

УДК 536.642

АРХИПОВ А.П.¹, АВРАМЕНКО А.А.¹,
ВОЛОШИНА И.В.¹, АРХИПОВА Е.А.², СКИЦКО А.И.¹

¹Институт технической теплофизики НАН Украины

²Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ В КАНАЛАХ ПУЧКА СТЕРЖНЕЙ

Проведено експерименти по дослідженню розподілу теплогідрравлічних параметрів у пучку стрижнів в усьому діапазоні зміни ентальпії потоку включно до передкризових режимів тепловіддачі. Представлено методику розрахунку кризи тепловіддачі при бульбашковому кипінні в каналах. Проведено порівняння експериментальних даних стосовно кризи для труб та комірок пучка стрижнів різних авторів. Розроблено рекомендації щодо розрахунку.

Проведены эксперименты по исследованию распределения теплогидравлических параметров в пучке стержней во всём диапазоне изменения энтальпии потока вплоть до предкризисных режимов теплоотдачи. Изложена методика расчёта кризиса теплоотдачи при пузырьковом кипении в каналах. Проведено сравнение экспериментальных данных по кризису теплообмена для труб и для ячеек пучка стержней разных авторов. Выработаны рекомендации по расчёту.

An experimental study of the distribution of heat-hydraulic parameters in a rod bundle over the entire range of changes in the flow enthalpy up to the subcrisis conditions of heat transfer has been carried out. The procedure of calculating the bubble-boiling crisis of heat transfer in channels is described. Comparison of experimental data for heat-exchange crisis for tubes and rod bundle cells of various authors has been performed. Recommendations for calculation are developed.

i – энтальпия;

P – давление;

q – плотность теплового потока;

r – удельная теплота парообразования;

W – скорость;

$$x = \frac{i - i_j}{r} \text{ – относительная энтальпия;}$$

Φ_L – коэффициент из [7];

ν – кинематический коэффициент вязкости;

ρ – плотность;

Δ – среднее арифметическое отклонение;

σ – среднее квадратическое отклонение.

Индексы верхние:

p – расчётный.

Индексы нижние:

d – донор;

n – усреднённое по потоку значение;

vx – входной;

$гр$ – граничный;

$кр$ – критический;

p – расчётный;

ε – экспериментальный;

$я$ – ячейка.

Программа экспериментов по исследованию распределения теплогидравлических параметров в пучке стержней предусматривала проведение опытов во всём диапазоне изменения энтальпии потока вплоть до предкризисных режимов теплоотдачи [1]. Вследствие этого была выполнена серия опытов по определению величины критического теплового потока в исследованном диапазоне режимных параметров. Проведение экспериментов в таком объёме позволило получить и проанализировать распределение теплогидравлических параметров в пучке стержней не-

посредственно перед наступлением кризиса теплоотдачи, в частности, сопоставить величины $q_{кр}$ в элементарной ячейке сборки и в трубе.

Всего был зафиксирован 31 кризис теплоотдачи при кипении в диапазоне режимных параметров: массовая скорость $\rho W_n = 300 \dots 2000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$; давление $P = 6,0 \dots 14,0 \text{ МПа}$; плотность теплового потока $q = 0,3 \dots 2,34 \text{ МВт/м}^2$; массовое паросодержание на выходе во время кризиса $x_{кр} = 0,079 \dots 0,691$.

Результаты опытов сведены в таблицу и обработаны. Поскольку не представлялось возмож-

Табл. 1. Обобщение опытных данных по кризису теплоотдачи

Источник	Число точек, включённых в обобщение	$\Delta_n, \%$	$\sigma_n, \%$
	а) По среднепучковым параметрам		
3	30	-4,6	13,6
4	17	-3,5	9,8
5	17	-0,5	11,5
	б) По расчётным параметрам в «горячей» ячейке		
6	28	63,7	20,7
7	30	23,7	18,0
8	17	54,0	27,8
	в) По опытным параметрам в «горячей» ячейке		
7	30	-0,5	13,6
2	7 ($P = 6,0$ МПа)	-24,5	4,0
2	11 ($P = 9,0$ МПа)	-11,8	3,5
2	10 ($P = 14,0$ МПа)	-5,3	3,0

ным исследовать распределение параметров потока в пучке в момент возникновения кризиса теплоотдачи, значения величин массовой скорости и энтальпии теплоносителя в ячейках получали в предкризисных режимах. Отличия паросодержания x_n в предкризисных режимах от $x_{кр}$ в опытах составляли от 0,015 до 0,051.

