

УДК 536.248.2

Скичко А.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОГО ОБОГРЕВА НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕМ КАНАЛЕ

Наведено математичну модель гідродинаміки і теплообміну в теплонапруженому каналі активної зони ядерного реактора. На основі моделі проаналізовані характеристики двофазних потоків у вертикальному парогенеруючому каналі при рівномірному і нерівномірному обігріві каналу.

Представлена математическая модель гидродинамики и теплообмена в теплонапряженном канале активной зоны ядерного реактора. На основе модели проанализированы характеристики двухфазных потоков в вертикальном канале при равномерном и неравномерном обогреве канала.

The mathematical model of fluid flow and heat transfer in heat-stressed channel of active area of nuclear reactor is presented. On the basis of model two-phase flows in a vertical channel at the uniform heating and nonuniform heating of channel are analysed.

d – диаметр канала, мм;

F – межфазное трение, кг/(м³·с);

$F_b = \rho_k \cdot g$ – выталкивающая сила, кг/(м²·с²);

h – энтальпия, кДж/кг;

\vec{k} – орт в направлении действия силы тяжести;

l – длина, м;

M_k – интенсивность массообмена между двумя фазами;

p – давление, Па;

q – тепловой поток, МВт/м²;

r и z – радиальная и осевая цилиндрические координаты;

t – время, с;

T – температура, К;

w , v – скорость по z и r соответственно, м/с;

ΔV_k – тензорный градиент;

ε – скорость диссипации, м²/с³;

k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²;

$\mu = \mu_{kt} + \mu_k$ – эффективная вязкость, Па·с;

μ_{kt} – турбулентная вязкость, Па·с;

μ_k – молекулярная вязкость, Па·с;

ρ – плотность теплоносителя, кг/м³;

ρw – массовая скорость, кг/(м²·с);

φ – истинное объемное паросодержание теплоносителя;

∇ – тензорная дивергенция.

Индексы нижние:

b – пузырек;

$k = 1$ или 2 ;

1 – вода;

2 – пар;

эфф – эффективная.

Введение

Одной из важнейших проблем современной атомной энергетики является обеспечение надежной эксплуатации ядерных энергоблоков АЭС. В этой комплексной и многоплановой проблеме теплофизические аспекты обеспечения надежности охлаждения активных зон энергетических реакторов с водой под давлением без преувеличения могут считаться одними из самых главных [1]. Учитывая это, теплогидравлические расчеты активных зон реакторных установок являются важнейшей составной частью большинства конструкторских и технологи-

ческих разработок в атомной энергетике. Роль такого расчетного анализа в обеспечении безаварийной работы ядерных реакторов трудно переоценить. Именно, на основе этих расчетов могут быть избраны эффективные инженерные решения, которые реально предотвращают возникновение и развитие тяжелых аварий. Цель работы заключается в численно-аналитическом исследовании теплообмена и гидродинамики в вертикальных каналах активной зоны ядерного реактора и теплоэнергетического оборудования, и в установлении закономерностей двухфазного течения теплоносителя в условиях неравномерного обогрева стенок канала.

Математическая модель

Рассматривается течение двухфазного теплоносителя в вертикальном обогреваемом канале, моделирующем теплонапряженный канал активной зоны ядерного реактора [2]. Описывающая такое течение теплоносителя система уравнений движения, неразрывности, энергии, кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации в цилиндрических координатах представляется в следующем виде [3, 4]: уравнение неразрывности для каждой фазы

$$\frac{\partial \rho_k \varphi_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_k \varphi_k w_k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_k \varphi_k v_k) = M_k, \quad k = 1, 2. \quad (1)$$

Осевая составляющая уравнения движения (z направление)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_k \varphi_k w_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_k \varphi_k w_k^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_k \varphi_k w_k v_k) = \\ = -\varphi_k \frac{\partial p}{\partial z} + F(w_2 - w_1) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varphi_k \mu_{\text{эфф}} \frac{\partial w_k}{\partial r} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varphi_k \mu_{\text{эфф}} \frac{\partial w_k}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\varphi_k \mu_{\text{эфф}} \nabla V_k) + F_b \bar{k}, \quad k = 1, 2; \end{aligned} \quad (2)$$

радиальная составляющая уравнения движения (r направление)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_k \varphi_k w_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_k \varphi_k w_k v_k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_k \varphi_k v_k^2) = \\ = -\varphi_k \frac{\partial p}{\partial r} + F(v_2 - v_1) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varphi_k \mu_{\text{эфф}} \frac{\partial v_k}{\partial r} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varphi_k \mu_{\text{эфф}} \frac{\partial v_k}{\partial z} \right) - \frac{2}{3r} \frac{\partial}{\partial r} (\varphi_k \mu_{\text{эфф}} r \nabla V_k), \quad k = 1, 2; \end{aligned} \quad (3)$$

