

УДК 536.242

Ковецкая М.М., Домашев В.Е., Ковецкая Ю.Ю.

Институт технической теплофизики НАН Украины

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕМ КАНАЛЕ ПРИ НАБРОСЕ МОЩНОСТИ

Приведено результати дослідження кризи теплообміну в каналах в нестационарних режимах зі збільшенням потужності.

Представлены результаты исследования кризиса теплообмена в каналах в нестационарных режимах с увеличением мощности.

The works out investigation conditions rise of crisis heat exchange in channels of non stationary regimes with increase power.

$C_p$  – теплоемкость;  
 $D$  – диаметр;  
 $T$  – температура;  
 $l$  – длина;  
 $p$  – давление;  
 $q$  – плотность теплового потока;  
 $w$  – скорость потока;  
 $x$  – паросодержание;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\tau$  – время.

### Индексы нижние:

$w$  – стенка;  
 $вх$  – вход;  
 $кр$  – критический;  
 $нк$  – начало кипения;  
 $р$  – расчетный;  
 $ст$  – стационарный;  
 $э$  – экспериментальный;  
 $0$  – начальное значение;  
 $1$  – вода;  
 $2$  – пар.

Исследования нестационарных процессов теплообмена в переходных и аварийных режимах ядерных энергетических установок имеют важное значение для безопасности АЭС. В течение нескольких десятилетий продолжается изучение кризиса теплообмена при кипении в условиях нестационарного энерговыделения [1, 2]. В нестационарных условиях возникновение кризиса теплообмена в каналах определяется начальным значением тепловой мощности, скоростью ее изменения, недогревом теплоносителя до температуры насыщения, массовой скоростью. Различные авторы представляют различные подходы к проведению исследований и обобщению данных, разработке математических моделей для расчета критических тепловых потоков и их верификации.

Большинство экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что при течении теплоносителя в обогреваемых каналах в нестационарных режимах при резком увеличении тепловой мощности, критический тепловой по-

ток может превышать критический тепловой поток в стационарных режимах либо совпадать с ним. Это дает некий запас по предельной тепловой нагрузке в активной зоне водоохлаждаемых ядерных реакторов и основание для использования в расчетах аварийных режимов зависимостей для критического теплового потока, полученных на основе экспериментальных данных для стационарных условий. Однако исследования механизмов возникновения кризиса теплообмена в нестационарных режимах не прекращаются [3 – 6]. Однако вопрос о возможности использования квазистационарного приближения при разных законах изменения плотности теплового потока на стенке канала остается открытым. В работе [6] дана оценка использования зависимостей, полученных авторами работ [1, 7, 8], для расчета кризиса теплообмена в нестационарных режимах с набросом мощности. Оценки показывают, что в диапазоне давлений от 9,8 до 14 МПа зависимости для  $q_{кр}$ , представленные в работах [7, 8]

дают результаты на 20...40 % заниженные, по сравнению с экспериментальными данными. Зависимость для  $q_{кр}$  работы [1] дает хорошее совпадение с экспериментальными данными только для давления 9,8 МПа, для более высокого давления формула дает завышенные по сравнению с экспериментальными данными результаты.

В работе исследуются условия возникновения кризиса теплообмена при течении воды в вертикальной обогреваемой трубе в нестационарных режимах с увеличением тепловой мощности на основе экспериментальных данных, полученных авторами работы [9]. Экспериментальные данные получены при течении воды в трубе диаметром 8 мм, длиной 0,5 м для давлений 9,8 МПа, 13,7 МПа в диапазоне изменения массовой скорости 1000...2000 кг/м<sup>2</sup>с в условиях равномерной по длине трубы тепловой нагрузки. В трубу подавалась вода недогретая до температуры насыщения. Нестационарные режимы характеризуются различной величиной температуры недогрева на входе, набрасываемой мощности и скорости изменения мощности. Начальные значения параметров теплоносителя и экспериментальные значения критических тепловых потоков  $q_{кр(э)}$  представлены в табл. 1, 2. Увеличение плотности теплового потока на стенке канала осуществлялось по линейному закону при скорости изменения теплового потока в диапазоне от 0,1 до 0,69 МВт/(м<sup>2</sup>с)

$$q_w = q_0 + a_q \Delta\tau,$$

где  $a_q = dq/d\tau$ ,  $\Delta\tau$  – шаг по времени. Момент возникновения кризиса теплообмена фиксировался по резкому увеличению темпа роста температуры стенки.

