

УДК 621.039

А.А. Добров, К.Г. Иванова, М.А. Легчанов, Н.П. Курбатова, И.Ю. Ляхов

**ПОЛУЧЕНИЕ В CFD-ПРОГРАММЕ ЛОГОС КОЭФФИЦИЕНТОВ
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЯЧЕЕК ТВС
С ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ МОДЕЛИ
ОДНОМЕРНОГО ПОЯЧЕЙКОВОГО РАСЧЕТА АКТИВНОЙ ЗОНЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена разработке методики использования результатов гидродинамического расчета в трехмерной CFD-программе ЛОГОС для формирования недостающих данных о коэффициентах местного гидравлического сопротивления дистанционирующей решетки ТВС в программе одномерного поячейкового расчета активной зоны.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, вычислительная гидродинамика.

Повышение требований к качеству и уровню обоснования технических решений, используемых при проектировании ядерных энергетических установок, а также ограничение стоимости и сроков НИР при выборе оптимальных конструкций приводит к необходимости совершенствования программных средств, применяемых для моделирования физических процессов. Реакторная установка при номинальных режимах эксплуатации может работать на тех уровнях мощности, для которых обеспечивается достаточное охлаждение «самых горячих» участков тепловыделяющихборок (ТВС). Поэтому теплогидравлический расчет активной зоны имеет одно из определяющих значений при проектировании реактора.

Инженерный уровень определения теплогидравлических характеристик активной зоны основан на использовании поячейковых методик. Однако с развитием компьютерных вычислительных технологий весьма актуальной становится задача использования современных программ вычислительной гидродинамики (CFD – computational fluid dynamics) при проведении теплогидравлических расчетов активных зон ядерных реакторов. CFD-программы позволяют учесть локальные гидродинамические эффекты в потоке теплоносителя и спрогнозировать отдельные важные теплогидравлические характеристики элементов ТВС еще на этапе проектирования [1–2].

Следует отметить, что прямой теплогидравлический расчет активной зоны ядерного реактора с использованием трехмерных CFD-программ на сегодняшний день невозможен, что обусловлено необходимостью построения расчетной сетки, состоящей из нескольких миллиардов элементов, за пределами требованиями к вычислительным ресурсам и неполнотой моделей течения двухфазной жидкости в реакторных условиях. Поэтому весьма перспективной является возможность использования CFD-программ для получения замыкающих соотношений по коэффициентам перемешивания и гидравлического сопротивления, а также для доработки математических моделей, реализованных в инженерных ячейковых кодах [3].

В данной работе продемонстрирован вариант подхода к определению указанных коэффициентов для моделей ТВС на основе результатов гидродинамических расчетов, проведенных в CFD-программе ЛОГОС, разработанной в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Краткое описание методики поячейкового расчета ТВС ядерного реактора

Поперечное сечение рассматриваемой части активной зоны реактора условно разбивается на ячейки, в пределах которых свойства теплоносителя усредняются (рис. 1). Канал или ячейка определяется как объем, занимаемый теплоносителем между группой смежных топливных стержней, но при этом учитывается турбулентный и конвективный обмен массой,

импульсом и энергией с соседними ячейками. Система дифференциальных уравнений содержит четыре уравнения (неразрывности, сохранения энергии, сохранения импульса в аксиальном направлении и сохранения импульса в поперечном направлении).