Значения массовой скорости и энтальпии теплоносителя в ячейках в момент наступления кризиса получали путём экстраполяции кривых на графиках $\rho W_i / \rho W_n$ и $(x_i - x_n) = f(x_n)$ в сторону увеличения x_n до величины $x_{кр}$. В отсутствие данных при $q = \text{const}$ графики строились по данным, полученным при $x_{вх} = \text{const}$, $q = \text{var} > q_{кр}$. Правомерность представления на одном графике данных при $q = \text{const}$ и $q = \text{var}$ обуславливается тем, что согласно результатам настоящего исследования и выводам других авторов (см. [2, 3, 7]) величина удельной тепловой нагрузки при прочих равных условиях практически не оказывает влияния на распределение теплогидравлических параметров теплоносителя в области положительных значений относительной энтальпии.

Способ установки термопар в стержнях не позволял экспериментально определить ячейку, в которой возникал кризис. Вместе с тем, анализ распределения параметров потока по сечению канала и фиксация в опытах стержней, на которых возникал кризис (девять раз на центральном стержне, в остальных случаях – на периферий-

ных), позволили выделить центральную ячейку как наиболее опасную. Действительно, энтальпия в центральных ячейках всегда максимальная. Сопоставление величин $q_{кр}^p$, рассчитанных, согласно [2], по параметрам потока в каждой из ячеек, показало, что во всех исследованных режимах минимальное значение $q_{кр}^p$ приходится на центральную ячейку. С другой стороны, центральные ячейки выходят как на центральный, так и на периферийные стержни. Предположение о наличии условий для кризиса лишь в боковых и угловых ячейках противоречит факту, неоднократно имевшему место в эксперименте, возникновения его на центральном стержне.

При количественной оценке значения критического теплового потока прежде всего были сопоставлены с результатами расчётов по формулам, базирующимся на среднепучковых параметрах (см. табл. 1). Удовлетворительное согласование всего объёма экспериментальных данных получено с результатами расчётов по формуле Осмачкина В.С. [3]. Также удовлетворительное согласование опытных и расчётных величин $q_{кр}$ имело место при использовании формул Миропольского З.Л. и др. [4] и Смолина В.Н., Полякова В.К. [5], несмотря на то, что при сопоставлении были учтены экспериментальные точки за пределами областей применения формул: по давлению до 14,0 МПа, вместо рекомендованных $P \leq 10,0$ МПа,

и по относительной энтальпии до $x_{кр} \approx 0,3$, вместо $x_{кр} \leq 0,25$.

При дальнейшем анализе опытных данных были проведены расчёты величины $q_{кр}$ по зависимостям, учитывающим тем или иным образом неравномерность распределения теплогидравлических параметров по сечению сборки [6–8] (табл. 1, б)). Следует отметить, что результаты сравнения в последнем случае оказались заметно хуже, чем при использовании в расчётах среднепучковых величин. Этот факт можно объяснить следующим образом. Определённая опытным путём неравномерность распределения теплогидравлических параметров пароводяного потока по сечению пучка значительно отличается от рассчитанной с помощью приближённых поправок, рекомендуемых в работах [6–11]. Неравномерность распределения параметров составляла от 30 до 100% по приросту энтальпии теплоносителя на обогреваемой длине канала в горячей ячейке и от 20 до 30% по массовой скорости в “горячей” ячейке. В связи с чем являются малообоснованными приближённые одномерные методы расчёта распределения теплогидравлических параметров двухфазного потока при течении в таком канале, как стержневая сборка.

