

В.И. Деев, К.В. Куценко, А.А. Лаврухин, Тхей Лвин У, В.С. Харитонов

Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Россия

ТЕПЛОТДАЧА И КРИЗИС КИПЕНИЯ ВОДЫ ПРИ БЫСТРОМ НАГРЕВЕ ТЕПЛОТДАЮЩЕЙ СТЕНКИ

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты экспериментального исследования теплоотдачи от проволочного нагревателя, погруженного в большой объем насыщенной воды при атмосферном давлении, в условиях ступенчатого увеличения мощности нагрева. Определены параметры кризиса нестационарной теплоотдачи, включающие критические значения плотности теплового потока, температурного напора и интервала времени от момента наброса тепловой нагрузки до начала перехода от пузырькового кипения к пленочному. Полученные экспериментальные данные сравниваются с результатами расчета критического интервала времени по предлагаемой авторами приближенной физической модели кризиса теплообмена.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (грант 05-08-01477).

1. ВВЕДЕНИЕ

Закономерности протекания нестационарных тепловых процессов в энергетическом оборудовании в значительной мере определяют вероятность возникновения аварийной ситуации, а также ее возможные последствия. В связи с этим при проектировании ядерных реакторов типа ВВЭР выбор минимально необходимого запаса до кризиса теплообмена как одного из основных критериев, обеспечивающих безопасность эксплуатации ЯЭУ, должен проводиться с учетом возможных временных отклонений мощности энерговыделения в активной зоне реактора от номинального уровня. Быстрое увеличение тепловой нагрузки на поверхности твэлов может произойти, например, при неконтролируемом скачке реактивности ядерного реактора, что может привести к так называемой реактивностной аварии.

В данной работе исследовались теплоотдача и кризис кипения воды, в условиях быстрого увеличения тепловой нагрузки, на поверхности горизонтальной платиновой проволоки диаметром 0.1 мм, по которой пропускаться импульс электрического тока большой длительности. Выделяемая в проволоке тепловая мощность, изменялась скачком от нулевого уровня и оставалась практически постоянной в течение измерений вплоть до возникновения кризиса теплообмена. Изменение температуры поверхности проволоки в процессе нестационарной теплоотдачи определялось по изменению электрического сопротивления. Тепловой поток, передаваемый от нагреваемой стенки жидкости, рассчитывался из уравнения теплового баланса с учетом мощности, расходуемой на нагрев проволоки. По найденным для каждого момента времени значениям плотности теплового потока и разности темпера-

тур стенки и жидкости вычислялся коэффициент теплоотдачи. Момент возникновения кризиса кипения фиксировался по резкому увеличению темпа роста температуры теплоотдающей стенки с течением времени. В предварительных опытах изучались закономерности теплоотдачи к воде при стационарном подводе тепла, при этом тепловая нагрузка на поверхности проволоки постепенно увеличивалась небольшими ступенями.

Относительная погрешность при измерении интервалов времени была менее 1 %. Согласно проведенным оценкам суммарная погрешность при определении плотности теплового потока составила не более 8 %. Разность между средней температурой платиновой проволоки и температурой воды измерялась с погрешностью около 2 К. Расчетная оценка отличия средней температуры от температуры теплоотдающей поверхности показала, что эта величина во всех экспериментах не превышала 0.7 К.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Стационарный подвод тепловой мощности

В опытах со стационарным нагревом в области докризисных режимов теплообмена получена зависимость коэффициента теплоотдачи к кипящей воде от плотности теплового потока, которую можно описать уравнением:

$$\alpha_{ст} = 0.137q^{0.9}. \quad (1)$$

Значение критического теплового потока в этом случае в среднем составило 0.7 МВт/м². По сравнению с рекомендуемыми для технических поверхностей нагрева зависимостями более высокая степень влияния плотности теплового потока на коэффициент теплоотдачи в уравнении (1) объясняется особенностями пузырькового кипения воды на горизонтальной поверхности малого диаметра. При высоких тепловых нагрузках полученные нами значения коэффициента теплоотдачи вполне удовлетворительно согласуются с упомянутыми расчетными рекомендациями. В хорошем соответствии с данными [1] находится установленное в опытах значение стационарного критического теплового потока.

