

**ПРОГРАММА МИФ-СКД ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА АКТИВНОЙ
ЗОНЫ РЕАКТОРА, ОХЛАЖДАЕМОГО ВОДОЙ ПРИ СКД****АННОТАЦИЯ**

В настоящее время основу тепловой энергетики многих стран мира составляют энергоблоки сверхкритического давления. Основываясь на многолетнем опыте их эксплуатации, предлагается разработать новый тип ядерного реактора на быстрых нейтронах, охлаждаемого водой при сверхкритическом давлении. Это позволит существенно повысить экономические показатели ЯЭУ.

В докладе приводятся результаты анализа теплогидравлических характеристик тепловыделяющих сборок, охлаждаемых водой при сверхкритическом давлении, выполненного на базе поканального метода. Разработанная программа МИФ-СКД, построенная по блочному принципу, позволяет рассчитывать распределения температуры и скорости теплоносителя в каналах ТВС, температуры оболочек твэлов и чехлов ТВС при нерегулярных геометрических характеристиках и неравномерном распределении энерговыделения по длине и радиусу ТВС.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения экономических и экологических показателей водоохлаждаемых реакторов может быть решена путем увеличения давления в контуре.

Основываясь на многолетнем опыте тепловой энергетики, ряде проектов АЭС, в настоящее время проводятся оценки физических и теплогидравлических характеристик реактора на быстрых нейтронах, охлаждаемого водой сверхкритических параметров.

Критическое давление воды равно 22,064 МПа. При больших давлениях отсутствует фазовый переход жидкость-пар. Тепло отводится в основном в области псевдокритической температуры, которая определяется как температура, соответствующая максимуму теплоемкости. Для сверхкритического давления 25 МПа эта температура составляет ~ 385°C. При СКД отсутствует такое явление, как критический тепловой поток, который в ВВЭР (PWR, BWR) может привести к пережогу твэлов.

К настоящему времени выполнено большое количество экспериментальных и расчетных работ по исследованию теплогидравлических характеристик при течении воды при сверхкритическом давлении в трубе и только одна экспериментальная работа для пучков стержней на воде. В настоящее время проводятся опыты на фреоне.

Наличие расчетной программы для определения локальных теплогидравлических характеристик ТВС, охлаждаемых водой при сверхкритическом давлении, позволит проводить расчеты для оптими-

зации геометрических и режимных показателей, оценить чувствительность рабочих параметров к изменению входных условий.

Цель настоящей работы – модифицировать поканальную программу МИФ для расчета теплогидравлических характеристик ТВС реактора, охлаждаемого водой при СКД, и сопоставить результаты расчетов с имеющимися экспериментальными данными.

2. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СКД

Обзор особенностей теплообмена при СКД представлен в [5], где показано, что эти особенности связаны с тремя моментами:

- 1) резким изменением теплофизических свойств с температурой;
- 2) ускорением потока из-за изменения плотности по длине канала при подогреве;
- 3) развитием естественной конвекции за счет архимедовых сил в связи с разницей плотностей в различных точках сечения потока.

Температура, соответствующая максимуму теплоемкости $c_p(T)$, называется “псевдокритической” (T_m) и может быть оценена как

$$T_m [\text{K}] = \frac{4924,9229}{24,5204 - \ln p}, \quad (1)$$

где p [Па]. Температуре T_m соответствует энтальпия h_m .

Сильное уменьшение плотности с температурой вызывает ускорение потока, вычисляемое из теплового баланса [6, 7] как

$$\frac{d\bar{w}}{dx} = \pm \frac{4q\beta\bar{G}}{d \cdot \rho^2 c_p}, \quad (2)$$

где «+» относится к случаю нагревания; «-» к охлаждению; G – массовая скорость, кг/(м²·с).

