

ВНЕШНЯЯ ЗАДАЧА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МЕТОДИКЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА ДЛЯ РЕШЕНИЯ СОПРЯЖЕННОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛООБМЕНА В СБОРКАХ СТЕРЖНЕВЫХ ТВЭЛОВ

В.С. Гольба, **А.С. Шелегов**

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



Получены частные решения уравнения энергии (отклики температур) для теплоносителя численным образом. Отклики температур используются при решении сопряженной задачи теплообмена в сборках стержневых ТВЭлов. Проведено качественное сравнение расчетных откликов температур с откликами температур, полученными экспериментально для эквивалентного кольцевого канала. Численное решение внешней задачи позволяет не проводить дорогостоящих экспериментов.

ВВЕДЕНИЕ

Создание ядерных реакторов повышенной безопасности, таких как проект БРЕСТ-ОД-300, является одной из приоритетных задач развития атомной энергетики. Для теплогидравлического и нейтронно-физического обоснования активной зоны этого реактора необходим комплексный подход, предполагающий проведение экспериментальных исследований и расчетов, с использованием новейших компьютерных технологий и расчетных кодов. Только расчетно-экспериментальная база позволяет детально изучить все процессы, которые будут протекать в ядерном реакторе. Если нейтронно-физические характеристики реактора БРЕСТ изучены довольно хорошо, то теплогидравлика этого реактора исследована еще не в полном объеме. Проведенные экспериментальные исследования [1-3] показали необходимость дальнейшего проведения работ по изучению теплогидравлики. Данные этих экспериментов используются для верификации расчетных кодов, основанных на различных методиках расчета. В качестве примера можно отметить следующие расчетные коды: ТЕМП, ТИГР-БРС и CONTACT, который предполагал проведение экспериментов по определению откликов температур внешней задачи (для теплоносителя). В данной статье пойдет речь о методике [4], использующей модифицированный принцип суперпозиции температур, на основе которой был разработан расчетный код CONTACT-M, который позволяет рассчитывать поля температур и тепловых потоков в сборке стержневых ТВЭлов быстрых реакторов в сопряженной постановке задачи (ТВЭЛ-теплоноситель) без проведения экспериментов.

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ТЕМПЕРАТУР

Сопряженная задача теплообмена для сборки твэлов записывается в форме уравнений энергии для теплоносителя (1), уравнения теплопроводности для твэлов сборки (2) и условий сопряжения на границе твэл-теплоноситель (3).

$$\operatorname{div}(\lambda \vec{\nabla} t) = \rho C_p (\vec{w} \vec{\nabla} t) - q_v, \quad (1)$$

$$\operatorname{div}(\lambda \vec{\nabla} t) = -q_v. \quad (2)$$

$$\begin{cases} t_{\text{ж}}(z=0) = t_{\text{ж.вх}} \\ t_{\text{ж}}|_{\Gamma} = t_{\text{ТВ}}|_{\Gamma} \\ \lambda_{\text{ТВ}} \frac{\partial t}{\partial r}|_{\Gamma} = \lambda_{\text{ж}} \frac{\partial t}{\partial r}|_{\Gamma}. \end{cases} \quad (3)$$

Решение сопряженной задачи теплообмена (1)-(3) по предлагаемой методике модифицированного метода суперпозиции температур, как уже было отмечено выше, предполагает разбиение задачи на две составляющие: внутреннюю задачу для твэлов сборки и внешнюю задачу для теплоносителя, которые объединяются с помощью условия сопряжения (3) на границе твэл-теплоноситель. Решение внутренней задачи, применительно для твэлов сборки ранее было рассмотрено в [4,5,6], в данной статье авторы подробнее остановятся на решении внешней задачи для теплоносителя.