уравнение энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_k \varphi_k w_k h_k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_k \varphi_k v_k h_k) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varphi_k \frac{\mu_{\text{эфф}}}{Pr_{\text{эфф}}} \frac{\partial h_k}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\varphi_k \frac{\mu_{\text{эфф}}}{Pr_{\text{эфф}}} \frac{\partial h_k}{\partial z}) + S_h; \end{aligned} \quad (4)$$

уравнение для кинетической энергии турбулентности

$$\frac{\partial \rho_1 \varphi_1 k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_1 \varphi_1 w_1 k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_1 \varphi_1 v_1 k) =$$

$$= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varphi_1 \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial r}) + S_k; \quad (5)$$

уравнение для скорости диссипации

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1 \varphi_1 \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_1 \varphi_1 w_1 \varepsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_1 \varphi_1 v_1 \varepsilon) = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varphi_1 \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial r}) + S_\varepsilon. \end{aligned} \quad (6)$$

Значение теплового потока при моделировании неравномерной по высоте канала тепловой нагрузке задавалось следующим выражением

$$q = q_{\text{ном}} (-13,393x^4 + 29,425x^3 - 20,821x^2 + 5,7627x + 0,3926), \quad (7)$$

где $q_{\text{ном}}$ – заданная номинальная тепловая мощность.

Полином в выражении (7) был получен путем аппроксимации реального профиля энерговыделения по высоте обогреваемой трубы длиной 1,2 м, диаметром 10 мм, согласно данным работы [5]. Вид профиля и аппроксимирующей кривой показан на рис. 1. Такой характер распределения энергии в активной зоне ядерного реактора соответствует концу топливной кампании [6].

Проведено численное моделирование системы уравнений (1) – (6) с граничными условиями на входе в канал: массовая скорость – 900 кг/(м²·с), температура теплоносителя – 465 К [7]. Рассматривались два способа задания плот-

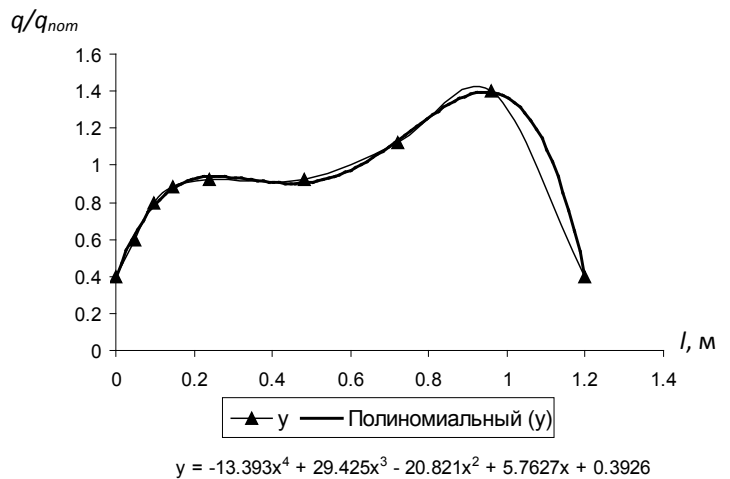


Рис. 1. Распределение теплового потока по высоте канала.

ности теплового потока на стенке канала: равномерный обогрев при постоянном значении $q_{\text{ном}} = 0,2 \text{ МВт/м}^2$ и неравномерный обогрев согласно уравнению (7).