2.2. Ступенчатый наброс мощности нагрева

По данным экспериментов с нестационарным нагревом теплоотдающей стенки получены динамические кривые, показывающие зависимость температуры нагревателя и плотности теплового потока на поверхности стенки от времени. Типичный при-

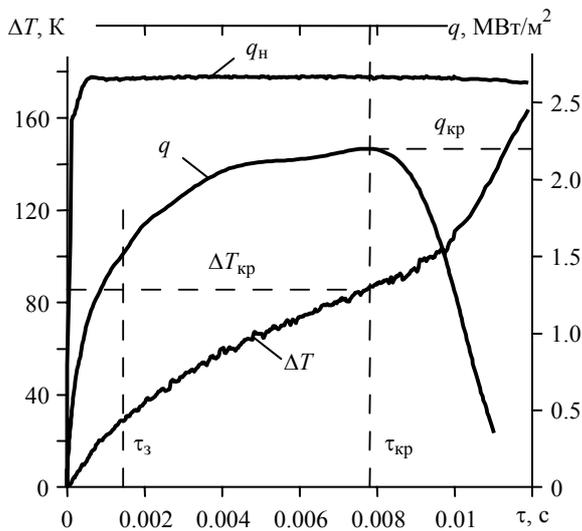


Рис. 1. Динамические кривые параметров нестационарного теплового процесса при набросе тепловой нагрузки $q_n = 2.66 \text{ MW/m}^2$

мер таких кривых для одного из исследованных в опытах режимов приведен на рис. 1.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что при скачкообразном увеличении мощности от нуля до заданного уровня на поверхности нагрева происходит последовательная смена различных режимов теплообмена. На начальной стадии нестационарного теплового процесса передача тепла от нагревателя осуществляется молекулярной теплопроводностью, в окружающей его неподвижной воде. Зафиксированные в опытах перегревы теплоотдающей стенки, хорошо описываются расчетными соотношениями для этого режима. Здесь интенсивность теплопередачи уменьшается, приблизительно, обратно пропорционально квадратному корню из значения текущего времени.

После закипания жидкости на поверхности нагрева наступает следующая стадия нестационарного процесса – стадия переходного кипения. Если набрасываемая тепловая нагрузка меньше стационарного критического теплового потока, то конечным итогом этой стадии является установление устойчивого режима пузырькового кипения с высоким уровнем теплоотдачи. При тепловых нагрузках, превышающих критическую плотность теплового потока для условий стационарного нагрева, возникает режим, который можно классифицировать как режим теплообмена при метастабильном пузырьковом кипении. Последний завершается кризисом теплоотдачи с достаточно быстрым и значительным ростом температуры стенки вследствие перехода к пленочному кипению. Характер динамических кривых, соответствующих стадии метастабильного пузырькового кипения, сильно зависит от величины набрасываемой тепловой нагрузки. Если эта нагрузка, значительно, превышает стационарный критический тепловой поток, то стадия метастабильного пузырькового кипения занимает весьма малый промежуток времени (см. рис. 1).

Перегрев стенки в таких случаях непрерывно и плавно увеличивается, при этом пульсации ее температуры не превышают нескольких градусов. В момент наступления кризиса теплообмена растущие на поверхности нагрева паровые пузыри сливаются в сплошную пленку, не успевая оторваться от греющей стенки. В режимах, когда набрасываемая мощность лишь немного выше критической для стационарных условий, наблюдаются значительные пульсации температуры нагревателя (рис. 2), вызванные сильным перемешиванием жидкости в пристенном слое отрывающимися от поверхности нагрева паровыми пузырями. Продолжительность таких режимов может составить значительную величину порядка нескольких десятков, сотен и даже тысяч миллисекунд. Плотность теплового потока на поверхности нагрева в течение всего периода метастабильного пузырькового кипения в этих случаях практически равна набрасываемой тепловой нагрузке.