ПОСТАНОВКА ВНЕШНЕЙ ЗАДАЧИ

Так же, как и в случае внутренней задачи для твэлов сборки, решение уравнения (1) в случае внешней задачи находится в форме выражения (4). При этом необходимо найти частные решения уравнения (1) или отклики температур внешней задачи при следующих граничных условиях (рис. 2):

$$t(\xi, \zeta, \eta) = \int_S q(r, \varphi, z) G(r, \varphi, z, \xi, \zeta, \eta) dS + C, \quad (4)$$

$$\begin{cases} t_c(r, \varphi, 0) = t_{\text{ж.вх}}, \\ \lambda_{\text{ж}} \frac{\partial t_{[i,j]}}{\partial n} S_{[i,j]} = \lambda_{\text{ТВ}} \frac{\partial t_{[i,j]}}{\partial n} S_{[i,j]}, \text{ на тепловом источнике} \\ \lambda_c \frac{\partial t}{\partial n} = 0, \text{ на площадках вне теплового источника.} \end{cases} \quad (5)$$

Область течения теплоносителя разбивается на соответствующие каналы (рис. 1). Из этого канала с целью экономии машинных ресурсов выделяется расчетный участок для уменьшения количества расчетных узлов. На входе в канал задается плоский профиль скорости. Для данного канала решаются совместно уравнения неразрывности (6) и количества движения (7) для теплоносителя:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho U_z)}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

$$\rho \frac{dU}{d\tau} = \rho F + \operatorname{div}(\mu S) - \operatorname{grad} \left(P + \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} U \right), \quad (7)$$

где U_x, U_y, U_z – проекции вектора скорости на оси прямоугольной системы координат.

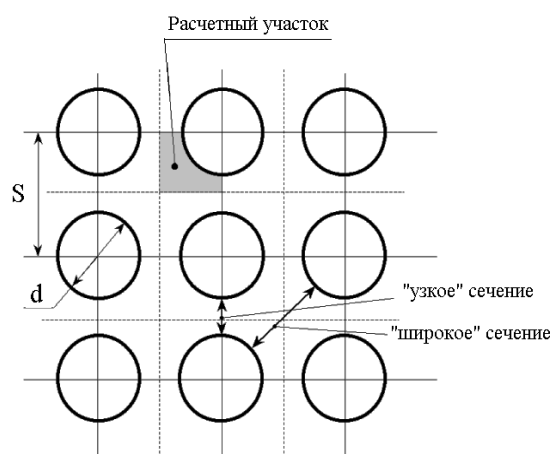


Рис. 1. Квадратная упаковка твэлов: S - шаг решетки твэлов, d - наружный диаметр твэла, - - - - линии максимальных скоростей

нат; F – массовая сила, действующая на поток жидкости; S – тензор скоростей деформаций.

Результатом этого решения является профиль скорости. При нахождении профиля скорости использовалась стандартная модель турбулентности (k -е модель).

Отклики температур внешней задачи от действия теплового источника находились из решения уравнения энергии для теплоносителя (8) на площадках слоя, где расположен сам источник и вниз по потоку от него для двух случаев: в случае расположения источника в зоне "узкого" сечения и в случае расположения источника в зоне "широкого" сечения. Уравнение энергии для однофазной жидкости с произвольной зависимостью физических свойств от температуры и давления, но при отсутствии в потоке переноса тепла излучением, имеет вид:

$$\rho \frac{dh}{d\tau} = \text{div}(\lambda \text{grad} t) + q_v + \frac{\partial p}{\partial \tau} + \Phi. \quad (8)$$

Длина канала выбирается из условия, что на участке, где расположен тепловой источник, профиль скорости уже развит.

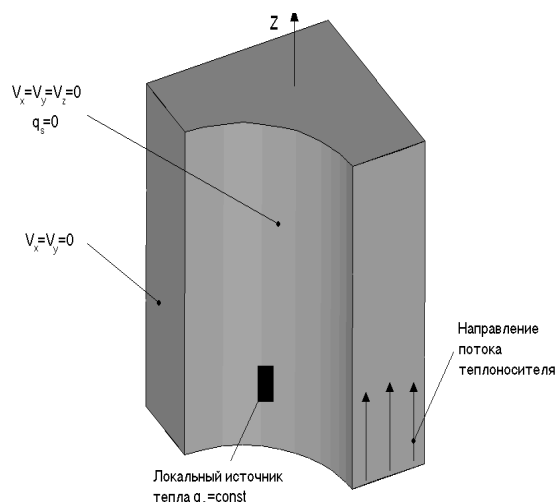


Рис.2. Постановка граничных условий внешней задачи

Расчетный участок разбивался в осевом направлении на N элементарных участков (слоев) длиной Δz . Пусть n - число слоев, при котором $n\Delta z$ - длина радиальной тепловой стабилизации или длина, на которой происходит стабилизация коэффициента теплоотдачи при данных характеристиках и режимных параметрах сборки, взятой по эквивалентному гидравлическому диаметру для кольцевого канала. Тогда для слоев с $i=1$ по $i=n$ для температуры теплоносителя на границе с любой площадкой поверхности любого твэла можно записать выражение:

$$t_{[i,j]} - t_{ж\text{ вх}} = \sum_{\eta=1}^i \sum_{\zeta=j-m}^{j+m} \frac{t_{[i,j][\eta,\zeta]}^{ext} - t_{ж\text{ вх}}^{ext}}{q_{[\eta,\zeta]}^{ext}} q_{[\eta,\zeta]} + \Delta t_{q_{v,j}}, \quad j = 1, \dots, k, \quad (9)$$

где m - половина числа площадок на любом из слоев, оказывающих температурное влияние на площадку с координатами $[i, j]$ и расположенных по обе стороны в тангенциальном направлении от осевой образующей, на которой расположена данная площадка; $(t_{[i,j][\eta,\zeta]}^{ext} - t_{ж\text{ вх}}^{ext})/q_{[\eta,\zeta]}^{ext}$ - отклик температуры теплоносителя на границе с площадкой $[i, j]$ от действия локального источника $q_{[\eta,\zeta]}^{ext}$ с площадки $[\eta, \zeta]$. Δt_{q_v} - вклад от тепловыделений в теплоноситель.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Из совместного решения уравнений неразрывности и количества движения были получены пространственные распределения полей скоростей в сборке стержневых твэлов. На рис. 3 и 4 показаны распределение осевой составляющей скорости W_z по сечению расчетной ячейки и графики распределения этой составляющей в широком и узком зазорах ячейки.

По найденному пространственному профилю скорости для данного расчетного участка численным образом определялись частные решения уравнения энергии для теплоносителя или отклики температур. На рис. 5 и 6 приведены типичные отклики температур для источника, расположенного в «широком» зазоре ячейки сборки имитаторов твэлов [3], имеющей квадратную решетку с относительным шагом $s/d=1,46$. Угловая координата $\varphi=0$ соответствует оси источника.

Полученные отклики хорошо коррелируют с экспериментальными данными, приведенными в [7]. Однако проведение таких экспериментов весьма трудоемкое и дорогостоящее занятие, поэтому авторы полагают, что разработанная методика численного нахождения откликов температур внешней задачи может являться существен-

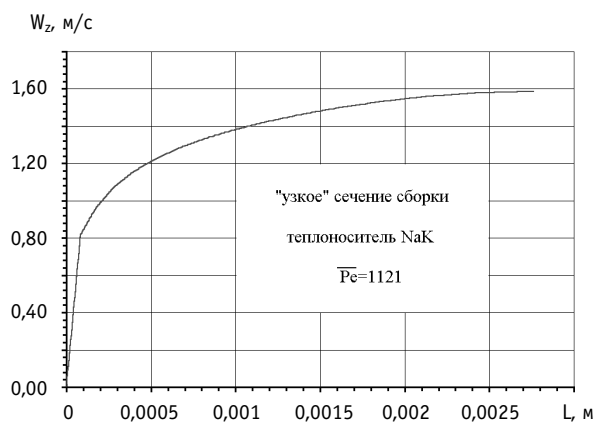


Рис.3. Профиль скорости в «узком» зазоре ячейки модельной сборки твэлов, имеющей квадратную решетку с относительным шагом $s/d=1,46$

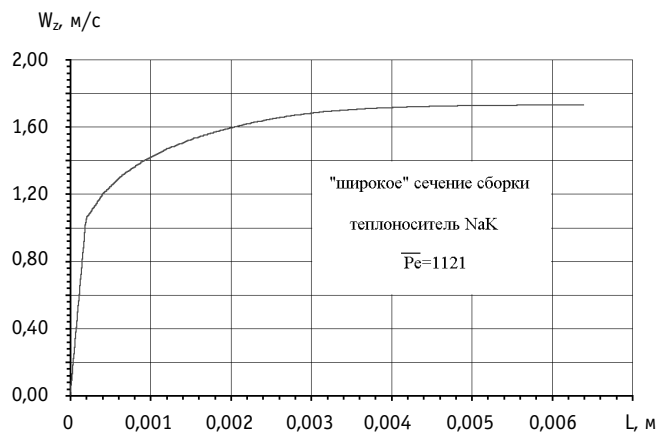


Рис.4. Профиль скорости в "широком" зазоре ячейки модельной сборки твэлов, имеющей квадратную решетку с относительным шагом $s/d=1,46$