Представляется закономерным увеличение отклонений Δ_n и σ_n , после введения в зависимость для $q_{кр}$ [3] коэффициента Φ_L , учитывающего неравномерность распределения энтальпии и массовой скорости теплоносителя по сечению пучка [7]. Однако, если в этой же формуле использовать полученную опытным путём неравномерность распределения теплогидравлических параметров по сечению пучка, отклонение опытных и расчётных величин получается минимальным из всех трёх сопоставлений: $\Delta_n = -0,5\%$, $\sigma_n = 13,6\%$.

В табл. 1, в) представлены результаты сопоставления опытных данных по кризису теплоотдачи в центральной ячейке с рекомендациями для труб [2] как наиболее полно исследованной формы канала. Поводом к такому сопоставлению послужило отсутствие у исследователей единого мнения о возможности распространения корреляций для расчёта $q_{кр}$ в каналах простой формы на пучки стержней. Так, авторы [12,13] считают, что в пределах исследованных ими режимных па-

раметров можно рассчитывать величину $q_{кр}$ в пучках стержней по зависимостям для труб.

Авторы [9–11], используя ячейковый подход, высказывают мнение, что кризис кипения в пучке можно рассчитывать по зависимостям для труб в случае равенства единице предложенных ими коэффициентов неравноценности “горячих” ячеек. Напротив, авторы [6, 14] утверждают, что необходимы разработки специальных корреляций для определения величины критического теплового потока в “горячей” ячейке.

На рис. 1 приведены графики зависимости $q_{кр} = f(x_y)$ для трёх режимов, показывающие, что характер зависимости критического теплового потока в ячейке пучка стержней от режимных параметров удовлетворительно согласуется с рекомендациями для труб.

На этих графиках вертикальными штрихпунктирными линиями показаны границы рекомендованных для труб значений $x_{гр}$. Количественное же сопоставление величин $q_{кр}$ в ячейке и в трубе выявило следующую тенденцию. При высоком давлении ($P = 14,0$ МПа) отличие ячейки стержневой сборки от трубы не сказывается на величине критического теплового потока. С падением давления величина $q_{кр}$ в ячейке уменьшается относительно значений, рекомендованных для труб, при $P = 6,0$ МПа разница между ними составляет 20...30% (см. рис. 2).

Полученное соотношение критических тепловых потоков в трубах и элементарных ячейках пучков стержней, а также влияние на него абсолютного давления, по-видимому, обусловлено факторами, воздействие которых приводит к отличию величин $q_{кр}$ в трубах и кольцевых каналах [15]. Во-первых, специфика формы элементарных ячеек предполагает наличие сравнительно узких мест в зазорах между стержнями. Близкое расположение обогреваемых стенок в них способствует образованию паровых включений, соизмеримых с шириной зазора, и снижению критической плотности теплового потока в области низких давлений. С ростом же давления вероятность образования таких паровых включений снижается вследствие уменьшения удельного объёма пара. Во-вторых, при положительных паросодержаниях проявляется влияние касательных напряжений на границе раздела жидкой и

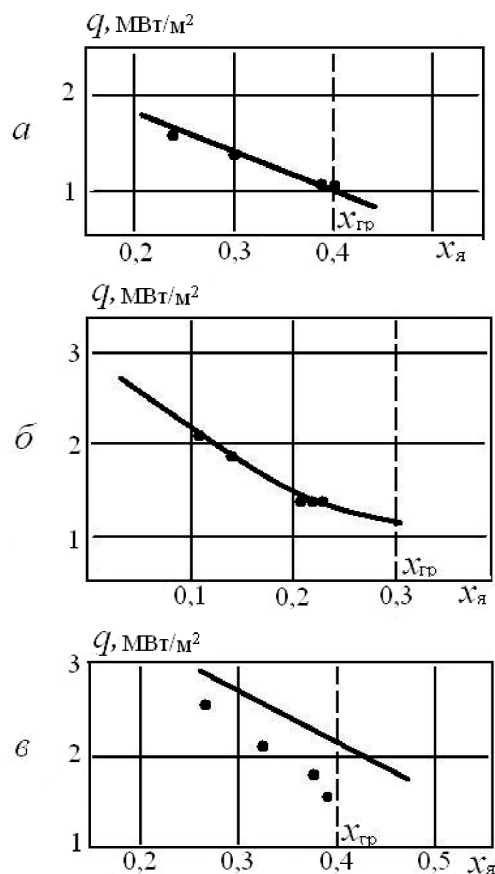


Рис. 1. Сопоставление опытных значений $q_{кр}$ с рекомендованными в [2]: а – $\rho W_n = 1000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, $P = 14,0 \text{ МПа}$; б – $\rho W_n = 1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, $P = 14,0 \text{ МПа}$; в – $\rho W_n = 1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, $P = 9,0 \text{ МПа}$.