Полученные в экспериментах данные позволили выявить основные закономерности теплоотдачи при метастабильном пузырьковом кипении. Когда набрасываемая тепловая нагрузка близка к значению стационарного критического теплового потока, в течение переходного процесса наблюдаются сильные колебания интенсивности теплообмена – от уровня теплоотдачи путем теплопроводности до уровня, соответствующего стационарному пузырьковому кипению. При высоких тепловых нагрузках коэффициент теплоотдачи непрерывно уменьшается со временем и лишь немного выше значений, рассчитанных по уравнению теплопроводности.

Значительное различие временных масштабов, в которых протекает процесс метастабильного пузырькового кипения при умеренных и высоких значениях набрасываемой тепловой мощности, обуславливает неодинаковый механизм возникновения кризиса теплоотдачи на поверхности нагрева.

В первом случае (умеренные нагрузки) паровые пузыри успевают до наступления кризиса многократно оторваться от греющей стенки, а кризис теп-

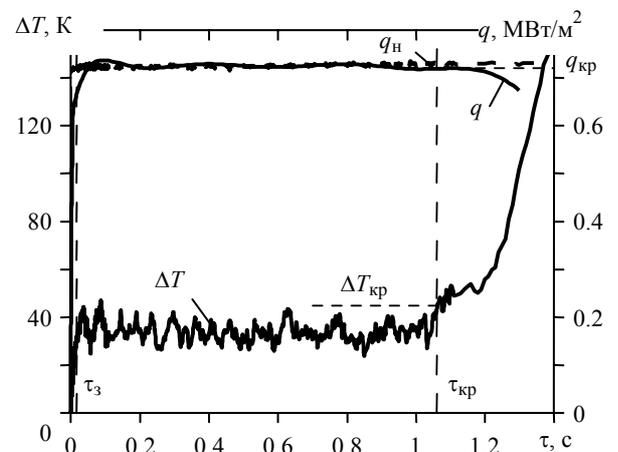


Рис. 2. Характер изменения параметров нестационарного теплового процесса со временем при набросе тепловой нагрузки $q_n = 0.725 \text{ MW/m}^2$

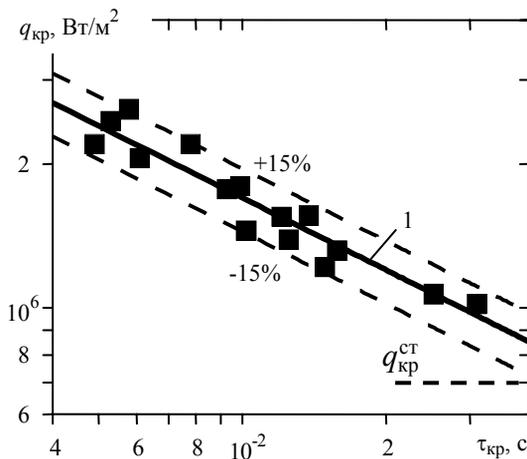


Рис. 3. Функциональная связь между критическим тепловым потоком и интервалом времени до наступления кризиса теплообмена: 1 – расчет по уравнению (2)

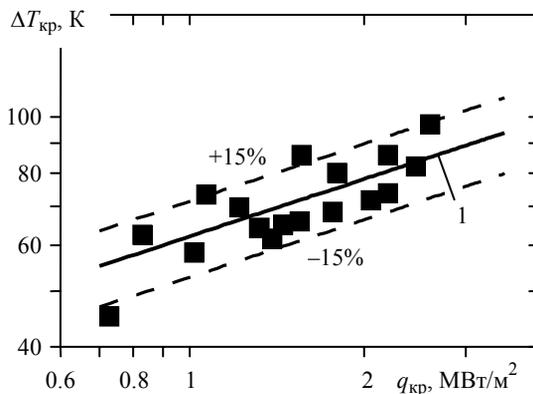


Рис. 4. Связь между критическими значениями плотности теплового потока и температурного напора: 1 – расчет по уравнению (3)

лоотдачи связан с предельным насыщением паром двухфазного пристенного слоя.