Ускорение потока приводит к уменьшению турбулентности, перемешивания, пульсаций скорости, температуры и, таким образом, к ухудшению теплообмена. Коэффициент сопротивления трения ξ при термическом ускорении значительно ниже, чем в изотермическом потоке ξ_0 : $\xi/\xi_0 \approx 0,2 - 1,0$, а основная часть перепада давления в трубах затрачивается на ускорение потока.

В связи с разницей плотностей вблизи стенки и в центре потока возникают архимедовы силы, которые при нагреве приводят к образованию M -образного профиля скорости с максимумом вблизи стенки. Здесь $\partial w/\partial r=0$, а следовательно, и кас-

тельное напряжение в этой точке равно нулю. Таким образом, за счет ускорения потока и естественной конвекции при подъемном течении вблизи стенки образуется «запирающий слой», препятствующий переносу тепла, в котором турбулентная теплопроводность и турбулентная температуропроводность $\alpha = \lambda_T / (\rho c_p)$ малы. В конечном счете, это приводит к ухудшению теплообмена в межфазной области и к повышению температуры стенки при $q = \text{const}$.

Роль естественной конвекции в теплообмене учитывается критериями GrRe^{-2} или критерием $k = (1 - \rho_w / \rho_f) \text{GrRe}^{-2}$. Здесь $\text{Gr} = g(1 - \rho_w / \rho_f) d^3 / \nu^2$; $\text{Re} = \text{Gd} / \mu_f$.

При $k < 0,4$ или $\text{GrRe}^{-2} < 0,6$ наблюдается снижение (ухудшение) теплоотдачи, а при больших значениях этих величин — улучшение теплоотдачи.

3. ЗАМЫКАЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПРОГРАММЫ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Анализ соотношений гидравлического сопротивления и теплообмена в пучках стержней (с проволочной навивкой и без) с учетом влияния переменности свойств теплоносителя позволил разработать систему замыкающих соотношений.

Так для неизотермического режима (с учетом изменения свойств по длине канала) в работе [8] рекомендована формула

$$\xi = \left[\frac{0,55}{\lg \frac{\text{Re}_x}{8}} \right]^2 \left(\frac{\rho_w}{\rho_f} \right)_x^{0,2} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{in}} \right)_x^{0,2} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{in}} \right)_x^{0,1} \pm 20\%. \quad (3)$$

Здесь индекс *in* указывает на то, что свойства берутся при температуре воды, *f* — при температуре пара, *w* — при температуре стенки, *x* — указывает на значения параметров в сечении, отстоящем от начала пучка на расстоянии *x*.

Согласно обработке данных единственного эксперимента на пучке из 7 стержней с витыми ребрами при $p = 24,5$ МПа, опубликованных в [12], коэффициенты теплообмена подчиняются зависимости:

$$\text{Nu} = 0,021 \text{Re}_x^{0,8} \text{Pr}_x^{0,7} \times \left(\frac{\rho_w}{\rho_f} \right)^{0,45} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{in}} \right)^{0,2} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{in}} \right)^{0,1} \left(1 + \frac{2,5}{x/d\Gamma} \right), \quad (4)$$

Точность формулы $\pm 20\%$.

4. ПОКАНАЛЬНЫЙ МЕТОД ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

Поканальная программа МИФ-СКД является модифицированной версией кода МИФ, разработанного ранее в ГНЦ РФ ФЭИ (см., например, в [9]). В свое время программа МИФ (межканальный обмен и формоизменение) предназначалась для теплогидравлического расчета формоизмененных ТВС с жидкометаллическим теплоносителем. Программа позволяет учитывать наличие дистанционирующих устройств, деформацию чехла ТВС и пучка твэлов,

локальные геометрические и мощностные неравномерности, стохастические отклонения параметров от номинального значения и другие факторы.

Впоследствии была разработана версия программы МИФ-ВВ для расчета теплогидравлики ТВС, охлаждаемых водяным теплоносителем, в гомогенном приближении.

