

УДК 536.24

Архипова Е.А., Тыринов А.И., Авраменко А.А., Блинов Д.Г.

Институт технической теплофизики НАН Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ

Модифіковано математичну модель теплообміну та гідродинаміки при течії потоку води при до- та надкритичних параметрах в кільцевому каналі. На основі моделі проведено числове моделювання методом контрольного об'єму. Отримані результати дозволяють проаналізувати характер зміни теплофізичних та гідродинамічних характеристик.

Модифицирована математическая модель теплообмена и гидродинамики при течении потока воды до- и сверхкритических параметрах в кольцевом канале. На основе модели проведено численное моделирование методом контрольного объема. Полученные результаты позволяют проанализировать характер изменения теплофизических и гидродинамических характеристик.

The mathematical model of heat transfer and hydrodynamics for flow of water up- and supercritical parameters in the annular channel is modified. On the basis of model numerical simulation by a method of control volume is carried out. The results allow to analyze nature of thermal and hydrodynamics characteristics.

c – теплоемкость;
 $f(p, T)$ – удельная энергия Гельмгольца;
 $g(p, T)$ – удельная энергия Гиббса;
 G – генерация турбулентной энергии;
 h – энтальпия;
 I, J, n – коэффициенты и показатели степеней уравнений;
 k – кинетическая энергия турбулентности;
 T – температура;
 Tu – турбулентность;
 p – давление;
 q – плотность теплового потока;
 r, z – цилиндрические координаты;
 u – скорость;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 β – приведенное давление;
 λ – теплопроводность;
 μ – динамическая вязкость;
 γ – энергия Гиббса;

Φ – энергия Гельмгольца;
 τ – касательное напряжение;
 v – удельный объем;
 ρ – плотность;
 θ – приведенная температура;
 Σ – сумма.

Индексы нижние:

eff – эффективный параметр;
 t – турбулентный параметр;
 w – стенка.

Индексы верхние:

0 – идеально-газовая часть;
 r – реальная часть.

ЯЭУ – ядерные энергетические установки;
СКД – сверхкритическое давление;
КПД – коэффициент полезного действия;
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор.

Введение

Перспективным направлением развития атомной энергетики является переход работы ЯЭУ на сверхкритические параметры теплоносителя. Многие страны уже начали разработки в этом направлении. В настоящее время число СКД парогенераторов, работающих в США, около 400, в Японии – 150, в России – 140. При

использовании атомной энергии для выработки электричества и теплоты и переходе к реакторам ВВЭР 4-го поколения должны соблюдаться такие условия:

- повышенная безопасность и надежность;
- минимальное воздействие на окружающую среду;
- экономическая конкурентоспособность.

Основные преимущества атомных энергоблоков со сверхкритическими параметрами [1]:

– значительный рост КПД (по различным оценкам до 40...45 %), по сравнению с 32...34 % для существующих легководных реакторов различных типов;

– уменьшение на порядок расхода теплоносителя через активную зону. Это связано с ростом теплоемкости при СКД и возможностью значительного подогрева теплоносителя (до 270 °С) в активной зоне. Уменьшение расхода сопровождается снижением затрат энергии на прокачку теплоносителя;

– существенно уменьшается масса теплоносителя в циркуляционном контуре вследствие значительного снижения средней плотности теплоносителя в активной зоне, и уменьшается объем контура. Так, при 24,5 МПа плотность теплоносителя падает почти на порядок, при росте температуры от 240 до 550 °С. Соответственно, при авариях с течью теплоносителя полная масса истекающего теплоносителя существенно меньше, что приводит к снижению силовых и тепловых нагрузок;

– отсутствует кризис теплообмена при кипении, ограничивающий удельную мощность активной зоны;

– снижение стоимости ЯЭУ за счет уменьшения капитальных затрат и металлоемкости установки вследствие упрощения ее конструктивной схемы; применение оборудования, унифицированного для обоих типов электростанций (тепловых и атомных).