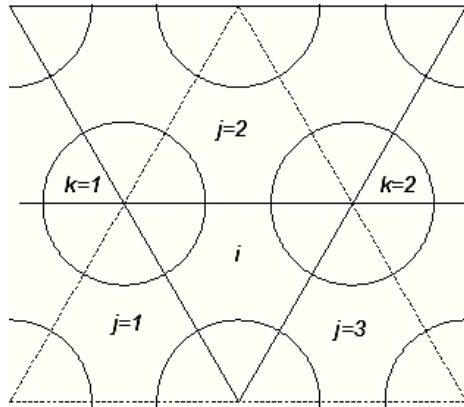


Рис. 1. Схема условного разбиения поперечного сечения на ячейки

Упрощенная форма уравнений баланса имеет следующий вид [4]:

- для массы

$$\frac{d}{dz}(\rho_i \omega_i f_i) + \sum_{j=1}^3 \mu_{\Sigma}^M \frac{\omega_i + \omega_j}{2} (\rho_i - \rho_j) \cdot \Delta S_{ij} = 0$$

-для количества движения вдоль и поперек потока:

$$-\frac{d(p_i f_i)}{dz} = \lambda_i \rho_i \omega_i |\omega_i| f_i + \frac{d}{dz}(\rho \omega_i^2 f_i) - \sum_{j=1}^3 \mu_{\Sigma}^{\omega} \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \cdot \frac{\omega_i + \omega_j}{2} \cdot (\omega_i - \omega_j) \cdot \Delta S_{ij},$$

$$p_i - p_j = \lambda_{ij} \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \omega_{ij} |\omega_{ij}| \frac{\Delta S_{ij}}{3};$$

- для энергии

$$\frac{d}{dz}(\rho_i \omega_i f_i I_i) = \sum_{k=1}^3 q F_k \Pi_{ij} + \sum_{j=1}^3 \mu_{\Sigma}^T \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \cdot \frac{\omega_i + \omega_j}{2} \cdot (I_i - I_j) \cdot \Delta S_{ij},$$

где z – продольная координата; ρ_i – плотность; ω_i – скорость потока в канале с сечением f_i ; ΔS_{ij} – площадь зазора между твэлами на единицу длины; p_i – статическое давление; λ_i – коэффициент гидравлического сопротивления в канале; λ_{ij} – коэффициент гидравлического сопротивления поперечному течению в канале; I_i – энтальпия теплоносителя в канале; μ_{Σ}^M , μ_{Σ}^{ω} , μ_{Σ}^T – суммарный (молекулярный, турбулентный и конвективный) коэффициент межканального обмена массой, количеством движения и энтальпией соответственно.

Такая методика используется многие годы, хотя во многом полагается на замыкающие соотношения (коэффициенты гидравлических потерь на трение и местные сопротивления, коэффициенты теплоотдачи, турбулентного обмена и т.д.), полученные экспериментально. В связи с этим при разработке новых конструкций ТВС зачастую отсутствует информация, необходимая для определения замыкающих соотношений, и, как следствие, возникают сложности в получении результатов в ячейковых программах.

Методика определения в программе ЛОГОС коэффициентов гидравлического сопротивления дистанционирующей решетки ТВС для отдельных ячеек

Пакет программ ЛОГОС предназначен для стационарных и нестационарных расчетов ламинарного и турбулентного теплопереноса в жидких и газообразных средах в произвольных трехмерных областях. Расчет производится на основе численного решения полной системы дифференциальных уравнений гидродинамики и теплообмена [5-7].

В качестве объекта исследования была выбрана модель фрагмента ТВС реактора РИТМ-200. Сборка заключена в шестигранный чехол, внутри которого размещены центральный вытеснитель с поглощающим стержнем СУЗ, пучок твэлов и стержни с выгорающим поглотителем [8]. Твэлы дистанционированы друг от друга с помощью пластинчатых решеток (ДР), причем конструкция ДР выполнена таким образом, что ее пластины перекрывают проходное сечение неравномерно, что влияет на распределение скорости теплоносителя после решетки.

Для экономии вычислительных ресурсов рассматривалась область, представляющая собой сегмент модели ТВС с установленной дистанционирующей решеткой (рис. 2).

В расчетной области средствами препроцессора ЛОГОС. ПреПост была сгенерирована гибридная сетка, состоящая из четырехгранных, шестигранных и призматических элементов. В дистанционирующей решетке и непосредственной близости от нее строилась неструктурированная тетраэдрическая сетка.

