различие для воды [17]. Вследствие высоких значений теплоты парообразования, для воды требуются более высокие плотности теплового потока для испарения остаточного слоя жидкости. В работе [17] было показано, что при вскипании в воде при перегревах, больших пороговых значений, когда возникает неустойчивость пузырьковой структуры парообразования, но меньших пороговых значений, когда возникает третий кризис теплоотдачи, испарение остаточного слоя жидкости и установление на теплоотдающей поверхности пленочного кипения происходят при плотностях тепловых потоков порядка 10^6 Вт/м² и выше.

Поскольку распространенные кризисы теплоотдачи при вынужденном течении недогретой воды возникали при вскипании [3], то естественно предположить, что их появление при вынужденном течении обусловлено, как и в условиях естественной конвекции, потерей устойчивости пузырьковой структурой парообразования с последующим распространением фронтов испарения. Если РКТ возникал после однофазной конвекции, то имел место третий кризис теплоотдачи; если же он появлялся при вскипании на некоторой области теплоотдающей поверхности, свободной от пузырей, то наблюдался кризис теплоотдачи при нестабильном кипении. Область, где возможна реализация третьего кризиса теплоотдачи при вынужденном течении, ограничена снизу пороговыми значениями перегревов, выше которых вскипание приводит к возникновению фронтов испарения, а сверху — величинами предельных перегревов. Граничные значения критических плотностей тепловых потоков рассчитываются по соответствующим формулам для однофазной конвекции при ΔT^* и ΔT_c . Нижняя граница для критических плотностей тепловых потоков для кризисов теплоотдачи при нестабильном кипении та же, что и для третьего кризиса, а верхняя соответствует обычным кризисам при развитом кипении.

Все данные по РКТ, приведенные в работе [3], получены при скоростях жидкости, соответствующих турбулентному режиму течения. Для этих условий нижняя граница области, где возможна реализация РКТ при вынужденном течении, может быть рассчитана по формуле для теплоотдачи при турбулентном режиме [18], где перегрев теплоотдающей поверхности относительно температуры насыщения принят равным пороговому значению перегрева, выше которого возникает неустойчивость пузырьковой структуры парообразования:

$$q_{cr \min} = \frac{Gc_p \left(\Delta T^* + \Delta T_{\text{sub}} \right) \xi / 8}{k_1 + k_2 \sqrt{\xi / 8} \left(\text{Pr}^{2/3} - 1 \right)}, \quad (1)$$

где $k_1 = 1 + 3,4\xi$, $k_2 = 11,7 + 1,8\text{Pr}^{-1/3}$, $\xi = (1,82\lg\text{Re} - 1,64)^{-2}$, G — массовая скорость, c_p — теплоемкость жидкости, ΔT_{sub} — недогрев жидкости, Pr — число Прандтля, Re — число Рейнольдса.

Для воды пороговый перегрев, выше которого формируются фронты испарения, экспериментально определен лишь при давлении $P = 2 \cdot 10^3$ Па [17]. Его значение составило 50 К. Влияние давления на значения пороговых перегревов, согласно работам [19, 20], не очень существенно. На рис. 2 приведено сопоставление экспериментальных данных по критическим плотностям тепловых потоков при РКТ [3] с расчетами по вышеприведенной формуле при пороговом перегреве $\Delta T^* = 50$ К и рассчитанном по модели [21] для фронта испарения. Видно, что зависимость (1) в пределах погрешности эксперимента описывает нижнюю границу области, где возможна реализация распространенного кризиса теплоотдачи при вынужденном течении недогретой жидкости.

В заключение отметим, что согласно модели [4, 5] причиной возникновения обычных кризисов как при вынужденном течении, так и в условиях большого объема являются также фронты испарения, возникающие в результате потери устойчивости пузырьковой структуры парообразования. Если при РКТ появлению фронтов испарения предшествует либо режим однофазной конвекции (третий кризис теплоотдачи), либо режим неразвитого пузырькового кипения (кризис теплоотдачи при нестабильном кипении), то при обычных кризисах — это режим развитого пузырькового кипения. Для предотвращения возникновения РКТ необходимо на теплоотдающей поверхности обеспечить достаточное для развитого пузырькового кипения количество готовых центров парообразования при плотностях тепловых потоков, превышающих $q_{cr \min}$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 98-02-17588).