Одной из главных задач при создании реактора супер-ВВЭР должно быть обеспечение безопасности работы ЯЭУ при номинальных, переходных и аварийных режимах. На безопасность значительное влияние оказывают гидродинамические и теплофизические процессы. В данной статье рассматривается модельная задача при течении теплоносителя в зазоре кольцевого канала. Зазор в 2,1 мм был выбран из условия равенства гидравлических диаметров исследуемой модели и реального ВВЭР, который исследуется в Обнинском государственном

техническом университете атомной энергетики Российской Федерации.

Физическая модель

В данной статье рассмотрена модель кольцевого канала с водой при сверхкритических параметрах в качестве рабочего тела. Данный объект рассмотрен в цилиндрической системе координат, где ось z направлена вдоль оси канала. Внутренний радиус $R_1 = 5,35$ мм, внешний радиус $R_2 = 7,45$ мм, длина $L = 4,05$ м.

Математическая модель

В настоящей работе численное исследование процессов гидродинамики и теплообмена в кольцевом канале проводилось на основе k - ε RNG модели турбулентности [2].

Математическая модель, описывающая режимы течения в круглом канале, формируется несколькими уравнениями: неразрывности, движения, энергии и замыкающих уравнений модели турбулентности:

$$\frac{\partial}{\partial z}(ru_z) + \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{zz}); \quad (2)$$

$$\rho \left(u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{rz}), \quad (3)$$

где $\tau_{rz} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)$, $\tau_{rr} = (2\mu + \mu_t) \frac{\partial u_r}{\partial r}$, $\tau_{zz} = 2\mu_{eff} \frac{\partial u_z}{\partial z}$ – напряжения, которые входят в уравнения (2) и (3), $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$.

Уравнение энергии представлено следующим образом:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u_r c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z c_p T) = \frac{\partial}{\partial r}(rq_r) + \frac{\partial}{\partial z}(rq_z), \quad (4)$$

где $q_r = \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}$, $q_z = \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z}$ – плотность теплового потока, $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t$.

Уравнение кинетической энергии турбулентности имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u_r k) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z k) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_k - \rho \varepsilon. \quad (5)$$

Последнее уравнение для замыкания математической модели – уравнение для скорости диссипации энергии:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u_r \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z \varepsilon) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{(C_1 \varepsilon G_k - C_2 \rho \varepsilon^2)}{k}, \quad (6)$$

где $G_k = \mu_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 \right\}$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $C_1 = 1,40$, $C_2 = 1,95$.

Турбулентная вязкость k - ε – модели: $\mu = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$.

При расчете было использовано уравнение состояния по Формуляции IF-97 [3].

При моделировании теплоноситель проходит через область 1, 2 и 3.

В области 1 основным уравнением является уравнение для удельной энергии Гиббса [3]:

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\beta, \theta) = \sum_{i=1}^{34} n_i (7,1 - \beta)^{l_i} (\theta - 1,222)^{j_i}, \quad (7)$$

где $\beta = p / p^*$ и $\theta = T^* / T$; $p^* = 16,53$ МПа,

$T^* = 1386$ К.

В области 2 основным уравнением является уравнение для удельной энергии Гиббса, разделенное на две части: идеально-газовую часть γ^0 и реальную часть γ^r [3]:

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\beta, \theta) = \gamma^0(\beta, \theta) + \gamma^r(\beta, \theta); \quad (8)$$

$$\gamma^0 = \ln \beta + \sum_{i=1}^9 n_i^0 \theta^{j_i^0}; \quad (9)$$

$$\gamma^r = \sum_{i=1}^{43} n_i \beta^{l_i} (\theta - 0,5)^{j_i}, \quad (10)$$

где $\beta = p / p^*$ и $\theta = T^* / T$; $p^* = 1$ МПа,

$T^* = 540$ К.

Значения коэффициентов и показателей степени для уравнений (9) и (10) приведены в [3].

Для области 3 основным уравнением является уравнение для удельной энергии Гельмгольца:

$$\frac{f(p, T)}{RT} = \Phi(\delta, \theta) = n_i \ln \delta + \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{l_i} \theta^{j_i}, \quad (11)$$

где $\delta = p / p^*$ и $\theta = T^* / T$; $p^* = p_{кр}$, $T^* = T_{кр}$.