Для определения изменения во времени теплогидравлических характеристик теплоносителя использовалась одномерная нестационарная частично неравновесная математическая модель, представленная в работе [6]. Для расчета критического теплового потока  $q_{кр(p)}$  использовалась следующая зависимость, полученная в диапазоне изменения параметров  $p = 3...20$  МПа,  $\rho w = 200...5000$  кг/(м<sup>2</sup>с) [9]

$$q_{кр} = q_{кр}^{cd} A_f k_p A_1 (\rho w)^{0,25} \left[ 1 - 0,045(\rho w)^{0,5} x \right], \quad (1)$$

$$k_p = 0,67 + \frac{0,72}{22,1 - p}, \quad A_1 = \begin{cases} 1^{-0,2}, & 1/D < 20 \\ 0,26, & 1/D > 20 \end{cases}$$

$$q_{кр}^{cd} = 7r \sqrt{a_1 f(p) \rho \rho_2} 10^{-6}, \quad a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 C_{p1}}$$

$$f(p) = 60 - 2,167(p - 2), \quad \text{для } 2 < p < 16,$$

где давление  $p$  задается в МПа,  $q$  – в МВт/м<sup>2</sup>,  $l$  – в мм.

Использование зависимости (1) для расчета кризиса теплообмена в вертикальных каналах в нестационарных режимах с падением расхода теплоносителя дало удовлетворительные результаты [10]. Однако, использование этой

Табл. 1. Значения параметров в режимах с массовой скоростью  $\rho w = 2000$  кг/(м<sup>2</sup>с)

№ реж	p, МПа	$T_{вх}$ , °С	$q_0$ , МВт/м <sup>2</sup>	$q_{кр(э)}$ , МВт/м <sup>2</sup>	$q_{кр(p)}$ , МВт/м <sup>2</sup>	$q_{кр1}$ , МВт/м <sup>2</sup>	$A_f$	$q_{кр}/q_{нк}$	$x_{кр}$	$\tau_{кр}$ , с	$K_q$
1	9,8	228	0,748	2,58	2,320	2,831	0,731	1,90	0,214	2,71	0,904
2	9,8	225	1,391	2,53	2,505	2,462	0,731	1,82	0,191	2,30	0,356
3	9,8	230	1,917	2,49	2,410	2,310	0,731	1,84	0,204	1,03	0,290
4	13,7	200	0,717	2,87	2,905	2,712	0,655	1,23	0,051	6,11	0,491
5	13,7	198	1,366	2,97	2,979	2,286	0,697	1,22	0,067	5,23	0,225
6	13,7	201	1,855	2,81	2,876	2,461	0,632	1,17	0,037	3,52	0,146
7	13,7	242	0,742	2,41	2,401	2,551	0,697	1,29	0,150	2,01	1,107
8	13,7	244	1,445	2,45	2,454	1,876	0,756	1,38	0,171	1,46	0,476
9	13,7	244	1,901	2,42	2,463	1,677	0,737	1,27	0,158	0,90	0,304

Табл. 2. Значения параметров в режимах с массовой скоростью  $\rho w = 1000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$

№ реж	$p$ , МПа	$T_{\text{вх}}$ , °С	$q_0$ , МВт/м <sup>2</sup>	$q_{\text{кр}(\text{э})}$ , МВт/м <sup>2</sup>	$q_{\text{кр}(p)}$ , МВт/м <sup>2</sup>	$q_{\text{кр}1}$ , МВт/м <sup>2</sup>	$A_f$	$q_{\text{кр}}/q_{\text{нк}}$	$x_{\text{кр}}$	$\tau_{\text{кр}}$ , с	$K_q$
1	9,8	218	0,437	1,90	1,898	1,974	1,06	2,00	0,434	8,21	0,407
2	9,8	221	0,910	1,83	1,845	1,874	0,96	1,95	0,417	5,08	0,199
3	9,8	223	1,103	1,84	1,829	1,798	1,00	1,98	0,429	3,43	0,197
4	13,7	237	0,334	1,39	1,356	2,005	0,478	1,53	0,224	4,86	0,650
5	13,7	238	0,661	1,47	1,431	1,502	0,561	1,58	0,272	3,47	0,352
6	13,7	244	0,854	1,40	1,444	1,358	0,561	1,55	0,268	3,12	0,205
7	13,7	265	0,275	1,41	1,398	1,451	0,737	1,62	0,383	6,25	0,662
8	13,7	260	0,540	1,35	1,369	1,252	0,609	1,67	0,324	4,73	0,317
9	13,7	258	0,773	1,31	1,303	1,353	0,534	1,68	0,291	2,51	0,277
10	13,7	287	1,140	1,18	1,184	0,908	0,609	2,03	0,375	2,76	0,108
11	13,7	275	0,822	1,37	1,388	0,855	0,811	1,98	0,414	4,84	0,137
12	13,7	271	0,607	1,35	1,364	0,957	0,717	2,04	0,382	7,06	0,137