Анализ результатов

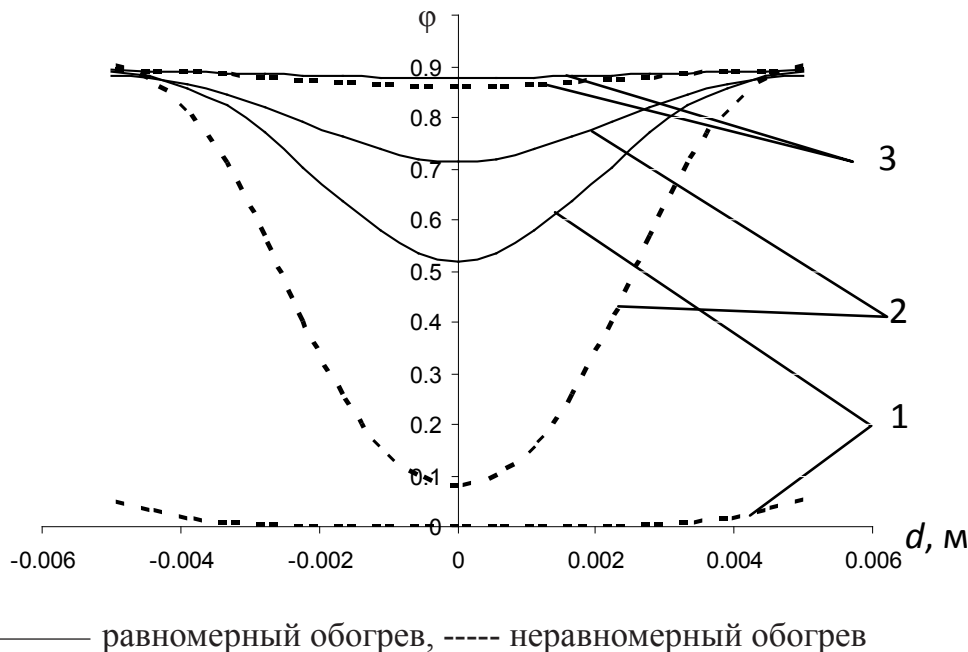
При моделировании равномерного и неравномерного обогрева получены данные по распределению теплофизических параметров потока.

На рис. 2 дано сравнение профилей паросодержания для равномерного и неравномерного обогрева канала. Из рисунка видно, что на стенках значение паросодержания максимально во всех сечениях и минимально в центре канала для равномерного и неравномерного обогрева. В сечении 1, на расстоянии 0,6 м от входа в канал, значение паросодержания при неравномерном обогреве меньше, чем при равномерном. Это связано с характером профиля обогрева канала. В начальном участке тепловой поток небольшой, поэтому подведенной энергии не достаточно для фазового перехода теплоносителя. Это приводит к большой разнице между профилями парообразования при равномерном и неравномерном обогреве. Далее по длине канала при неравномерном обогреве тепловой поток на стенке возрастает, что ведет к увели-

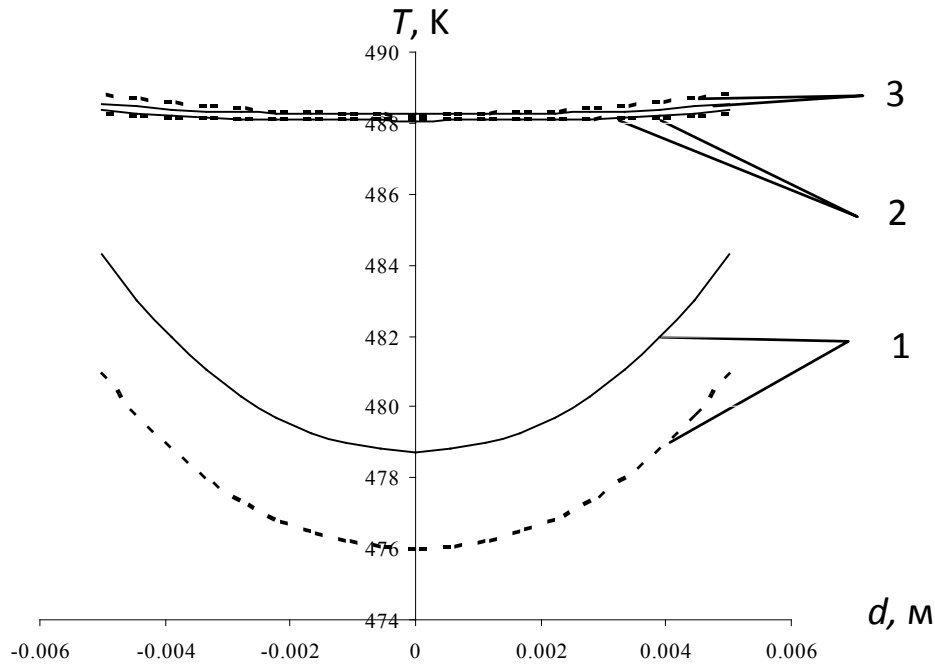
чению парообразования (сечение 2), и на выходе профили парообразования в обоих режимах выравниваются (сечение 3).

На рис. 3 представлены профили температуры воды в трех сечениях, тех же что и для паросодержания. В связи с тем, что удельный тепловой поток, в начале канала при неравномерном обогреве меньше, среднеинтегральная температура также имеет меньше значение, чем при равномерном обогреве (сечение 1), различие составляет $3 \text{ }^\circ\text{C}$. Далее вниз по потоку происходит выравнивание температур из-за того, что в режиме с неравномерным обогревом удельный тепловой поток на стенке увеличивается. При этом различие в значениях температуры потока для равномерного и неравномерного обогрева уменьшилось, в центре канала до $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, а в пристеночной области до $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (сечение 2 и 3).