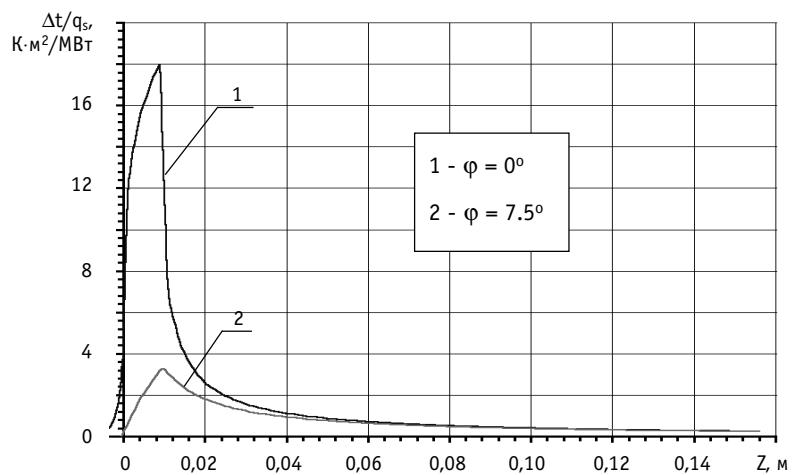


Рис.5. Значения откликов температур внешней задачи для положения источника в "широком" зазоре ячейки модельной сборки

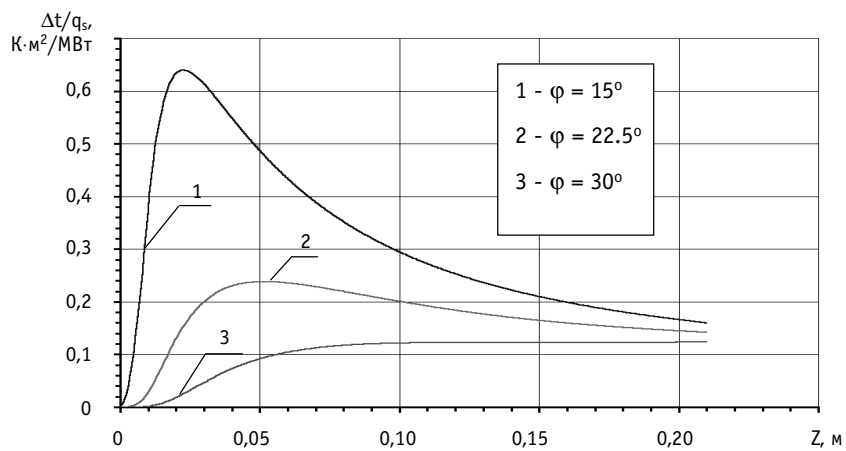


Рис. 6. Значения откликов температур внешней задачи для положения источника в "широком" зазоре ячейки модельной сборки

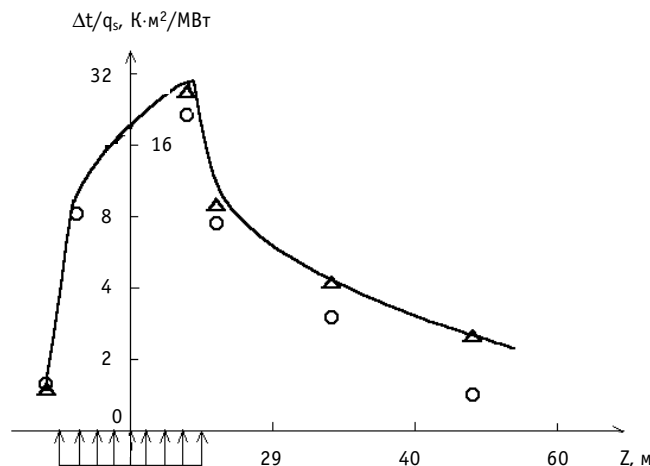


Рис. 7. Отклики температур внешней задачи: — расчет и Δ - эксперимент для кольцевого канала; \bigcirc - экспериментальные данные для случая положения источника в зоне широкого сечения экспериментальной сборки

ным дополнением к ряду существующих методик решения сопряженных задач теплообмена. На рис. 7 приведен отклик температуры внешней задачи, полученный экспериментально для треугольной упаковки твэлов.

