



УДК 621.039.5:536.24

Член-корреспондент НАН України **А. А. Авраменко,**  
**Е. А. Кондратьева, М. М. Ковецкая, А. И. Тыринов,**  
**В. Н. Васильченко**

### **Особенности потока сверхкритических параметров при неравномерном обогреве стенки тепловыделяющей сборки**

*Проведено комп'ютерне моделювання і представлені результати розрахунку розподілення гідродинамічних і теплофізических характеристик в тепловиделяючій семистержневій збірці на основі RNG  $k-\epsilon$  моделі турбулентності при теченні води сверхкритических параметров. Моделювання проводилось в стаціонарних умовах при рівномірному і нерівномірному обігріві стінки каналу, що дозволило визначити вплив обігріву на розподілення характеристик теплоносителя. Установлено, що при нерівномірному обігріві збільшується азимутальна нерівномірність коефіцієнта теплоотдачи.*

Поиск путей обеспечения надежной и безопасной работы ядерных энергетических установок при проведении исследований — первоочередной вопрос, так как последствия аварий могут быть катастрофическими. Активно развивающимся направлением является повышение параметров теплоносителя до сверхкритических, которые имеют ряд преимуществ перед используемыми в настоящее время водо-водяными реакторами различных типов [1, 2].

Большинство как экспериментальных данных, так и результатов моделирования при сверхкритических параметрах получено при течении теплоносителя в трубах. При этом процесс, протекающий в пучке стержней, более сложный, и для его изучения при отсутствии достаточного количества экспериментальных данных применяют теоретические методы исследования. Целью данной работы является моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в шестигранной семистержневой тепловыделяющей сборке, охлаждаемой водой при сверхкритическом давлении в условиях равномерного и неравномерного обогрева по длине канала.

Для проведения расчетов выбрана модель шестигранной семистержневой тепловыделяющей сборки (ТВС), представленная на рис. 1. Основные результаты исследований получены для трех сечений: А–А, Б–Б, В–В, ось  $z$  направлена вдоль оси канала сборки, ось  $y$

---

© А. А. Авраменко, Е. А. Кондратьева, М. М. Ковецкая, А. И. Тыринов, В. Н. Васильченко, 2014

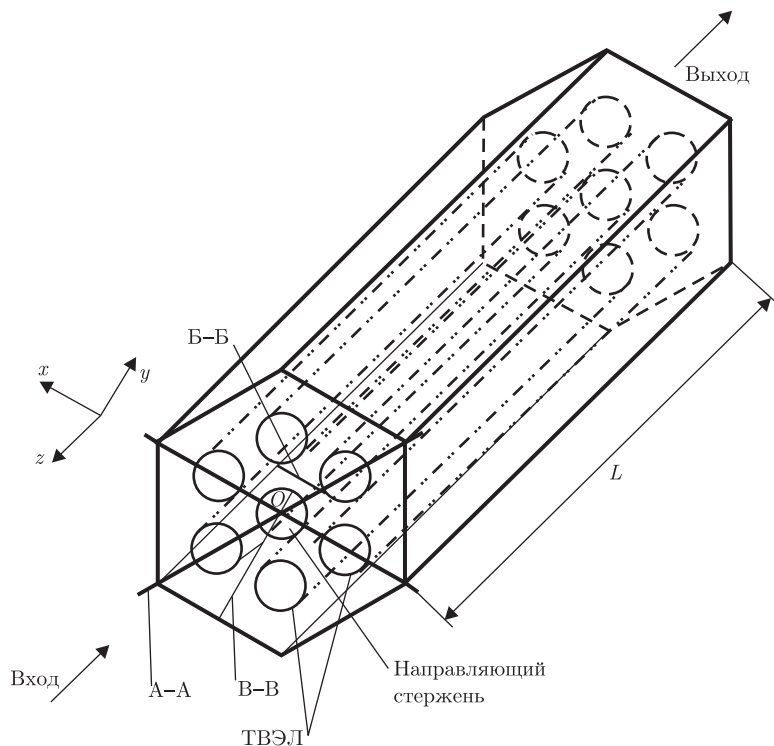


Рис. 1. Шестигранная семистержевая тепловыделяющая сборка

параллельна сечению С–С, а ось  $x$  перпендикулярна этому сечению. Геометрические характеристики сборки: длина  $L = 4,05$  м, диаметр твэла  $d = 9,1$  мм, шаг упаковки  $S_d = 12,75$  мм. Граничные условия на входе: скорость теплоносителя  $w_z = w_0$ ,  $w_x = w_y = 0$ , температура  $T = T_{\text{вх}}$ . На шести тепловыделяющих элементах задавался постоянный тепловой поток либо закон его изменения, а на внешней стенке сборки и на центральном стержне — адиабатные условия. Рассмотрен случай равномерного и неравномерного обогрева стенки канала по его длине.