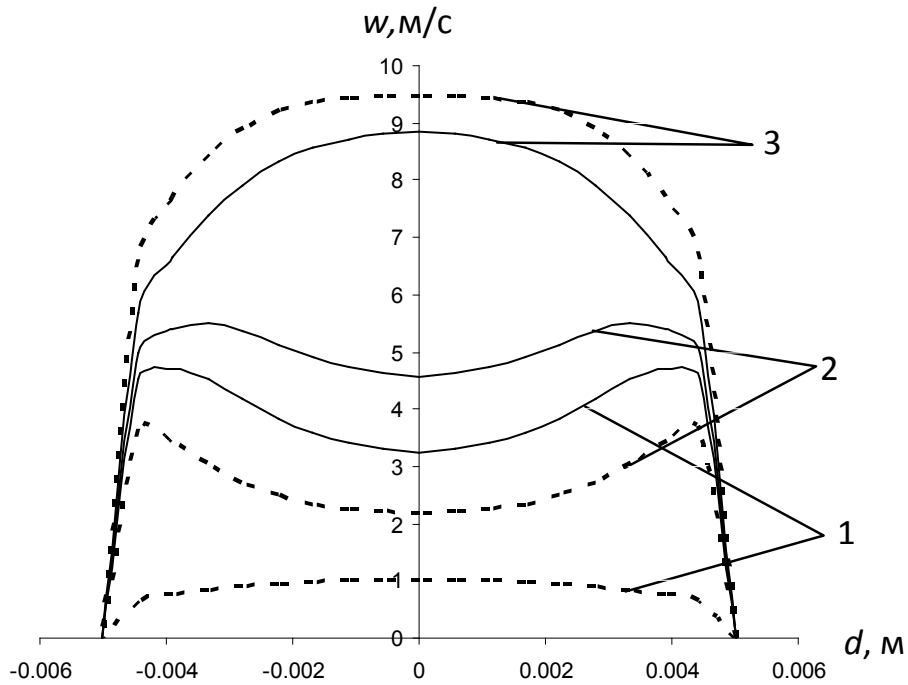
На рис. 4 и 5 дано сравнение профилей скорости воды и пара при равномерном и неравномерном обогреве канала. В сечении 1, когда поток начинает закипать, при неравномерном обогреве, профили скорости воды и пара близки к равномерным. Скорость скольжения (разность скоростей пара и воды) в центральной



— равномерный обогрев, ---- неравномерный обогрев
Рис. 2. Распределение истинного объемного паросодержания по сечению трубы в трех сечениях по длине для равномерного и неравномерного обогрева: 1 – 0,6 м, 2 – 0,9 м, 3 – 1,15 м.



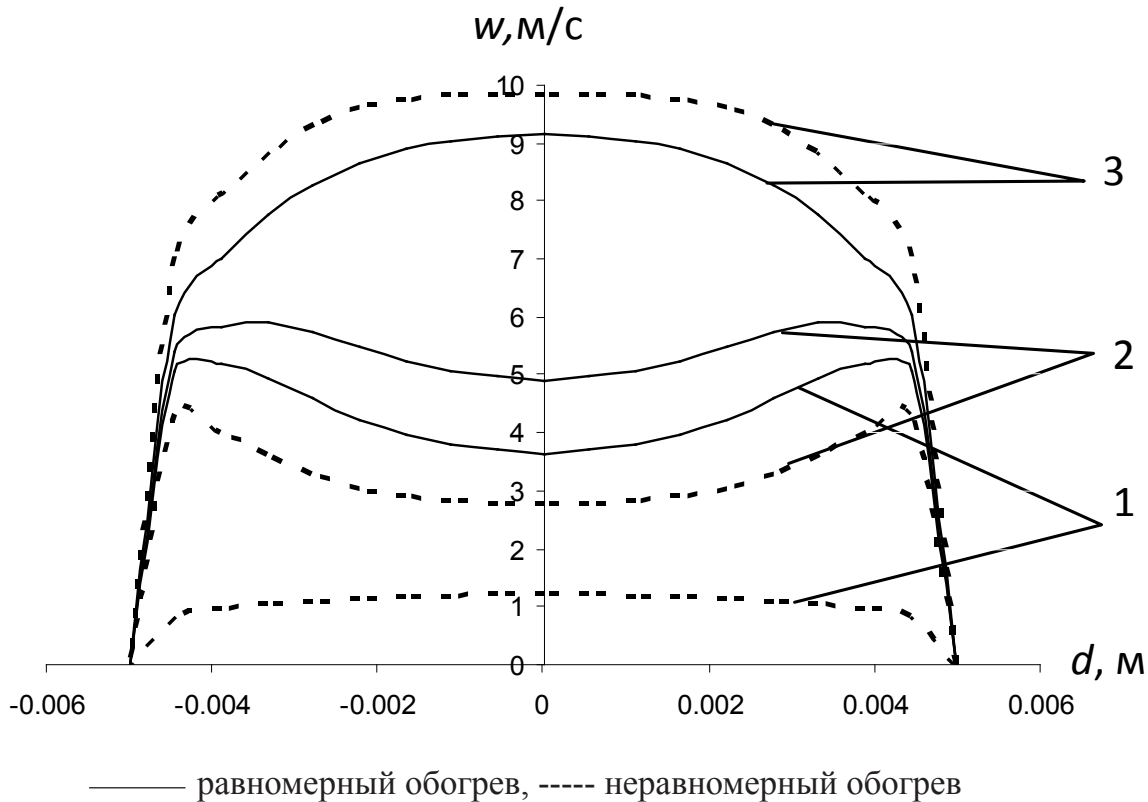
— равномерный обогрев, ---- неравномерный обогрев
Рис. 3. Профили температуры воды в сечениях: 1 – 0,6 м, 2 – 0,9 м, 3 – 1,15 м.