зависимости для расчета  $q_{\text{кр}}$  в режимах с набросом мощности позволяет получить хорошее совпадение с экспериментальными значениями только для режимов с  $p = 9,8 \text{ МПа}$ ,  $\rho w = 1000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$  (табл. 2, режимы 1–3). В этом случае поправочный коэффициент в формуле (1)  $A_f \cong 1$ . В режимах с давлением 9,8 МПа и массовой скоростью 2000 кг/(м<sup>2</sup>с) получено превышение расчетных значений  $q_{\text{кр}}(p)$  по сравнению с  $q_{\text{кр}(\text{э})}$  на 27 % (табл. 1, режимы 1–3). Для более высокого давления  $p = 13,7 \text{ МПа}$  превышение расчетных значений критического теплового потока над экспериментальными составляет 20...50 % в зависимости от значений выходного паросодержания в момент кризиса. Особенно большое превышение – около 50 % в режимах 4–6 (табл. 2). Поэтому для совпадения расчетных и экспериментальных значений  $q_{\text{кр}}$  в зависимость (1) был введен поправочный коэффициент  $A_f$ , значения которого представлены в таблицах.

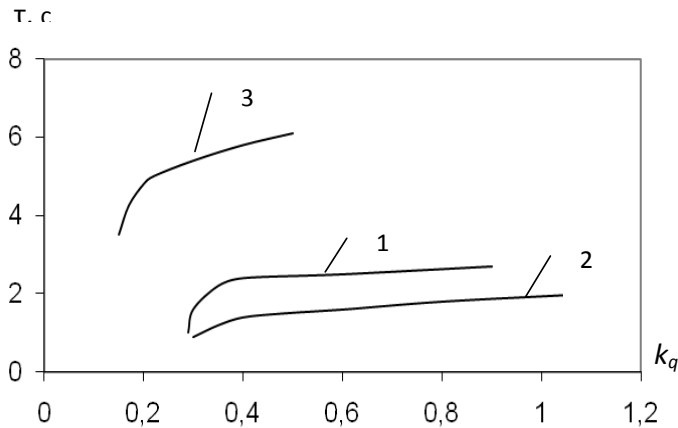
В работах [2,3] рекомендуется для расчета критического теплового потока в нестационарных режимах использовать критерий тепловой нестационарности  $K_q = q_0^{-1} dq/d\tau$ . Тогда  $q_{\text{кр}}$  в нестационарном режиме рассчитывается по формуле

$$q_{\text{кр}1} = q_{\text{кр}(\text{ст})} + K_q, \quad (2)$$

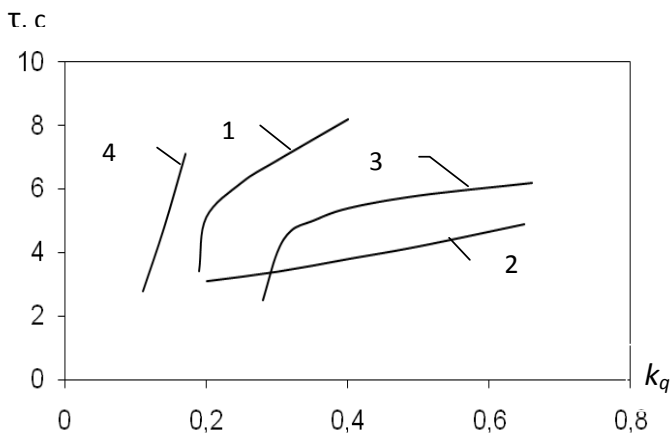
где  $q_{\text{кр}(\text{ст})}$  – значения критического теплового потока в стационарном режиме. В табл. 1, 2 представлены значения  $q_{\text{кр}1}$ , рассчитанные по формуле (2) со значениями  $q_{\text{кр}(\text{ст})}$ , взятыми из базы данных по кризису теплообмена [11]. В режимах с массовой скоростью 2000 кг/(м<sup>2</sup>с) (табл. 1) превышение  $q_{\text{кр}1}$  по сравнению с  $q_{\text{кр}(\text{э})}$  получено для малых начальных значений  $q_0 \cong 0,7 \text{ МВт}/\text{м}^2$  (режимы 1, 4, 7). В остальных режимах получено  $q_{\text{кр}1} < q_{\text{кр}(\text{э})}$ , причем максимальная разница достигает 30 %. В режимах с массовой скоростью 1000 кг/(м<sup>2</sup>с) (табл. 2)  $q_{\text{кр}1} > q_{\text{кр}(\text{э})}$  в режимах 1,4 при значениях  $q_0 \cong 0,4 \text{ МВт}/\text{м}^2$ . В остальных режимах  $q_{\text{кр}1} \leq q_{\text{кр}(\text{э})}$ , причем наибольшая разница составляет 37 % (режим 11).