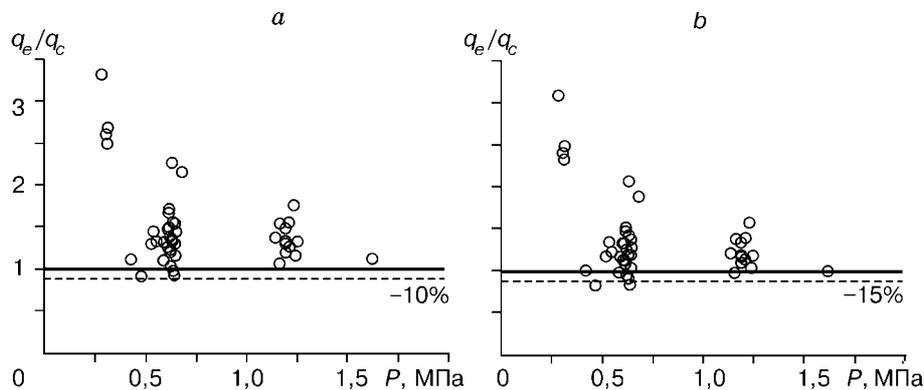


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных значений критических плотностей тепловых потоков при распространенном кризисе теплоотдачи [3] с расчетными данными по формуле (1) при $\Delta T^* = 50$ К (а) и рассчитанном по модели [21] (б).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Boyd R.D.** Subcooled water flow boiling experiments under uniform high heat flux conditions // Fusion Technol. — 1988. — Vol. 13. — P. 131 – 142.
2. **Celata G.P., Cumo M., Mariani A.** Burnout in highly subcooled water flow boiling in small diameter tubes // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1993. — Vol. 36, No. 5. — P. 1269 – 1285.
3. **Vandervort C.L., Bergles A.E., Jensen M.K.** An experimental study of critical heat flux in very high heat flux subcooling boiling // Ibid. — 1994. — Vol. 37, Suppl. 1. — P. 161 – 173.
4. **Авксентюк Б.П.** Критические тепловые потоки при вынужденном течении недогретых и насыщенных жидкостей // Теплоэнергетика. — 1988. — № 12. — С. 43 – 46.
5. **Avksentyuk B.P., Ovchinnikov V.V.** Burnout model for pool and forced flow boiling // Two-Phase Flow Modeling And Experimentation 1995. Vol. 2 / Eds. G. P. Celata and R. K. Shah. — 1995. — P. 1205 – 1210.
6. **Маленков И.Г.** О роли газообразной фазы в механизме кризиса кипения при естественной конвекции // ТВТ. — 1968. — Т. 6, № 2. — С. 277 – 279.
7. **Штоколов Л.С.** Кризис теплообмена при кипении этилового спирта в области больших скоростей течения // Инж.-физ. журн. — 1964. — Т. 7, № 12. — С. 3 – 7.
8. **Субботин В.И., Сорокин Д.Н., Овечкин Д.М., Кудрявцев А.П.** Теплообмен при кипении металлов в условиях естественной конвекции. — М.: Наука, 1969. — 209 с.
9. **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.
10. **Авксентюк Б.П.** Критические тепловые потоки при неустойчивом кипении в условиях свободной конвекции. Вопросы гидродинамики и теплообмена. — Новосибирск, 1972. — С. 177 – 187. — (Сб. науч. тр. / Ин-т теплофизики СО АН СССР).
11. **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 & Mass Transfer. Vol. 7 / Eds. O.E. Dwyer. — Oxford; New York: Pergamon Press, 1973. — P. 355 – 362.
12. **Авксентюк Б.П., Овчинников В.В., Плотников В.Я.** Динамика вскипания жидкости в области высоких перегревов // Теплообмен в парогенераторах: Материалы Всесоюз. конф. — Новосибирск, 1988. — С. 304 – 308.
13. **Авксентюк Б.П., Овчинников В.В., Плотников В.Я.** Самоподдерживающийся фронт вскипания // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1989. — № 2. — С. 17 – 23.
14. **Авксентюк Б.П., Овчинников В.В., Плотников В.Я.** Самоподдерживающийся фронт вскипания и третий кризис кипения // Нестационарные процессы в двухфазных потоках. — Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1989. — С. 52 – 68.
15. **Avksentyuk B.P., Ovchinnikov V.V., Plotnikov V.Ja.** Dynamics effects on interface surface during the disintegration of superheated nearwall liquid // Proc. Int. Cent. Heat Mass Transfer (Phase — Interface Phenom. Multiphase Flow). — 1991. — Vol. 33. — P. 583 – 598.
16. **Avksentyuk B.P., Ovchinnikov V.V.** A study of evaporation structure at high superheating // Russian J. Engin. Thermophys. — 1993. — Vol. 3, No. 1. — P. 21 – 39.
17. **Avksentyuk B.P., Ovchinnikov V.V.** A study of a transient critical heat flux to water on the surface depleted of nucleation sites // Proc. 4th World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Vol. 2. — Piza, 1997. — P. 615 – 620.
18. **Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А.** Теплообмен в ядерных энергетических установках. — М.: Атомиздат, 1974. — 408 с.
19. **Mitrovic J., Fauser J.** Transition from single-phase convection of superheated liquids into a stable boiling mode // The Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation: Proc. of Int. Symp. — Moscow, Russia, 1997. — P. 61 – 65.
20. **Fauser J., Mitrovic J.** Some features of boiling fronts on heated surfaces // Heat Transfer 1998: Proc. of 11th IHTC. Vol. 2. Kyongju, Korea, 1998. — P. 377 – 382.
21. **Avksentyuk B.P., Ovchinnikov V.V.** A heterogeneous boiling dynamics of benzene at superheats close to the limit // The Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation: Proc. of Int. Symp. — Moscow, Russia, 1997. — P. 229 – 234.

Статья поступила в редакцию 25 сентября 1998 г.