Значения коэффициентов и показателей степени для уравнения (11) приведены в [3].

Приведенная изобарная теплоемкость рассчитывается отдельно для трех подобластей [4].

Динамическая вязкость и теплопроводность определяются из уравнений [4].

Расчетным методом для данной задачи был выбран метод контрольного объема [5].

Для численного решения задачи необходимо задать граничные условия.

На входе в канал условия имеют следующий вид:

$$u_z = u_0 = 0,5 \text{ м/с}, u_r = 0, T = T_0 = 290 \text{ }^\circ\text{C}, p = p_0 = 25 \text{ МПа}, Tu = 5 \% \text{ при } z = 0,$$

$$\text{где } Tu = \frac{1}{u_0} \sqrt{k}, Tu = \frac{1}{u_0} \sqrt{k}.$$

На внешней стенке кольцевого канала задавался нулевой тепловой поток – адиабатные условия $\frac{\partial t}{\partial r} = 0$. На внутренней стенке кольцевого канала задавался тепловой поток $q = q_0 = 0,5$ МВт/м².

Результаты расчета

Используя вышеуказанную математическую модель, получены данные для скорости, плотности, температуры, коэффициента теплоотдачи и кинетической энергии турбулентности.

На рис. 1 представлено распределение средних значений плотности теплоносителя по длине кольцевого канала. Приведены данные, полученные при моделировании, и данные работы [6]. Работа [6] была выбрана вследствие близкого значения параметров. Как

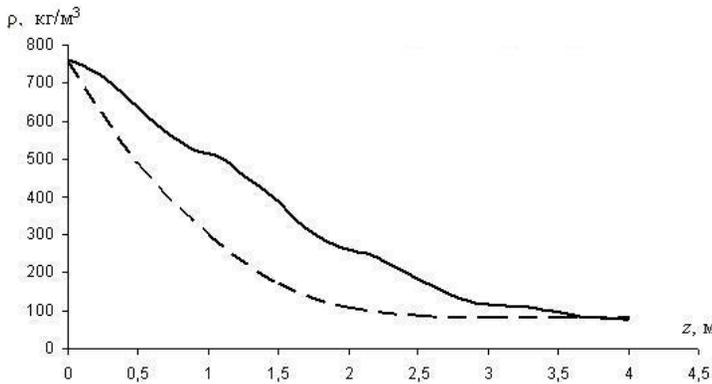


Рис.1. Распределение средних значений плотности теплоносителя по длине канала:
 ————— Данные работы [6]
 - - - - - Результаты моделирования.

видно из рис. 1, результаты моделирования показали удовлетворительное согласование с результатами работы [6]. Различия в графиках определяются конструктивной разницей каналов. Плотности от значений 760 кг/м^3 на входе при переходе на сверхкритические давления падают до значений около 80 кг/м^3 на выходе.

На рис. 2 представлено распределение скорости теплоносителя в центре зазора по длине кольцевого канала. Скорость от значения $0,5 \text{ м/с}$ на входе в канал возрастает почти до $4,7 \text{ м/с}$ на выходе из канала. Это происходит из-за изменения плотности теплоносителя, которая уменьшается при возрастании температуры. На расстоянии $2,8 \text{ м}$ от входа значение скорости теплоносителя больше существенно

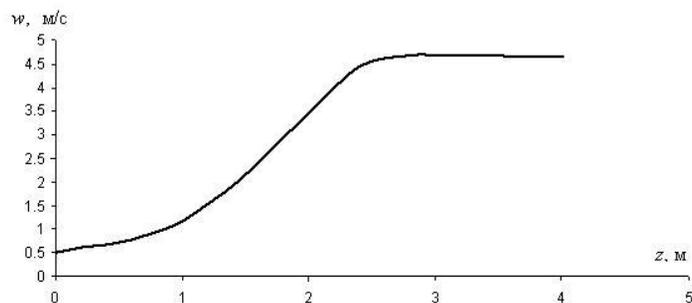


Рис. 2. Распределение скорости теплоносителя в центре зазора по длине канала.

