

КОВЕЦКАЯ М.М.¹,
ЛАВРИК В.М.¹, БОГОРОШ А.Т.²

¹Институт технической теплофизики НАН Украины

²Национальный технический университет Украины "КПИ"

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ОСУШЕНИЯ ТЕПЛООТДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В роботі представлено результати дослідження умов виникнення кризи теплообміну у вертикальній трубі, що обігривається, з гладкою та шорсткою стінками в нестационарних режимах з втратою теплоносія. Показано вплив шорсткості стінки на зміну структури двофазного потоку.

В работе представлены результаты исследования условий возникновения кризиса теплообмена в вертикальной обогреваемой трубе с гладкой и шероховатой стенками в нестационарных режимах с потерей теплоносителя. Показано влияние шероховатости стенки на изменение структуры двухфазного потока.

In work results of research of conditions of occurrence of crisis of heat exchange in a vertical warmed pipe with smooth and rough walls in non-stationary modes with falling the charge of the heat-carrier are submitted. Influence of a roughness of a wall on change of structure of a biphase stream is shown.

D – диаметр трубы;

T – температура;

h – высота выступа;

p – давление;

q – плотность теплового потока;

s – шаг;

w – средняя по сечению канала скорость теплоносителя;

x – массовое расходное паросодержание;

α – коэффициент теплоотдачи;

δ – толщина пленки;

ρ – плотность;

τ – время;

φ – истинное объемное паросодержание;

Re – число Рейнольдса.

Индексы:

1 – вода;

2 – пар;

0 – начальное значение;

cr – критический;

s – насыщение;

t – обогреваемая поверхность;

w – стенка;

α – теплообмен;

ξ – трение;

vx – вход;

г – гладкий;

кр – критическое давление;

об – обогреваемый;

ш – шероховатый.

Вероятность возникновения аварийных ситуаций в энергетическом оборудовании АЭС и их возможные последствия определяют закономерности протекания нестационарных процессов. Так кризис теплообмена в режимах с потерей теплоносителя может привести к разрушению оболочек тепловыделяющих элементов в реакторах с водой под давлением. Эффективным методом интенсификации теплообмена и повышения критической тепловой нагрузки является ис-

пользование теплоотдающей поверхности с регулярной шероховатостью оптимальной геометрии – дискретно-шероховатые каналы [1,2]. В реакторе ВВЭР-1000 применение дискретно-шероховатых каналов в активной зоне, охлаждаемой турбулентным потоком воды, может привести к повышению экономичности реактора [1]. Отмечается, что интенсификация теплообмена при кипении может быть больше, чем в однофазных потоках. Экспериментальные данные работы [3] также

свидетельствуют об интенсификации теплообмена в каналах с регулярной шероховатостью стенки и увеличении критического теплового потока в дисперсно-кольцевом режиме течения. При этом интересно проследить как меняется структура дисперсно-кольцевого потока в нестационарных режимах в каналах с гладкой и шероховатой стенкой.

Для анализа используется одномерная нестационарная неравновесная математическая модель двухфазного потока и экспериментальные данные по кризису теплообмена, полученные на теплогидравлическом стенде ИТТФ [3]. Основная система уравнений математической модели содержит осредненные по пространству и во времени уравнения сохранения массы, импульса и энергии двухфазного потока со скольжением и равным давлением фаз [4]. Замыкают основную систему уравнений условия взаимодействия фаз на межфазной поверхности и со стенками канала.

Для моделирования дисперсно-кольцевого режима течения теплоносителя в базовую модель были внесены изменения, описывающие структуру дисперсно-кольцевого потока [5]. Для описания межфазного теплообмена в дисперсно-кольцевом режиме, строго говоря, необходима трехтемпературная модель. Но так как температуры капель в ядре потока и жидкости в пристенной пленке близки, то учитывают только тепловое взаимодействие систем пар-капли и пар-жидкая пленка.

При этом скорость капель определяется через скорость скольжения капель в паровом ядре, а скорость пленки через относительный расход жидкости в пленке, который задается в виде системы уравнений (7)-(9) работы [5] в зависимости от подрежимов течения в дисперсно-кольцевом потоке.