паровой фаз, понижающее критический тепловой поток на выпуклых поверхностях по сравнению с вогнутыми. По аналогии с кольцевыми каналами опыты с двухсторонним обогревом показали, что при $x_я > 0$ кризис теплоотдачи возникает раньше на внутренней поверхности [16,17]. С увеличением давления влияние последнего фактора также снижается, ввиду уменьшения величины поверхностного натяжения на границе раздела жидкой и паровой фаз.

Таким образом, исследование кризиса теплоотдачи при кипении в пучке стержней в совокупности с определением параметров потока по ячейкам позволило установить следующее. Соотношения для расчёта критического теплового потока в пучках стержней с одномерным учётом неравномерности распределения теплогидравлических параметров по сечению каналов хуже сог-

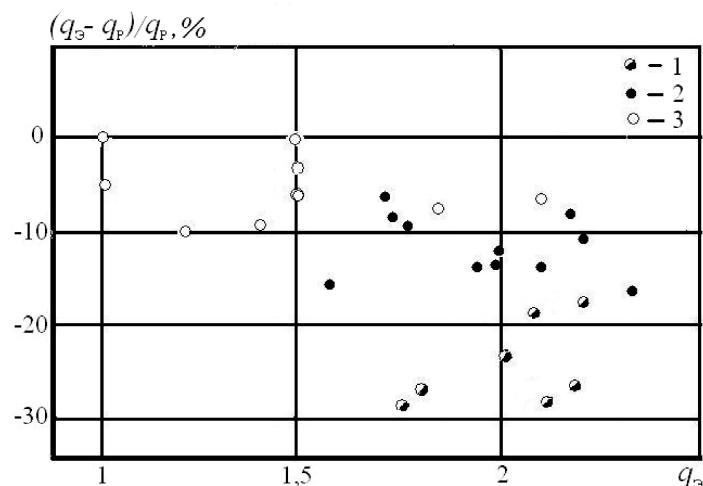


Рис. 2. Сопоставление опытных значений величин $q_{кр}$ в центральной ячейке пучка стержней с рекомендованными для труб согласно [2]: ● – $P = 6,0 \text{ МПа}$; ● – $P = 9,0 \text{ МПа}$, ○ – $P = 14,0 \text{ МПа}$.

ласуются с полученными опытными данными, нежели зависимости, оперирующие среднепучковыми величинами. Более того, сопоставление экспериментальных данных по распределению теплогидравлических параметров пароводяного потока в пучке стержней с результатами расчётов по приближённым полуэмпирическим поправкам, характеризующим теплогидравлическую неравномерность ячеек, показало значительное расхождение опытных и расчётных величин.