Литература

1. Орлов В.В., Леонов В.Н., Сила-Новицкий А.Г. и др. Конструкция реактора БРЕСТ. Экспериментальные работы для обоснования концепции реактора БРЕСТ. Результаты и планы/Международный семинар «Быстрый реактор и топливный цикл естественной безопасности для крупномасштабной энергетики. Топливный баланс, экономика, безопасность, отходы, нераспространение». М.: Минатом, 2000 (доклад № 13).
2. Ефанов А.Д., Жуков А.В., Кузина Ю.А. и др. Экспериментальное и расчетное изучение вопросов теплогидравлики активной зоны быстрых реакторов типа БРЕСТ (свинцовое охлаждение)/Международный семинар «Быстрый реактор и топливный цикл естественной безопасности для крупномасштабной энергетики. Топливный баланс, экономика, безопасность, отходы, нераспространение». - М.; Минатом, 2000 (доклад № 14).
3. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. и др. Экспериментальное изучение на моделях теплообмена в активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым охлаждением//Теплоэнергетика. - 2002. - № 3. - С. 2-10.
4. Шелегов А.С., Гольба В.С., Орлов Ю.И. Расчет полей температур и скоростей в сборках твэлов, охлаждаемых жидкометаллическим теплоносителем и имеющих квадратную решетку, с использованием модифицированного принципа суперпозиции температур//Теплоэнергетика. - 2003. - № 7.
5. Гольба В.С., Иваненко И.Ю., Шелегов А.С. Современный подход к решению сопряженной задачи теплообмена для сборки твэлов, охлаждаемой жидкометаллическим теплоносителем, с использованием модифицированного метода суперпозиции температур//Тезисы докладов VII-й Международной конф. «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (Обнинск, 8-11 октября 2001 г.) - Обнинск: ИАТЭ, 1998. - С. 35.
6. Golba V.S., Ivanenko I.J. and Zinina G.A. Solution of the Conjugated Heat Transfer Problem for the Fuel Elements Assemblies//Proc. Fourth International Seminar on Subchannel Analysis, Tokyo, September 25-26, 1997.
7. Golba V.S., Belozarov V.I., Ivanenko I.J. et al. Calculation and experimental research of the temperatures in the ring channel and the tube bundle with local heat source at the inside wall//Proc. 4th world conf. on experimental heat transfer, fluid-dynamics and thermodynamics, 2-6 June 1997, Brussels.

Поступила в редакцию 30.07.2003

УДК 621.039.54

External Problem with Reference to a Technique of a Local Heat Source for the Calculation of the Conjugated Heat Transfer Problem in Fuel Rods Assemblies \V.S. Golba, A.S. Shelegov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 6 pages, 7 illustrations. – References, 7 titles.

The partial solutions of the energy equation (responses of temperatures) for the coolant by a numerical method are obtained. The responses of temperatures are used for solution of the conjugate heat transfer problem in fuel rod assembly. Qualitative comprising of calculation responses and experimental responses of temperatures for the equivalent ring channel is presented. The numerical solution of the external problem allows doing without expensive experiments.

УДК 532.582

Derivation and Generalization of the Form-Factors for Quasi-one-dimension Models of Wall Friction, Heat- and Mass Transfer Coefficients in Non-homogeneous Coolant Flow. Channels of Annular Geometry \ Yu.N. Kornienko; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 10 pages, 2 illustrations, 2 tables. – References, 12 titles.

Proposed earlier [1] method of derivation and construction of generalized closure relationships based on form-factor notion for friction, heat- and mass transfer coefficients is extended on description of non-homogeneous coolant flow in an annular channel. The generalized closure relationship between friction, heat- and mass transfer coefficients for each of the wall with their total channel value is presented. An extended form-factors' descriptions derived, and it generalizes Lyon-type integral relationships for friction, heat- and mass transfer coefficients not only for thermophysical properties and generalized body forces distributions, but also annular channel geometry.