Определение величины времени до наступления кризиса теплообмена  $\tau_{\text{кр}}$  в нестационарных режимах и зависимость  $\tau_{\text{кр}}$  от параметров процесса представляет большой практический интерес. На рис. 1, 2 представлено изменение  $\tau_{\text{кр}}$  в зависимости от параметра  $K_q$ , давления, массовой скорости и критического паросодержания.

Для больших массовых скоростей и  $x_{\text{кр}} > 0,1$  время до кризиса слабо зависит от параметра



**Рис. 1. Изменение  $\tau_{кр}$  от параметра нестационарности для режимов с  $\rho w = 2000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ : 1 –  $p = 9,8 \text{ МПа}$ ,  $x_{кр} = 0,10...0,21$ ; 2 –  $p = 13,7 \text{ МПа}$ ,  $x_{кр} = 0,15...0,17$ ; 3 –  $p = 13,7 \text{ МПа}$ ,  $x_{кр} = 0,037...0,067$ .**



**Рис. 2. Изменение  $\tau_{кр}$  от параметра нестационарности для режимов с  $\rho w = 1000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ : 1 –  $p = 9,8 \text{ МПа}$ ,  $x_{кр} = 0,42...0,43$ ; 2 –  $p = 13,7 \text{ МПа}$ ,  $x_{кр} = 0,22...0,27$ ; 3 –  $p = 13,7 \text{ МПа}$ ,  $x_{кр} = 0,29...0,38$ ; 4 –  $p = 13,7 \text{ МПа}$ ,  $x_{кр} = 0,37...0,41$ .**

$K_q$  (кривые 1, 2, рис. 1). Для режимов с  $x_{кр} < 0,1$  зависимость  $\tau_{кр}$  от  $K_q$  более сильная, при этом время до наступления кризиса теплообмена увеличивается за счет увеличения времени, затрачиваемого на рост температуры теплоносителя до температуры начала кипения. Для массовой скорости  $1000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$  и давления  $13,7 \text{ МПа}$

время до кризиса существенно зависит как от параметра  $K_q$  так и от выходного паросодержания в момент кризиса (кривые 2 – 4, рис. 2). Наиболее сильная зависимость  $\tau_{кр}$  от  $K_q$  наблюдается в режимах с  $x_{кр} \cong 0,4$  (кривые 1, 4 рис. 2) поскольку в этом случае наблюдается кризис теплообмена второго рода, обусловленный истощением пристенной пленки жидкости. В этих режимах время до кризиса существенно зависит от исходного стационарного состояния потока. Если в стационарном режиме в канале сформировался дисперсно-кольцевой режим течения, то время до кризиса меньше по сравнению с режимами в которых в начальный момент реализовался пузырьковый режим течения или режим конвективного теплообмена.