Как показали результаты работы [5], кризис теплообмена в нестационарном режиме с падением расхода теплоносителя в вертикальной парогенерирующей трубе с гладкими стенками можно рассчитать по зависимости для критического теплового потока на стенке, полученной в диапазоне изменения параметров: давления от 3 до 20 МПа, массовой скорости от 200 до 5000 кг/(м²·с)

$$q_{cr} = q_{cr}^{cd} k_p A_l (\rho w)^{0,25} \times \left[1 - 0,045(\rho w)^{0,5} x \right] \left(\frac{8}{D} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

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

$$q_{cr}^{cd} = 4,6 - B_q (p - 6)^2, \quad B_q = \begin{cases} 0,05, & 1 \leq p < 3 \\ 0,02, & 3 \leq p < 20 \end{cases}.$$

Использование математической модели для расчета тепломассообменных процессов в трубах с дискретно-шероховатыми стенками требует внесения изменений в замыкающие уравнения, характеризующие взаимодействие фаз со стенкой. Для расчета коэффициента теплоотдачи на шероховатой стенке наиболее часто используют зависимости для гладкой стенки с поправкой на шероховатость в виде

$$C_\alpha^{III} = \begin{cases} \exp(11/(s/h)), & s/h \geq 13 \\ \exp(0,065s/h), & s/h < 13 \end{cases}. \quad (2)$$

Для двухфазного режима течения используется формула Чена [4]

$$\alpha_w = \alpha_{mic} S \min \left[1, \frac{T_w - T_s}{T_w - T_1} \right] + \alpha_{mac} F, \quad (3)$$

где α_{mic} , α_{mac} – коэффициенты теплоотдачи при микроконвекции и макроконвекции.

Интенсификация теплообмена за счет шероховатости стенки учитывается введением поправки во второе слагаемое зависимости (3), характеризующее интенсивность макроконвекции $\alpha_{mac}^{III} = \alpha_{mac}^r C_\alpha^{III}$, где коэффициент C_α^{III} определяется согласно формуле (2).

Аналогично задается коэффициент трения на шероховатой стенке. В рассматриваемом случае в области высоких давлений влияние шероховатости стенки может быть учтено введением поправок к коэффициенту гидравлического сопротивления для гладкой трубы $\xi_w^{III} = \xi_w^r C_\xi^{III}$, где поправочный

Таблица.

№	ρw_0 , кг/(м ² ·с)	$T_{вх}$, °С	$\Delta T_{вх}$, °С	q_{cr}^r , МВт/м ²	q_{cr}^m , МВт/м ²	τ_{cr}^r , с	τ_{cr}^m , с
1	500	117	193	1,45	1,53	0,88	0,80
2		144	166	1,47	1,50	0,86	0,85
3		207	103	1,32	1,33	0,83	0,93
4		253	57	1,17	1,17	0,77	1,09
5	1000	146	164	1,89	2,19	0,59	0,51
6		208	102	1,93	1,83	0,50	0,81
7		228	82	1,83	1,72	0,58	0,99
8		242	68	1,70	1,67	0,60	0,83
9	2000	125	185	2,95	3,19	0,85	0,62
10		148	162	2,83	2,93	0,83	0,74
11		205	105	2,48	2,44	0,55	0,66
12		228	82	2,22	2,26	0,65	0,69
13		261	49	1,84	1,83	0,96	1,25
14		276	34	1,70	1,67	0,70	1,75

множитель $C_{\xi}^m = 2,5(h/D)^{0,33} [\lg(s/D)]^{-1,13}$ определен для $\rho w = (1...7) \cdot 10^3$ кг/(м²·с), параметров шероховатости $s/D = 1,5...10,5$; $h/D = 0,1...10$.

Для расчета критического теплового потока на шероховатой стенке в работе [3] предлагается зависимость, полученная на основании экспериментов по кризису теплообмена в стационарных режимах

$$q_{cr}^m = q_{cr}^r \left[1 + 1,2 \cdot 10^{-2} (\rho W)^{0,5} L_{об}^{0,1} \left(\frac{h}{s} \right)^{0,5} \times \left(\frac{h}{D_t} \right)^{-1,2x} \left(1 - \frac{p}{p_{кр}} \right)^{0,33} \right], \quad (4)$$

где q_{cr}^r определяется по формуле (1).

Результаты экспериментов по кризису теплообмена в стационарных условиях в трубах с гладкими и шероховатыми обогреваемыми стенками показали, что в области оптимального соотношения шага к высоте выступа (15...20) критический тепловой поток на шероховатой стенке q_{cr}^m всегда больше, чем на гладкой стенке q_{cr}^r [3].