Следующим шагом развития программы МИФ явилась модификация программы применительно к сверхкритическим параметрам, учитывающая особенности теплообмена, изложенные выше. Новая версия МИФ-СКД позволяет рассчитать температуру теплоносителя в любом сечении по высоте в каждой ячейке ТВС, температуру оболочки твэлов, распределение температуры чехла ТВС, учитывая при этом переменность свойств теплоносителя по длине ТВС, переменность скорости теплоносителя, неравномерность энерговыделения по длине и в поперечном сечении ТВС, наличие дистанционирующих устройств и другие факторы.

Закритическое давление снимает некоторые проблемы теплоотвода из реактора, присущие докритическому. В частности, при закритическом давлении отсутствует область совместного существования паровой и жидкой фаз — во всем используемом интервале вода представляется одной фазой, что позволяет проводить расчеты в гомогенном приближении.

Теплогидравлический расчет включает ряд этапов. Прежде всего производится считывание файла тепловыделения. Программа МИФ-СКД позволяет задавать любые профили энерговыделения по высоте. В частности, в работе [15] был предложен вариант «слоеного» по высоте реактора для того, чтобы избежать положительного пустотного эффекта реактивности. Для выравнивания энерговыделения по высоте и радиусу активной зоны предлагалось профилирование загрузки топлива.

На следующем этапе рассчитывается геометрия сборки и производится формирование расчетной сетки.

Табличное задание энерговыделения позволило учесть неравномерность поля энерговыделения по высоте ТВС.

Свойства теплоносителя (плотность, энтальпия, коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости и т.д.) рассчитывались в соответствии с «Системой уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах 1997 года» [14].

Входными данными программы являются: геометрия сборки и твэла, распределение энерговыделения, расход.

Конечно-разностные вычисления выполняются вплоть до окончания зоны энерговыделения.

В результате расчета в выходной файл записываются следующие данные: 1) входные данные; 2) доля мощности в торцевых экранах; 3) таблица исходных параметров ТВС; 4) геометрические характеристики (зазор между периферийными твэлами и

чехлом у каждой грани без учета выпуклостей грани, диаметр твэлов и средний шаг твэльной решетки) на каждом высотном шаге.

По желанию пользователя в интересующем сечении по высоте могут быть выведены в виде картограмм твэлов или каналов следующие величины: энерговыделение твэлов; энерговыделение в каналах; площади сечений каналов (относительные); средний шаг решетки (относительный); скорость теплоносителя (относительная); параметры межканального массообмена; параметры межканального теплообмена; температуры теплоносителя в каналах; максимальные температуры оболочек твэлов (без факторов перегрева); максимальные неравномерности подогрева по периметру твэлов; относительные подогревы теплоносителя в каналах; максимальные относительные подогревы около каждого твэла; температуры теплоносителя в зазоре между ТВС и температуры внутренней поверхности шестигранного чехла; температуры оболочек всех твэлов в 12 точках по периметру; средний по сечению ТВС подогрев теплоносителя в интересующем высотном сечении.

Пробные расчеты по разработанной программе проводились для ВВЭР-СКД [10] и SCFR [1].

5. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТОВ ПО МИФ-СКД И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Подавляющее число опытов по изучению теплогидравлики воды при СКД были проведены на трубах. К сожалению, первичные данные единственных опытов на пучке стержней при сверхкритическом давлении воды [8] были утеряны, поэтому для верификационных расчетов были выбраны данные, полученные в ГНЦ РФ ФЭИ.

Опыты проводились на электрообогреваемой трубе внутренним диаметром 10 мм и длиной 4 м [11, 12], установленной на стенде СКД.