На основании многочисленных экспериментальных исследований автором работы [1] было высказано предположение о том, что отношение критической плотности теплового потока к плотности теплового потока, соответствующего началу кипения, есть величина постоянная. В табл. 1,2 представлено отношение  $q_{кр(э)} / q_{нк}$ , которое определялось в расчетах по достижению температуры теплоносителя температуры начала кипения, рассчитанного по формуле (5) работы [6]. Для давления  $9,8 \text{ МПа}$  отношение  $q_{кр(э)} / q_{нк}$  практически не зависит от массовой скорости, критерия нестационарности  $K_q$  и слабо зависит от критического паросодержания ( табл. 1,2 реж. 1 – 3). Эту зависимость можно представить в виде

$$q_{кр(э)} / q_{нк} = 1,74 + 0,6x_{кр} \quad (3)$$

В режимах с давлением  $13,7 \text{ МПа}$  и массовой скоростью  $1000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$  условие постоянства  $q_{кр(э)} / q_{нк}$  выполняется только для режимов 10–12 (табл. 2). Для всех остальных режимов с давлением  $13,7 \text{ МПа}$  наблюдается уменьшение величины  $q_{кр(э)} / q_{нк}$  с уменьшением паросодержания. Однако ограниченный объем экспериментальных данных по кризису теплообмена в нестационарных режимах не позволяет сделать окончательный вывод о характере зависимости величины  $q_{кр(э)} / q_{нк}$  от режимных параметров.

### Выводы

1. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений критического теплового потока в нестационарном режиме с набросом мощности для двух значений давления 9,8 МПа и 13,7 МПа показало:

– формула (1) для расчета  $q_{кр}$  может быть использована только в режиме с давлением 9,8 МПа, массовой скоростью 1000 кг/(м<sup>2</sup>с), при давлении 13,7 МПа она дает завышенные на 20...50 % по сравнению с экспериментом результаты и для ее использования нужно вводить поправочный коэффициент;

– использование зависимости (2) для определения  $q_{кр}$  позволяет делать оценочные расчеты, но показывает как завышенные, так и заниженные до 30 % расчетные значения по сравнению с экспериментальными.

2. Время до возникновения кризиса теплообмена зависит от режима течения и теплообмена в исходном стационарном состоянии и от критерия нестационарности  $K_q$ . Для режимов с массовой скоростью 2000 кг/(м<sup>2</sup>с) и критическим паросодержанием  $x_{кр} > 0,1$  время до кризиса слабо зависит от  $K_q$ .

3. Отношение  $q_{кр(э)}/q_{нк}$  практически не зависит от массовой скорости, паросодержания и критерия нестационарности в режимах с давлением 9,8 МПа. В остальных режимах наблюдается слабая зависимость  $q_{кр(э)}/q_{нк}$  от  $x_{кр}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. – Киев.: Наук. думка. – 1980. – 316 с.

2. Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.

3. Ключников А.А., Шараевский И.Г., Фиалко Н.М., Зимин Л.Б., Шараевская Е.И. Теплофизика аварий ядерных реакторов. – Чернобыль. Институт проблем безопасности АЭС. – 2012. – 528 с.

4. Стаханова А.А., Варава А.Н., Дедов А.В., Комов А.Т. Исследование теплообмена при импульсном нагреве модельных фрагментов оболочек твэлов // Теплоэнергетика. – 2011. – № 7. – С. 65–72.

5. Деев В.И., Куценко К.В., Лаврухин А.А. и др. Теплоотдача и кризис кипения воды при быстром нагреве теплоотдающей стенки // Труды РНКТ – 4. М.: МЭИ. – 2006. – Т. 4. – С. 79–82.

6. Ковецкая М.М. Кризис теплообмена в парогенерирующих каналах в нестационарных режимах с увеличением мощности // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33, № 3. – С. 60–64.

7. Смолин В.Н., Поляков В.К. Критический тепловой поток при продольном обтекании пучка стержней // Теплоэнергетика. – 1967. – № 4. – С. 54–58.

8. Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. – М.: ИКЦ «Академкнига». – 2004. – 255 с.

9. Толубинский В.И., Домашев Е.Д., Годунов В.Ф. Повышение кризисных характеристик с помощью искусственной шероховатости на обогреваемых и необогреваемых поверхностях парогенерирующих каналов / Сб. Двухфазные потоки. Теплообмен и гидродинамика. – Л.: Наука. – 1987. – С. 213–232.

10. Ковецкая М.М., Колесниченко Ю.М., Богорош А.Т. Особенности нестационарного кризиса теплообмена в вертикальных парогенерирующих каналах // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29, № 1. – С. 43–48.

11. Кириллов П.Л., Терентьева М.И. Скелетные таблицы по расчету критического теплового потока в трубах для воды. История и версия 2006 г. // Атомная техника за рубежом. – 2008. – № 10. – С.3–18.

Получено 09.07.2012 г.