не изменяется, так как плотность также не меняется.

На рис. 3 представлено распределение средних значений температур теплоносителя по длине кольцевого канала. Тут же представлены данные [6]. Температура теплоносителя от значения 563 К на входе при прохождении кольцевого канала возрастает до значения около 820 К на выходе. Как видно из рис. 3, результаты моделирования показали удовлетворительное согласование с результатами работы [6]. Хорошо совпадают входные и выходные параметры теплоносителя. Различия в графиках определяются конструктивной разницей каналов.

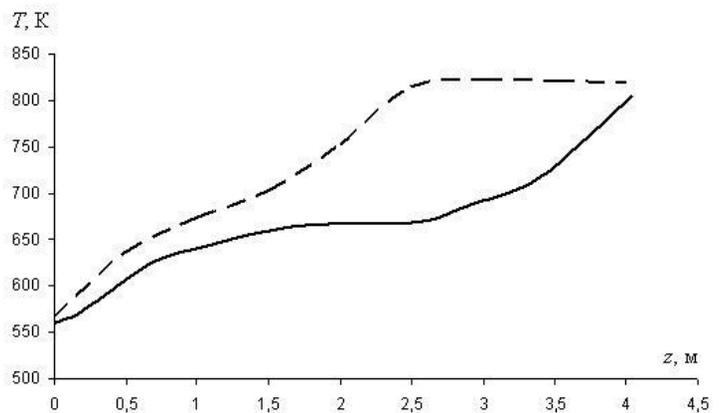


Рис. 3. Распределение средних значений температур теплоносителя по длине канала:
 ————— Данные работы [6]
 - - - - - Результаты моделирования.

На рис. 4 представлены значения коэффициента теплоотдачи на внутренней стенке кольцевого канала. Коэффициент теплоотдачи уменьшается на участке ламинарного течения и растет при переходном режиме течения. Затем происходит стабилизация теплообмена при турбулентном течении. Коэффициент теплоотдачи при стабилизированном теплообмене является величиной постоянной.

На рис. 5 представлено графическое изображение распределения кинетической энергии турбулентности в пяти сечениях по ширине кольцевого канала. Кинетическая энергия тур-

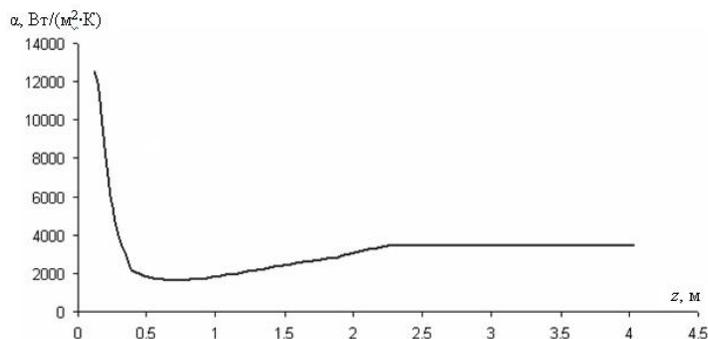


Рис. 4. Распределение коэффициента теплоотдачи на внутренней стенке кольцевого канала.

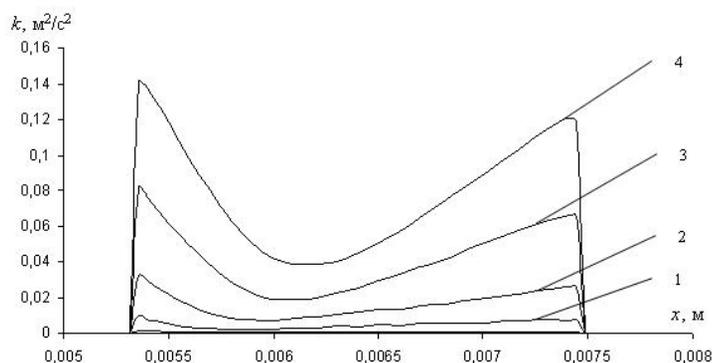


Рис. 5. Распределение кинетической энергии турбулентности в поперечных сечениях кольцевого канала: 1) $z = 0$ м, 2) $z = 1$ м, 3) $z = 1,5$ м, 4) $z = 2$ м, 5) $z = 4$ м.