Численное исследование процессов гидродинамики и теплообмена в сборке тепловыделяющих элементов проводилось на основе  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности RNG [3, 4], которая включает основные уравнения (уравнение движения, энергии, кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации) [5]:

$$\rho \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + \underbrace{s \frac{\partial \nabla(\mu_t/\rho)}{\partial t}}_I + (V \nabla) V \right] = -\nabla p + \nabla \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \nabla V + (\nabla V)^T - \frac{2}{3} \nabla V \delta_{nm} \right) \right] + F \vec{k}, \quad (1)$$

где  $s$  — постоянная, равная 0,97;  $I$  — дополнительное слагаемое, учитывающее нестационарность турбулентных процессов [3, 4];  $V$  — вектор скорости теплоносителя;  $\delta_{nm}$  — тензор Кронекера второго ранга;  $\mu_{\text{eff}}$ ,  $\mu_t$  — эффективная и молекулярная вязкости;  $\nabla$  — тензорная дивергенция,  $\nabla V$  — тензорный градиент, который преобразует вектор (тензор первого ранга) в тензор второго ранга и  $(\nabla V)^T$  — сопряженный тензорный градиент;  $F = \rho g$  — подъемная сила,

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + s \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \nabla \left( \frac{(\mu_t)}{\sqrt{2}S} \nabla h \right)}_I + \nabla(\rho h V) = \nabla \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\text{Pr}_{\text{eff}}} \nabla h \right), \quad (2)$$

где тензор скоростей деформации  $S = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ,

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + s \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \nabla \left( \frac{(\mu_t)}{\sqrt{2}S} \nabla k \right)}_I + \nabla(\rho k V) = \nabla \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\text{Pr}_k} \nabla k \right), \quad (3)$$

где  $k$  — кинетическая энергия турбулентности,

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + s \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \nabla \left( \frac{(\mu_t)}{\sqrt{2}S} \nabla \varepsilon \right)}_I + \nabla(\rho \varepsilon V) = \nabla \left( \frac{\mu_{1\text{eff}}}{\text{Pr}_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + S_\varepsilon, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  — скорость диссипации,

$$S_\varepsilon = \rho \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \varepsilon),$$

где  $C_1 = 1,42$  и  $C_2 = 1,68$ .

Генерация турбулентной энергии определяется на основе уравнения состояния по формуляции IF-97 [6] для каждой из областей, через которые проходит теплоноситель:

$$G_k = \mu \left( \nabla V + (\nabla V)^T - \frac{2}{3} \nabla V \delta_{nm} \right)^2. \quad (5)$$

**Результаты моделирования.** Рассматривался стационарный процесс при равномерной и неравномерной тепловой нагрузке по длине канала с целью определения локальных характеристик потока и областей ухудшенного теплообмена. Расчеты проводились при следующих значениях параметров: скорость теплоносителя  $w_z = w_0 = 0,5$  м/с, давление  $p = 25$  МПа, температура на входе  $T_{\text{вх}} = 290$  °С, плотность теплового потока  $q = 400$  кВт/м<sup>2</sup>. При выбранном для исследования давлении критическая температура составляет 385 °С. Значение теплового потока при моделировании неравномерной тепловой нагрузки задавалось следующим выражением, полученным путем аппроксимации экспериментального профиля теплового потока [7]:

$$q = q_{\text{ном}} (-0,1019z^4 + 0,754z^3 - 1,7988z^2 + 1,6886z + 0,3975), \quad (6)$$

где  $q_{\text{ном}} = 400$  кВт/м<sup>2</sup>.

Тепловые и гидродинамические характеристики потока сверхкритических параметров в семистержневой тепловыделяющей сборке, которые были получены на основе результатов численного моделирования процесса, позволяют определить наиболее опасные локальные зоны ухудшенного теплообмена и максимальные значения температуры теплоотдающей поверхности.

На рис. 2 представлено изменение температуры теплоносителя по мере его продвижения вдоль канала при равномерном и неравномерном обогреве в сечении А-А на разных

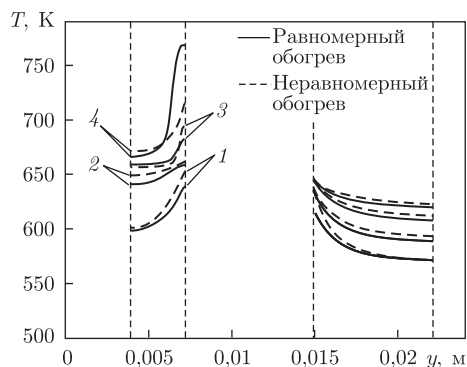


Рис. 2. Распределение температуры по длине ТВС в сечении А-А: 1 —  $z = 1$  м; 2 —  $z = 2$  м; 3 —  $z = 3$  м; 4 —  $z = 4$  м