Во втором же случае (высокие нагрузки) кризис кипения наступает в результате слияния расположенных близко друг к другу паровых пузырей в сплошную паровую пленку непосредственно на теплоотдающей поверхности. Явление кризиса метастабильного пузырькового кипения в таких режимах определяется совокупностью критических параметров, к которым следует отнести плотность теплового потока, температурный напор и интервал времени от момента наброса нагрузки до достижения кризиса. Критическая плотность теплового потока может значительно (в несколько раз) превышать аналогичную величину, получаемую при стационарном нагреве, однако при этом резко сокращается критический интервал времени. В качестве иллюстрации на рис. 3 приведены наши опытные данные, полученные в диапазоне набрасываемых тепловых нагрузок 1.0...3.4 МВт/м². Представленные здесь результаты с погрешностью ±15% можно описать зависимостью

$$q_{кр} = 1.7 \cdot 10^5 \tau_{кр}^{-0.5} \quad (2)$$

Связь между тепловым потоком и температурным напором в момент возникновения кризиса нестационарной теплоотдачи показана на рис. 4. Экспериментальные данные следуют зависимости:

$$\Delta T_{кр} = 0.65 q_{кр}^{0.33} \quad (3)$$

3. МОДЕЛЬ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА

Представленные здесь экспериментальные данные о параметрах кризиса теплообмена при быстром увеличении плотности теплового потока на поверхности нагрева интересно сравнить с результатами расчета по приближенной физической модели кризиса метастабильного пузырькового кипения, которая ранее была разработана авторами и успешно применена к криогенным жидкостям [2]. Результаты дальнейшего развития этой модели применительно к кризису теплообмена при кипении воды приведены в работе [3].

В модели предполагается, что при высоких уровнях набрасываемой мощности тепловыделения в стенке растущие на ней паровые пузыри сливаются друг с другом, не успевая вырасти до отрывного размера. Образование сплошной паровой пленки, отделяющей поверхность нагрева от жидкости, приводит к кризису теплообмена. При выводе расчетных соотношений принимается, что количество паровых пузырей, образующихся на греющей стенке в единицу времени, пропорционально доле поверхности, не занятой паром, при этом вероятность возникновения центра кипения на каждом свободном от пара участке одинакова. На основе этих представлений получено аналитическое выражение для зависимости плотности центров парообразования от времени, а также установлено количественное соотношение между интервалом времени от момента начала кипения до возникновения кризиса теплообмена и тепловой энергией, отведенной в жидкость, за этот же промежуток времени. Для заданного закона роста паровых пузырей в виде $R(\tau) = f(\text{Ja})\sqrt{a\tau}$ из соображений теплового баланса следует основное уравнение модели:

$$\int_0^{\tau_{сл}} q(\tau) \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\tau}{\tau_{сл}}\right) \right] d\tau = 1.12 r p'' f(\text{Ja}) \sqrt{a \tau_{сл}} \quad (4)$$

Уравнение (4) дает возможность по найденным в экспериментах зависимостям $q(\tau)$ и $\Delta T(\tau)$ сначала определить момент времени, при котором происходит слияние пузырей в сплошную паровую пленку $\tau_{сл}$, а затем и критический интервал времени $\tau_{кр}$, равный сумме τ_3 и $\tau_{сл}$. На рис. 5 приведено сравнение результатов расчетов по уравнению (4), с опытными данными. В расчетах использовался закон роста паровых пузырей из работы [4], при этом числа Ja вычислялись по значениям ΔT , которые равнялись средне интегральным за период роста пузырей температурным напорам, умноженным на 0.75. Видно хорошее согласование результатов, выполненных расчетов с данными проведенных экспериментов.