булентности характеризует турбулентный обмен в пристеночном слое.

Как видно из рисунка, максимум кинетической энергии находится возле стенок

$$y^* = \frac{yu^*}{\nu}, \quad u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad y^* = 15...30$$

где y – расстояние от стенки.

Минимум эпюры смещен влево к обогреваемой стенке, что обусловлено уменьшением значения плотности из-за роста температуры.

На рис. 6 показан переход через критическую температуру теплоносителя из докритической области в сверхкритическую. В начале

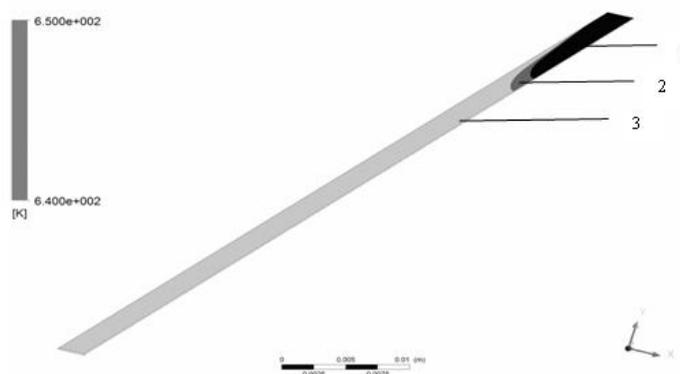


Рис. 6. Переход температуры от докритических параметров к сверхкритическим:

- 1) докритическая область $T < 640$ К,
- 2) переходная область $640 \text{ К} < T < 650$ К,
- 3) сверхкритическая область $T > 650$ К.

канала происходит скачкообразный переход теплоносителя в сверхкритическую область в диапазоне температур 640...650 К. Процесс переходит из области жидкости 1 в околокритическую область 3, а затем в закритическую область 2.

Выводы

1. На основе $k - \epsilon$ RNG модели турбулентности модифицирована математическая модель течения потока воды при до- и сверхкритических параметрах с учетом уравнения состояния.

2. Даная модель численно реализована, используя метод контрольного объема.

3. Результаты расчета позволили получить закономерности изменения гидродинамических и теплофизических характеристик потока сверхкритических параметров в кольцевом канале.

4. Предложенная модель позволяет определить зону существования различных термодинамических областей теплоносителя сверхкритических параметров, а также определить зоны перехода из одной области в другую.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Блинков В.Н., Габараев Б.А., Мелихов О.И., Соловьев С.Л.* Нерешенные проблемы тепло- и массообмена водоохлаждаемых реакторных установок со сверхкритическими параметрами теплоносителя. – М: ФГУП НИКИЭТ, 2008. – 85 с.
2. *Авраменко А.А., Б.И. Басок Б.И., Кузнецов А.В.* Групповые методы в теплофизике. – Киев.: Наукова думка, 2003 – 483 с.
3. *Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф.* Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: справочник. – М: Издательский дом МЭИ, 2009. – 224 с.
4. *Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М: Издательство стандартов, 1969. – 408 с.
5. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика. – Мир Год, 1980. – 612 с.
6. *Ягов П.В., Чуркин А.Н.* Программа ТЕМПА-СК: Моделирование теплогидравлических процессов в активной зоне ВВЭР-СКД. – Материалы международного семинара «Вода и пар сверхкритических параметров в атомной энергетике: проблемы и решения». – М: ФГУП НИКИЭТ, 2008. – с. 27-29.
7. *Курганов В.А.* Теплообмен и сопротивление в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя. – Теплоэнергетика, 1998. – вып.3. – 2 с.
8. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М: Наука, 1974 – 711 с.

Получено 16.09.2010 г.