В свое время в работе [13] на основе обширных экспериментов, выполненных в пучках различной геометрии, а также многочисленных данных других авторов, полученных для 63 пучков различной конструкции, была рекомендована обобщенная зависимость для расчета теплообмена в продольно обтекаемых пучках труб или стержней, охлаждаемых газами и неметаллическими невязкими жидкостями:

$$\frac{Nu_{пучка}}{Nu_{тр}} = 1 + 0,91 Re^{-0,1} Pr^{0,4} [1 - 2 \exp(-B)], \quad (5)$$

$$где для треугольной решетки B = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{S}{d}\right)^2 - 1.$$

Сравнение опытных и расчетных данных для одного режима в соответствии с этой методикой представлено на рис. 1. Показано их удовлетворительное согласование.

Расчеты по программе МИФ-СКД сравнивались с данными первых экспериментов, проведенных в ГНЦ РФ ФЭИ на стенде сверхкритического давления с фреоном в качестве теплоносителя. Получено удовлетворительное совпадение.

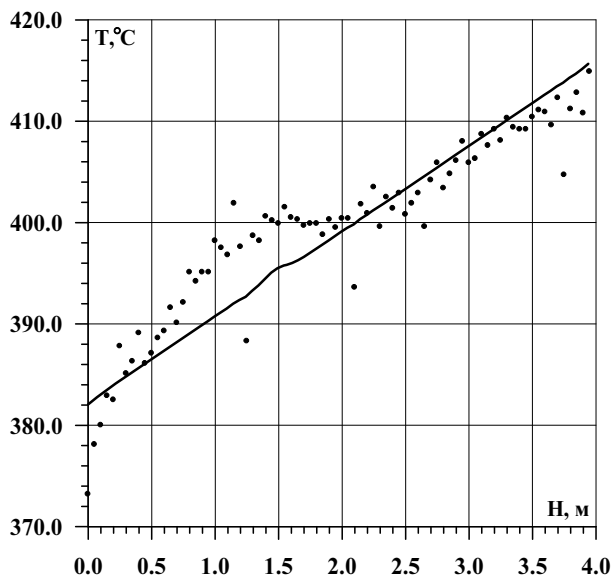


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и расчетных распределений температуры стенки по высоте канала для следующих параметров: $p_{вх} = 24,202$ МПа; $\rho W = 506$ кг/м²с; $t_{вх} = 352$ °С; $G = 0,03972$ кг/с (точки – эксперимент, линия – расчет)

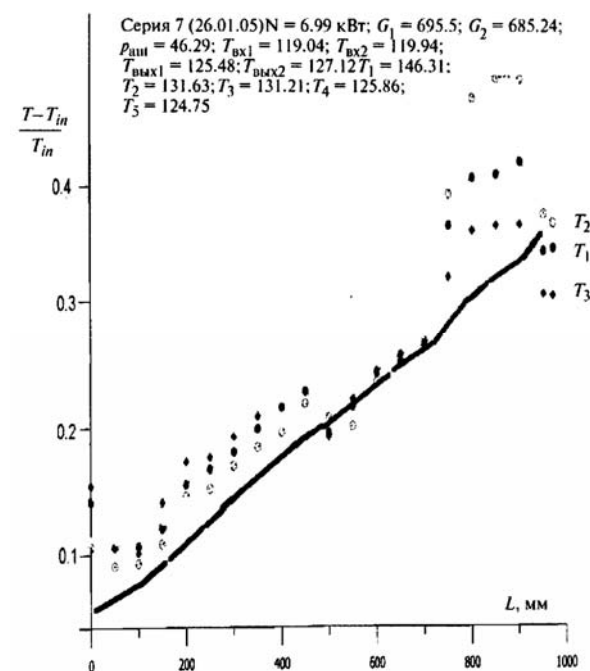


Рис. 2. Сравнение результатов расчета и экспериментов по температуре стенки имитатора твэла в пучке, охлаждаемого фреоном (параметры опыта: $N = 7$ кВт, $p_{in} = 46,31$ бар; $p_{out} = 46,29$ бар; $\rho W = 670$ кг/м²с; $t_{in} = 119,94$ °С), линия – расчет

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате модификации поканальной программы МИФ разработана новая версия МИФ-СКД, позволяющая рассчитывать теплогидравлику тепло-

выделяющих сборок, охлаждаемых водой при сверхкритическом давлении.