Были проведены расчеты нестационарных режимов с падением расхода на входе в вертикальную трубу диаметром 8 мм, обогреваемой длиной 1 м с гладкой и шероховатой стенками при давлении 10 МПа, массовой скорости 500, 1000, 2000 кг/(м²·с), тепловой нагрузке 1,5...3 МВт/м². Регулярная шероховатость характеризовалась выступами трапециевидной формы с высотой $h = 0,06$ мм, шагом $s = 1$ мм. В таблице представлены экспериментальные данные по кризису теплообмена в нестационарных режимах с падением расхода теплоносителя в вертикальной обогреваемой трубе с гладкими и шероховатыми стенками [6]. Результаты экспериментов свидетельствуют, что не во всех нестационарных режимах $q_{cr}^m > q_{cr}^r$. При недогревах теплоносителя до температуры насыщения на входе $\Delta T_{вх} < 120$ °С и для начальных значений массовой скорости $\rho w_0 = 500, 2000$ кг/(м²·с) критические тепловые потоки практически совпадают, а при $\rho w_0 = 1000$ кг/(м²·с) $q_{cr}^m < q_{cr}^r$. Поэтому использовать зависимость (4) в нестационарных режимах не всегда возможно. При недогревах теплоносителя $\Delta T_{вх} < 150$ °С время до возникновения кризиса теплообмена в канале с шероховатой стенкой больше, чем с гладкой при всех начальных значениях массовой скорости, а при $\Delta T_{вх} > 150$ °С $\tau_{cr}^m < \tau_{cr}^r$.

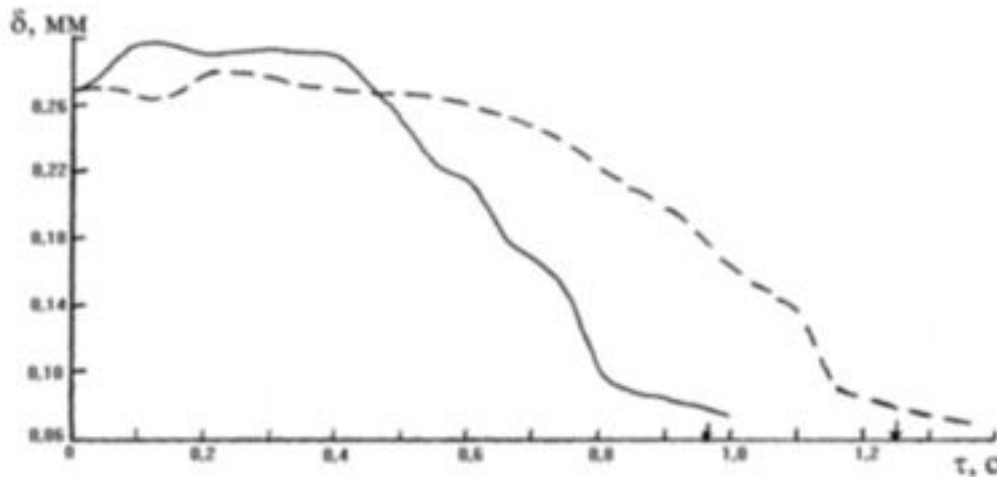


Рис. 1. Изменение во времени толщины пристенной пленки жидкости в вертикальной трубе с гладкой (—) и шероховатой (- - -) стенкой:
 $p = 10 \text{ МПа}$, $T_{\text{вх}} = 261 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 1,84 \text{ МВт/м}^2$, $\rho w_0 = 2000 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$, $\tau_{cr}^r = 0,96 \text{ с}$, $\tau_{cr}^m = 1,25 \text{ с}$.