— равномерный обогрев, ---- неравномерный обогрев
Рис. 4. Профили скорости воды в сечениях: 1 – 0,6 м, 2 – 0,9 м, 3 – 1,15 м.

части канала при этом равняется 0,2 м/с. В том же сечении при равномерном обогреве уже наблюдается развитое кипение и профиль ско-

рости носит м-образный характер, скорость скольжения равняется 0,4 м/с. В сечении 2 увеличивается парообразование и соответственно



скорость воды и пара растет. В обоих режимах профили носят м-образный характер с небольшим прогибом в центре канала. Указанная форма профиля обусловлена тем, что температура на периферии выше, чем в центральной области канала и, следовательно, на периферии меньше плотность. Это приводит к большему ускорению потока в периферийной области, что и ведет к указанной форме профиля. Скорость скольжения в центральной части канала при этом равняется 0,45 м/с при неравномерном обогреве и 0,33 м/с при равномерном обогреве.

В сечении 3 профили скорости имеют уже форму присущую развитому турбулентному потоку – без провала в центре канала. Температура практически носит равномерный характер (рис. 3). Скорость скольжения равна 0,37 м/с при неравномерном обогреве и 0,33 м/с при равномерном обогреве канала.

Выводы

1. На основе математической модели [2] рассчитаны профили температур, скоростей,

паросодержания при течении двухфазного теплоносителя в вертикальном канале с равномерным и неравномерным обогревом.

2. Установлено, что при неравномерном по длине канала обогреве, в середине канала заметно влияние характера обогрева на параметры теплоносителя (при неравномерном обогреве скорость скольжения на 35 % выше, чем при равномерном). В выходном сечении это различие исчезает.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Mahmut D. Mat, Kemal Aldas, Yuksel Kaplan. Numerical Investigation of Subcooled Boiling in a Vertical Pipe Using a Bubble-Induced Turbulence Model // Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. – 2002. – № 2. – P. 275–284.

3. Авраменко А.А. Ренормгрупповой анализ нестационарной турбулентности. // Доповіді НАН України. – 2007. – 12. – С.88 – 93.

4. *Авраменко А.А.* Апробация ренормгрупповой модели нестационарной турбулентности. // *Доповіді НАН України.* – 2011. – 5. – С.88 – 93.

5. *Безруков Ю.А., Астахов В.И., Трушин А.М.* Исследование кризиса теплообмена применительно к реальным аксиальным профилям тепловыделения // *Труды 3-й научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР».* – Подольск, 2003. – Т. 1. – С. 67–71.

6. *Ключников А.А., Шараевский И.Г., Фиалко Н.М. и др.* Теплофизика аварий ядерных реакторов. – Чернобыль: Институт проблем безопасности АЭС. – 2012. – 528 С.

7. *Скицко А.И.* Численное моделирование пароводяного потока в канале при нагреве теплоотдающей стенки. // *Пром. теплотехника.* – 2009. – Т. 31, № 7. – С. 127–129.

Получено 11.07.2012 г.