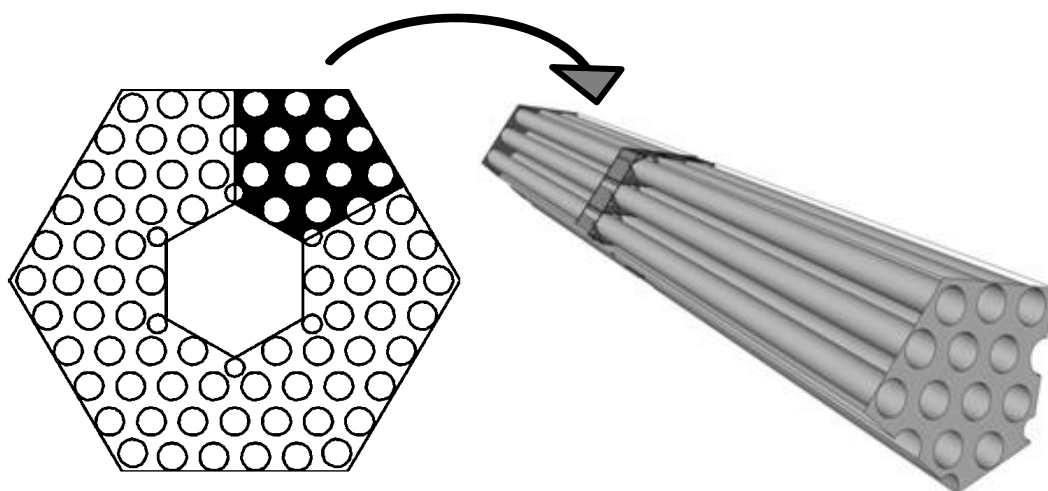


Рис. 2. Общий вид расчетной области с дистанционирующей решеткой

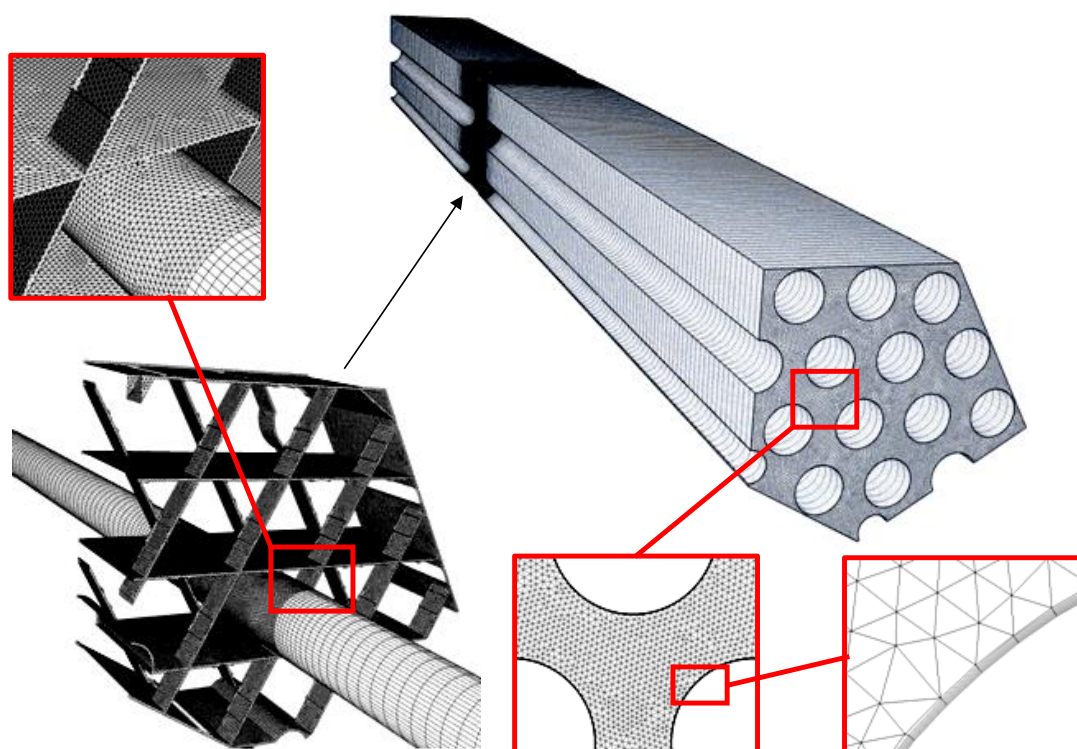


Рис. 3. Общий вид сеточной модели

Сетка в пучке твэлов строилась из призматических элементов методом экструзии поверхностных элементов по нормали к границам области тетраэдрической сетки. Максимальный размер элемента в продольном направлении составил $1/4$ диаметра твэла. Общий вид расчетной сетки представлен на рис. 3.

На рис. 4 представлены картограммы продольной составляющей скорости теплоносителя, нормированной на среднерасходную скорость в сечениях до и после решетки. Можно заметить, что пластины ДР приводят к перераспределению профиля скорости теплоносителя. В тех ячейках, где пластины ДР перекрывают