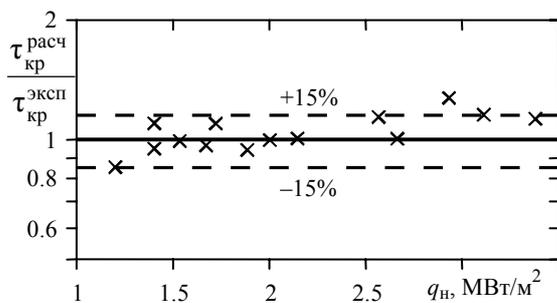


Рис. 5. Сравнение расчетных значений критического интервала времени с данными экспериментов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные авторами эксперименты и анализ полученных результатов на основе предложенной ранее физической модели позволяет сделать следующие основные выводы.

Наброс тепловой нагрузки выше стационарного критического теплового потока, приблизительно в полтора раза, вызывает быстрый нагрев теплоотдающей стенки в насыщенной воде и приводит к кризису метастабильного пузырькового кипения. Такой кризис имеет тепловую природу, и наступает спустя короткий промежуток времени вследствие слияния в сплошную пленку растущих на поверхности нагрева паровых пузырей без их отрыва от стенки. Основными параметрами, определяющими кризис теплообмена в этом случае, являются связанные между собой критические значения плотности теплового потока, температурного напора и интервала времени до наступления кризиса. Интенсивность теплообмена в таких режимах метастабильного пузырькового кипения лишь немного выше уровня теплоотдачи путем теплопроводности в неподвижной среде.

Если набрасываемая тепловая нагрузка превышает стационарный критический тепловой поток на небольшую величину, то метастабильное пузырьковое кипение с отрывом паровых пузырей от теплоотдающей стенки может продолжаться достаточно долго (до нескольких секунд). Теплоотдача от стенки при этом неустойчива и колеблется между уровнями теплоотдачи в режимах теплопроводности и стационарного пузырькового кипения.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

$Ja = c_p \rho \Delta T / (r \rho'')$ – число Якоба;

q – плотность теплового потока на поверхности нагрева, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$q_{\text{кр}}$ – критический тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

q_n – набрасываемая тепловая нагрузка, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

R – радиус парового пузыря, м ;

r – скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$;

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;

ΔT – перегрев теплоотдающей стенки, К ;

$\Delta T_{\text{кр}}$ – критический температурный напор, К ;

ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ'' – плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$;

τ – время, с ;

τ_3 – момент закипания жидкости, с ;

$\tau_{\text{кр}}$ – критический интервал времени, с ;

$\tau_{\text{сл}}$ – момент слияния паровых пузырей в сплошную пленку, с .

Индексы:

расч – расчетная величина;

ст – стационарная величина;

эксп – экспериментальная величина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бобрович Г.И., Гогонин И.И., Кутателадзе С.С.** Влияние размера поверхности нагрева на критический тепловой поток при кипении в большом объеме жидкости // ПМТФ. 1964. № 4. С. 137, 138.
2. **Transient boiling crisis of cryogenic liquids / V.I. Deev, V.S. Kharitonov, K.V. Kutsenko, A.A. Lavrukhin** // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. Vol. 47/25. P. 5477–5482.
3. **Кризис кипения воды при быстром изменении мощности тепловыделения / В.И. Деев, К.В. Куценко, А.А. Лаврухин и др.** // Тр. XXVIII-го Сибирского теплофизического семинара. Новосибирск, Институт теплофизики СО РАН, 2005. СТС-XXVIII. Статья № 036 (электронная форма).
4. **Лабунцов Д.А., Ягов В.В.** К вопросу о скорости роста паровых пузырей при кипении // Тр. МЭИ. М.: МЭИ, 1975. Вып. 268. С. 3–15.