Программа учитывает особенности теплообмена и гидродинамики при сверхкритических параметрах, переменность свойств в околокритической области, неравномерное энерговыделение по высоте активной зоны, наличие дистанционирующих устройств, возможную деформацию ТВС.

Программа позволяет рассчитать температуру теплоносителя в любом сечении по высоте в каждой ячейке ТВС, распределение температуры оболочки твэлов по периметру, распределение температуры чехла ТВС.

Предварительная верификация программы показала удовлетворительное согласование с экспериментом.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Министерства промышленности и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Oka Y, Koshizuka S.** Design Concept of Once-Through Cycle Supercritical Pressure Light Water Cooled Reactors. Proceeding of the First International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors, Design and Technology. Nov. 6-9. Tokyo, Japan. 2000. Rep. 101. P. 1 - 22.
2. **Heusener G., Muller, Schulenberg T., Squarer D.A.** European Development Program for a High Performance Light Water Reactor (HPLWR). Proceeding of the First International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors, Design and Technology. Nov. 6-9. Tokyo, Japan. 2000. Rep. 102. P. 23 - 28.
3. **Conceptual** Designs for Advanced, High Temperature CANDU Reactors // S.J. Bushby et al. Proceeding of the First International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors, Design and Technology. Nov. 6-9. Tokyo, Japan. 2000. Rep. 103. P. 29 - 36.
4. **Oka Y.** Review High Temperature Water and Steam Cooled Reactor Concept. Proceeding of the First International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors, Design and Technology. Nov. 6-9. Tokyo, Japan. 2000. Rep. 104. P. 37 - 57.
5. **Грабежная В.А., Кириллов П.Л.** О расчетах теплообмена в трубах и пучках стержней при течении воды сверхкритического давления: Обзор ФЭИ- 0297. ЦНИИАтоминформ. 2003.
6. **Петухов Б.С., Поляков А.Ф.** Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. М.: Наука. 1986.
7. **Поляков А.Ф.** О механизме и границах возникновения режимов с ухудшенной теплоотдачей при сверхкритическом давлении теплоносителя. Теплофизика высоких температур. 1975. 13. № 6. С. 1210 - 1219.
8. **Дядякин Б.В., Попов А.С.** Теплоотдача и гидравлическое сопротивление тесного семистержневого пучка, охлаждаемого потоком воды при закритических параметрах состояния. Труды Всесоюзного теплотехнического НИИ. 1977. № 11. С. 244-253.
9. **Методические** указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов: РТМ 1604.008-88. Обнинск. 1988.
10. **Кириллов П.Л.** Сверхкритические параметры – будущее реакторов с водным теплоносителем и АЭС // Атомная техника за рубежом. 2001. №6. С. 3-8.
11. **Распределение** температуры в турбулентном потоке воды при сверхкритических давлениях (круглая труба) / П.Л. Кириллов, А.А. Колосов, Э.А. Петрова и др. //Препринт ФЭИ-1766. Обнинск. 1986.
12. **Кириллов П.Л., Ложкин В.В., Смирнов А.М.** Исследование границ ухудшенных режимов канала при сверхкритических давлениях / Препринт ФЭИ-2988. Обнинск. 2003.
13. **Marcoczy G.** Konvektive Wärmeübertragung in lang-sangestromten Stabbündeln bei turbulenter Stromung. – Wärme- und Stoffübertrag. 1972. Bd.5. №4. P. 204-212.
14. **Александров А.А.** Система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах // Теплоэнергетика. Часть 1: №9, С. 69-77. Часть 2. №10. 1998. С. 64-72.
15. **Баранав Ю.Д., Кириллов П.Л., Поплавский В.М., Шарапов В.Н.** Ядерные реакторы на воде сверхкритического давления // Атомная энергия. 2004. Т. 96. Вып.5. С. 374-380.