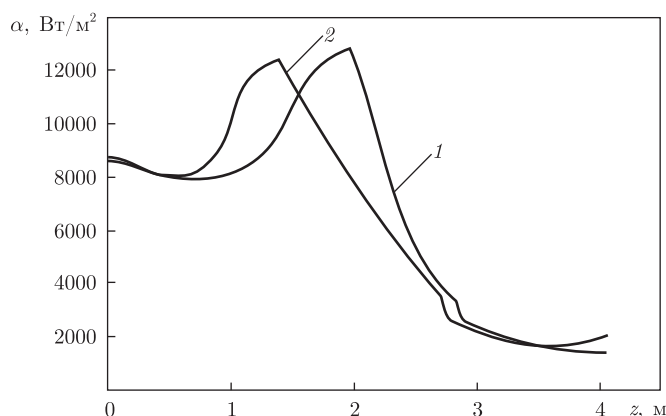


Рис. 3. Распределение коэффициента теплоотдачи по длине тепловыделяющего элемента в теплонапряженной точке: 1 — равномерный обогрев; 2 — неравномерный обогрев

расстояниях от входа в сборку. В целом, наблюдается тенденция увеличения температуры по мере течения вдоль ТВС, при этом температура при неравномерном обогреве выше, чем при равномерном в одних и тех же сечениях по длине ТВС.

Только на выходе из сборки температура при равномерном обогреве выше, чем при неравномерном. Переход к сверхкритическим параметрам оказывает значительное влияние на профили температур — их значения сильно возрастают вблизи обогреваемых элементов. В сечении А-А в узком зазоре значения температур выше, чем в широком, из-за близости тепловыделяющих элементов. Такое распределение температур отображается на распределении профилей скоростей в аналогичных сечениях.

Рис. 3 демонстрирует распределение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  по длине тепловыделяющего элемента в теплонапряженной точке при равномерном и неравномерном обогреве. В указанной точке достигается максимальная температура в выходном сечении сборки. Максимум коэффициента теплоотдачи при неравномерном обогреве находится ближе ко входу в ТВС, так как неравномерный обогрев интенсифицирует генерацию кинетической энергии турбулентности. Как видно, распределение коэффициентов теплоотдачи носит немонотонный характер. После перехода к сверхкритическим параметрам наблюдается существенный рост коэффициента теплоотдачи, что объясняется резким увеличением теплоемкости теплоносителя в этой области. После прохождения точки, соответствующей

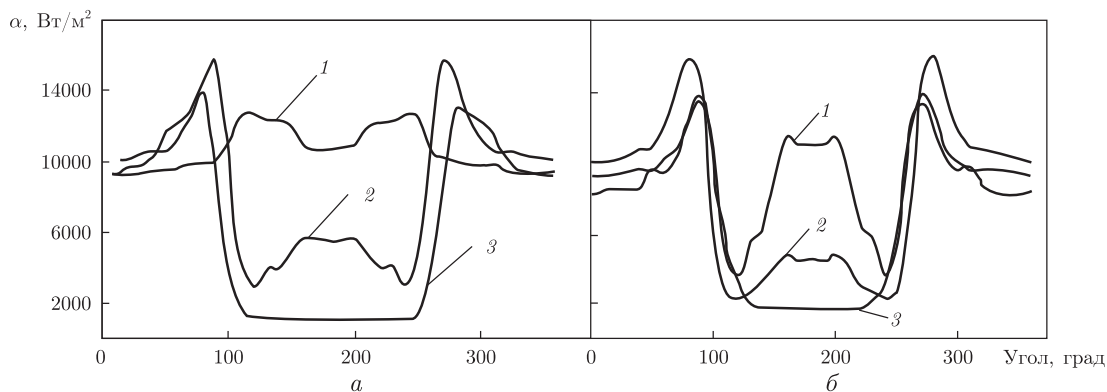


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи по окружности тепловыделяющего элемента в разных сечениях по длине канала: *a* — равномерный обогрев; *б* — неравномерный обогрев; 1 —  $z = 1,5$  м; 2 —  $z = 2,5$  м; 3 —  $z = 4$  м

пику значения теплоемкости, рост коэффициента теплоотдачи замедляется, после чего начинается его резкое падение в соответствии с характером поведения теплоемкости. Далее скорость падения коэффициента теплоотдачи замедляется, и его значения асимптотически стремятся к постоянной величине.