центр, максимум локальной скорости за решеткой на 15% больше среднерасходной скорости через модель, причем профиль скорости относительно равномерно распределен по ячейке. В ячейках, где центр не перекрыт пластинами, профиль скорости имеет выраженный пик, при этом максимальное значение скорости на 25-30% выше среднерасходной.

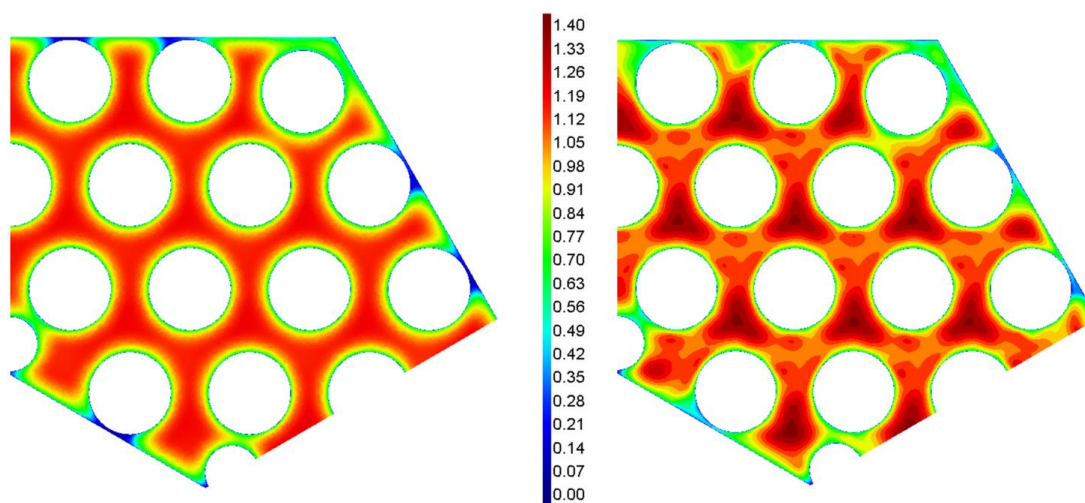


Рис. 4. Профили относительной осевой скорости, полученной в программе ЛОГОС до и после ДР

Учесть влияние пластин ДР на гидродинамику потока в поячейковых программах, как отмечалось ранее, можно путем учета коэффициентов гидравлического сопротивления, индивидуально для каждой ячейки. Результаты CFD-моделирования были использованы при получении замыкающих соотношений для учета влияния ДР в поячейковом коде.