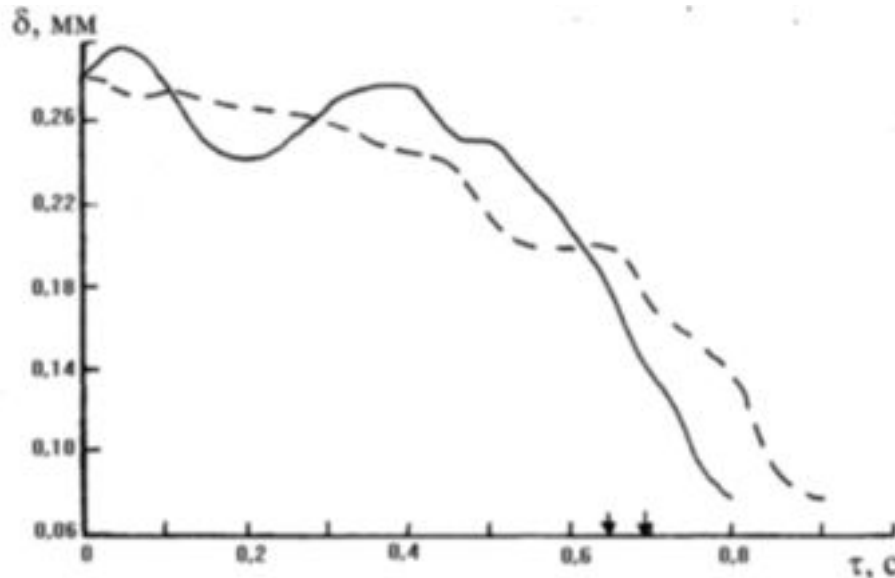


Рис. 2. Изменение во времени толщины пристенной пленки жидкости в вертикальной трубе с гладкой (—) и шероховатой (- - -) стенкой:
 $p = 10 \text{ МПа}$, $T_{\text{вх}} = 228 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 2,26 \text{ МВт/м}^2$, $\rho w_0 = 2000 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$, $\tau_{cr}^r = 0,65 \text{ с}$, $\tau_{cr}^m = 0,69 \text{ с}$.

Таким образом, в отличие от стационарных режимов в нестационарных режимах шероховатость стенки влияет на величину критического теплового потока в сторону его увеличения только при кризисе пузырькового течения (кризис первого рода) и практически не влияет на величину критического теплового потока при кризисе дисперсно-кольцевого потока (кризис второго рода).

При кризисе теплообмена в дисперсно-кольцевом потоке, обусловленного истощением при-

стенной пленки жидкости, наблюдается существенное увеличение времени до кризиса на шероховатой поверхности. Это связано с изменением структуры дисперсно-кольцевого потока. На рис. 1,2 представлено изменение во времени толщины пристенной пленки жидкости в трубе с гладкой и шероховатой стенкой в двух режимах 12, 13. Стрелкой отмечен момент наступления кризиса теплообмена в эксперименте. Результаты расчета показали, что при малых недогревах

теплоносителя на входе ($\Delta T_{\text{вх}} < 60 \text{ }^\circ\text{C}$) кризис теплообмена возникал в результате истощения пристенной пленки жидкости при ее толщине 0,08 мм (рис.1). Сравнение результатов расчета изменения структуры двухфазного потока в нестационарных режимах в гладкой и шероховатой трубе показало, что в начальный момент времени как в гладкой, так и в шероховатой трубе наблюдается увеличение толщины пристенной пленки жидкости в выходном сечении, что связано с увеличением амплитуды колебаний волн на поверхности пленки и интенсивным сносом капель к выходному сечению по мере продвижения границы начала дисперсно-кольцевого режима вверх по потоку (к входному сечению). В трубе с шероховатой стенкой начальное утолщение пленки меньше и наблюдается более плавный переход к режиму микропленки. Увеличение времени до кризиса теплообмена τ_{cr}^{III} в трубе с шероховатой стенкой свидетельствует об образовании вихревой структуры в пристенной области, что способствует более интенсивному теплообмену между ядром и пристенной пленкой жидкости. С увеличением недогрева теплоносителя на входе и тепловой нагрузки кризис теплообмена возникал при достаточно толстой пленке (рис.2) в результате ее разрушения как в гладком, так и в шероховатом канале.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Олимпиев В.В.* Гидродинамика и теплоотдача ламинарного течения в каналах с выступами-интенсификаторами теплообмена // Известия РАН. Энергетика. – 2006. – №4. – С.106–114.
2. *Леонтьев А.И., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А.* Эффективные интенсификаторы теплоотдачи для ламинарных (турбулентных) потоков в каналах энергоустановок // Известия РАН. Энергетика. – 2005. – №1. – С.75–90.
3. *Толубинский В.И., Домашев Е.Д., Годунов В.Ф.* Повышение кризисных характеристик с помощью искусственной шероховатости на обогреваемых поверхностях парогенерирующих каналов. В сб. Двухфазные потоки. Теплообмен и гидродинамика. – Л.: Наука, 1987. – С.213–232.
4. *Кузнецов Ю.Н.* Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.
5. *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.
6. *Домашев Е.Д., Годунов В.Ф., Портной С.Я., Архипов А.П.* Кризис теплоотдачи при кипении воды в гладких и шероховатых каналах в нестационарных режимных условиях. В сб. Гидродинамика и теплообмен в нестационарных условиях. – Обнинск, 1992. – С.229–238.