На рис. 4, *a* представлена зависимость коэффициента теплоотдачи по окружности тепловыделяющего элемента в разных сечениях по длине канала при равномерном обогреве, а на рис. 4, *б* — при неравномерном. Если рассматривать коэффициент теплоотдачи на выходе из шестигранной сборки, то его распределение при равномерном и неравномерном обогреве имеет схожий характер. Различный характер поведения коэффициента теплоотдачи наблюдается в сечении на расстоянии 1,5 м от входа в ТВС, так как это сечение находится ближе всего к переходу к сверхкритическим параметрам. При равномерном обогреве наблюдается более равномерное распределение  $\alpha$ , а при неравномерном имеются отчетливые максимумы и минимумы из-за большего значения теплового потока. В указанном сечении азимутальная неравномерность коэффициента теплоотдачи увеличивается в три раза по сравнению с равномерным обогревом.

Из вышеизложенных результатов можно сделать вывод об ухудшении безопасности ядерных энергетических установок при неравномерном обогреве по сравнению с равномерным. Более высокая азимутальная неравномерность указывает на большую разницу локальных коэффициентов теплоотдачи и температур по периметру и большие термические напряжения. Все указанные факторы влияют на безопасность ЯЭУ.

Таким образом, на основе результатов численного моделирования получены основные тепловые и гидродинамические характеристики потока сверхкритических параметров в семистержневой тепловыделяющей сборке. Определены наиболее опасные локальные зоны ухудшенного теплообмена, максимальные значения температуры теплоотдающих поверхностей.

Проанализировано влияние характера обогрева стержней на распределение гидродинамических и тепловых характеристик потока. Установлено, что при неравномерном обогреве в области перехода к сверхкритической температуре сечения азимутальная неравномерность коэффициента теплоотдачи увеличивается в три раза по сравнению с равномерным обогревом, а его максимум находится ближе ко входу в ТВС.

1. *Generation IV nuclear energy systems ten-year program plan* [Электронный ресурс]: Prepared for the U.S. Department of energy office of nuclear energy under DOE Idaho operations office contract (March 2005). – Режим доступа: <http://nuclear.inl.gov/deliverables/docs/gen-iv-10-yr-program-plan.pdf>.
2. *Cao L., Oka Y., Ishiwatari Y., Shang Z.* Core design and subchannel analysis of a superfast reactor // *J. of Nuclear Science and Technology*. – 2008. – **45**, No 2. – P. 138–148.
3. *Авраменко А. А.* Ренормгрупповой анализ нестационарной турбулентности // *Доп. НАН України*. – 2007. – № 12. – С. 88–93.
4. *Авраменко А. А.* Апробация ренормгрупповой модели нестационарной турбулентности // *Там само*. – 2011. – № 5. – С. 88–93.
5. *Авраменко А. А., Кондратьева Е. А., Ковецкая М. М., Тыринов А. И.* Гидродинамика и теплообмен потока воды с сверхкритическими параметрами в вертикальной сборке тепловыделяющих элементов // *Инж.-физ. журн.* – 2013. – **86**, № 4. – С. 760–767.
6. *Александров А. А., Орлов К. А., Очков В. Ф.* Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики. – Москва: Изд. дом МЭИ, 2009. – 232 с.
7. *Безруков Ю. А., Астахов В. И., Трушин А. М. и др.* Исследование кризиса теплообмена применительно к реальным аксиальным профилям тепловыделения // *Тр. III научно-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”*. – Подольск, 26–30 мая 2003 г. – Т. 1. – С. 67–71.

*Институт технической теплофизики  
НАН Украины, Киев*

*Поступило в редакцию 17.06.2014*

Член-корреспондент НАН України **А. А. Авраменко, О. О. Кондратьева, М. М. Ковецкая, А. И. Тыринов, В. В. Васильченко**

### **Особливості потоку надкритичних параметрів при нерівномірному обігріві стінки тепловидільної збірки**

*Проведено комп'ютерне моделювання та наведено результати розрахунку розподілу гідродинамічних і теплофізичних характеристик у тепловидільній збірці на основі RNG k-ε моделі турбулентності при течії води надкритичних параметрів. Моделювання відбувалося в стаціонарних умовах при рівномірному і нерівномірному обігріві стінки каналу, що дозволило визначити вплив обігріву на розподіл характеристик теплоносія. Встановлено, що при нерівномірному обігріві збільшується азимутальна нерівномірність коефіцієнта тепловіддачі.*

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. A. Avramenko, E. A. Kondratieva, M. M. Kovetskaya, A. I. Tyrinov, V. V. Vasilchenko**

### **Specifics of supercritical parameters of a flow under non-uniform heating of the fuel assembly channel walls**

*Based on the RNG k-ε turbulence model, computer simulations are performed. Their results include distributions of the hydrodynamical and heat transfer parameters for a supercritical water flow in the seven-rod fuel assembly. The simulations were performed under steady state conditions at uniform and non-uniform heating of the channel walls, which enabled us to reveal effects of the heating on the distribution of the coolant properties. It is shown that the non-uniform heating causes azimuthal non-uniformity of the heat transfer coefficient.*