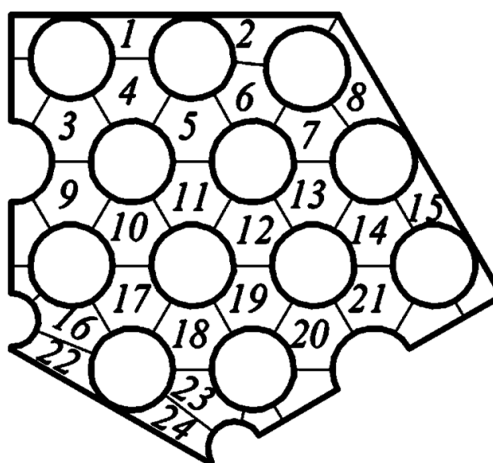


Рис. 5. Схема разбиения сечения модели на ячейки

По результатам CFD-расчета были определены КГС каждой ячейки, на которые раз-

бита расчетная область. Значение коэффициента гидравлического сопротивления ζ_i определялось по формуле

$$\zeta_i = \frac{2 \cdot \Delta P_{\text{др}}}{\rho \cdot W_i^2}$$

где ζ_i – КГС i -й ячейки на участке модели с ДР; W_i – среднерасходная скорость через i -ю ячейку модели после ДР.

Условное разбиение сечения на ячейки проводилось согласно принципам, заложенным в программы поячейкового расчета. Схема условного разбиения сечения представлена на рис. 5.

Алгоритм определения среднерасходной скорости через i -ю ячейку W_i в постпроцессоре программы ЛОГОС заключается в следующем:

1. Выбираются элементы сетки, принадлежащие к заданному поперечному сечению модели. Для этого используется фильтр «Построение сечения плоскостью» постпроцессора. Эта процедура реализуется с помощью встроенного макроязыка [9] в виде команд:

```
plane = plane()
plane.set("Type","normal")
plane.set("X", 0)
plane.set("Y", 0)
plane.set("Z", 0)
plane.set("NormalX", 0)
plane.set("NormalY", 0)
plane.set("NormalZ", 1)
```

2. Выбираются элементы сетки, принадлежащие в выбранном сечении к заданной ячейке, ограниченной твэлами k_1, k_2, k_3 схемы рис. 5. Для этого используется фильтр постпроцессора «Абстрактный». Функция реализуется на макроязыке в виде команд:

```
abstract = abstract()
abstract.setParams("triangle", (X1, Y1, Z1), (X2, Y2, Z2), (X3, Y3, Z3)),
```

где $X1, Y1, Z1$ – координаты твэла, ограничивающего ячейку.

3. По выбранному набору сеточных элементов производится расчет среднего значения скорости в ячейке W_i . Для этого используется модуль «Калькуляция величин». На макроязыке команда выглядит следующим образом:

```
findAvg("Wz",["Имя элемента сцены"])
```

В имени идентификатора сцены указывается результат выполнения функции по п. 2.

Представленный алгоритм выполняется по циклу для каждой ячейки схемы разбиения. Результат выполнения сценария и определения КГС для каждой ячейки представлен в табл. 1. Полученные значения ζ_i сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения КГС для каждой ячейки расчетной модели

№ ячейки, i	1	2	3	4	5	6	7	8
КГС ячейки, ζ_i	0.380	0.370	0.304	0.261	0.301	0.289	0.334	0.448
№ ячейки, i	9	10	11	12	13	14	15	16
КГС ячейки, ζ_i	0.261	0.306	0.261	0.302	0.259	0.297	0.483	0.327
№ ячейки, i	17	18	19	20	21	22	23	24
КГС ячейки, ζ_i	0.261	0.304	0.259	0.300	0.260	0.364	0.252	0.416

Заключение

В статье приведены результаты расчетного исследования течения потока теплоносителя за дистанционирующей решеткой во фрагменте ТВС реактора РИТМ-200, проведенного с использованием CFD-программы ЛОГОС. В результате расчета получены данные о коэффициенте гидравлического сопротивления пластинчатой дистанционирующей решетки. Замечено, что конфигурация пластин дистанционирующей решетки приводит к перераспределению расходов по ячейкам. Значения среднерасходных скоростей в ячейках, идентичных в твэльном пучке, но по-разному затесненных пластинами ДР, различаются, что может приводить к неодинаковым условиям охлаждения твэлов. Учет этого эффекта в программах поячейкового теплогидравлического расчета позволяет повысить точность расчета и снизить консерватизм при обосновании теплотехнической надежности активной зоны.