Выводы

Представляются малообоснованными приближённые одномерные методы расчёта распределения массовой скорости и энтальпии при течении двухфазного потока в таком канале, как стержневая сборка. Прогресс в рассматриваемом направлении может быть достигнут в результате использования расчётных теплогидравлических программ, обеспечивающих двумерное решение задачи. При этом для определения величины $q_{кр}$ в пучках стержней – судя по полученным в настоящей работе данным – целесообразно использовать формулу Осмачкина В.С. [7], если в неё вместо учитывающего неравноценность ячеек коэффициента Φ_L вводить рассчитанные по программе значения массовой скорости и энтальпии в ячейках.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Архипов А.П., Волошина И.В., Колочко В.Н., Шараевский Г.И.* Разработка и проверка методики исследований энтальпии поперечных потоков между ячейками пучка стержней // Пром. теплотехника. – 2007. – Т. 29, № 7. – С.75–78.
2. *Рекомендации по расчёту кризиса теплоотдачи при кипении воды в круглых трубах.* – Препринт Ин-та высоких температур АН СССР № 1-57. М., – 1980. – 67 с.
3. *Осмачкин В.С.* Кризис теплообмена при движении кипящей воды пучков тепловыделяющих стержней. – Препринт Ин-та атомной энергии № 2014, М., – 1970. – 16 с.
4. *Миропольский З.Л., Семин Э.Г. Виноградова М.Н.* Статистические закономерности при исследовании кризиса теплообмена // Теплоэнергетика. – 1969. – № 7. – С. 49–52.
5. *Смолин В.Н., Поляков В.К.* Критический тепловой поток при продольном обтекании пучка стержней // Теплоэнергетика. – 1967. – № 4. – С.54–58.
6. *Смолин В.Н., Поляков В.К.* Методика расчёта кризиса теплоотдачи при кипении теплоносителя в стержневых сборках. – В сб.: Семинар ТФ-78. Теплофизические исследования для обеспечения надёжности и безопасности ядерных реакторов водо-водяного типа. – Будапешт: 1978. – Т. 2. – С.475–486.
7. *Осмачкин В.С.* Исследование теплогидравлических характеристик моделей топливных сборок реакторов в ИАЭ им. И.В.Курчатова. – В сб.: Исследование критических тепловых потоков в пучках стержней в стационарных и нестационарных режимах теплообмена. – М.: ИАЭ им. И.В.Курчатова, 1974. – С.9–42.
8. *Полянин Л.Н.* Расчёт критической мощности тепловыделяющих каналов сложной формы // Атомная энергия. – 1977. – Вып. 6, Т.42. – С. 457–460.
9. *Ефимов В.А.* Исследование кризиса кипения в модели пучка стержней // Теплоэнергетика. – 1966. – № 1. – С. 59–64.
10. *Ефимов В.А., Трутнёв Л.П., Марченко Л.Д.* Изучение кризиса кипения воды в пучках стержней. – В кн.: Теплообмен, гидродинамика и теплофизические свойства веществ. – М.: Наука, 1968. – С.60–68.
11. *Безруков В.Г., Астахов В.И., Салий Л.А., Логвинов С.А., Брантов В.Г., Тестов И.Н., Стекольников В.В.* Исследование критических тепловых потоков в пучках стержней применительно к реакторам типа ВВЭР. – В сб.: Семинар ТФ-74. Исследования критических тепловых потоков в пучках стержней. – М.: ИАЭ им. Курчатова, 1974. – С.57–66.
12. *Захаров С.В., Павлов Ю.М.* Методика расчёта критической плотности теплового потока при пузырьковом кипении жидкостей в каналах // Теплоэнергетика. – 2004. – № 3. – С. 72–77.
13. *Аладьев И.Т., Додонов Л.Д.* Критические тепловые потоки при кипении недогретой воды в каналах сложной формы (давление 100 атм.). – В сб.: Конвективный и лучистый теплообмен. – М.: изд.-во Ан СССР, 1960. – С.65–79.
14. *Миронов Ю.В., Сакович Е.В.* Анализ гидродинамики и кризиса теплообмена в пучках гладких стержней с учётом неравномерности распределения теплогидравлических параметров по сечению канала. – В сб.: Семинар ТФ – 74. Исследования критических тепловых потоков в пучках стержней. – М.: ИАЭ им. И.В.Курчатова, 1974. – С.189–200.
15. *Толубинский В.И.* Теплообмен при кипении. – К.: Наук. думка, 1980. – 316 с.
16. *Беккер К., Хернборг Г.* Исследование условий возникновения кризиса при течении кипящей воды в вертикальном кольцевом канале // Тр. Амер. О-ва Инж. Механиков. Серия С, 1964. – Т. 86, № 3. – С.130–136.
17. *Алексеев Г.В., Зенкевич Б.А., Субботин В.И.* Критические тепловые потоки в кольцевых каналах с двусторонним подводом тепла. – В кн.: Кризис кипения и температурный режим испарительных поверхностей нагрева. – Л.: 1965. – С.123–127.

Получено 04.03.2009 г.