В работе приведен алгоритм написания сценария для автоматизированной обработки результатов CFD расчета и получения необходимых данных для одномерной программы. Использование вычислительной гидродинамики для формирования исходных данных и получения замыкающих соотношений в поячейковых программах является эффективным методом на этапе проработки и оптимизации конструкции ТВС.

Библиографический список

1. **Добров, А.А.** Применение вычислительной гидродинамики для повышения теплогидравлической эффективности перемешивающих решёток в ТВС-КВАДРАТ / А.А. Добров [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2016. – № 3 (114). – С. 55–63.
2. **Дмитриев, С.М.** Применение программы ЛОГОС для исследования особенностей гидродинамики в тепловыделяющей сборке реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев [и др.] // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т. 57. – №3.2. – С. 232–236.
3. **Дмитриев, С.М.** Моделирование течения потока теплоносителя в топливной сборке реактора плавучей АЭС с использованием CFD-программы ЛОГОС / С.М. Дмитриев [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88. – № 5. – С. 1253–1259.
4. **Дмитриев, С.М.** Расчётное исследование локальной гидродинамики потока теплоносителя во входном участке ТВС реакторной установки РИТМ-200 / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2017. – № 1. – С. 129–134.
5. **Солонин, В.И.** Теплогидравлические процессы в активных зонах водоохлаждаемых реакторов: учеб. пособие / В.И. Солонин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 140 с.
6. **Гребенников, А.Н.** Адаптация, верификация и использование пакета программ ЛОГОС для решения задач атомной энергетики / А.Н. Гребенников [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Междунар. научно-технич. конф: сб. тез. докл. 8-й. – Подольск, 2013. – С. 65–66.
7. **Шагалиев, Р.М.** Пакет программ ЛОГОС для моделирования задач атомной энергетики / Р.М. Шагалиев [и др.] // International Congress on Advances in Nuclear Power Plants: сб. тез. и докл. – Четжу (Jeju) Южная Корея, 2013.
8. **Дмитриев, С.М.** Верификация CFD программы ЛОГОС на базе экспериментальных исследований НГТУ по изучению локального массообмена потока теплоносителя в ТВС / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2016. – № 4. – С. 91–99.
9. **Самойлов, О.Б.** Исследование распределения потоков тепловых и эпитепловых нейтронов в ТВС универсального атомного ледокола / О.Б. Самойлов [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т.121. – №6. – С. 307–313.
10. Руководство пользователя параллельной системы постобработки ScientificView (версия 1.8.0). Макроязык. – М.: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. – 56 с.

*Дата поступления
в редакцию 10.02.2018*

A.A. Dobrov, K.G. Ivanova, M.A. Legchanov, N.P. Kurbatova, I.Yu. Lyahov

**CALCULATION THE HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENTS IN LOGOS
CFD-PROGRAM FOR FA WITH SPACER GRID TO USE
IT IN SUBCHANNEL ANALYSIS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Numerical simulation of coolant flow in FA with spacer grid using LOGOS CFD-program.

Design/methodology/approach: The technique of determination of coefficients of hydraulic resistance of the FA spacer grid with use of results of CFD calculation and a macro language of the LOGOS program is presented.

Results: The values of the hydraulic resistance coefficients, which can be used during the subchannel analysis –of the core, are obtained.

Key words: core, fuel assembly, computational fluid dynamics.