

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ К ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ТВС С ОРЕБРЕННЫМИ ТВЭЛАМИ

А.Г.Чухлов, инженер, В.П.Смирнов, к.т.н., С.Ю.Афонин, к.т.н.

ОАО «НИКИЭТ»

В ядерных реакторах широко применяются тепловыделяющие сборки (ТВС) с оребренными твэлами, к которым относятся, в частности, сборки с витыми твэлами, имеющими различную форму поперечного сечения, а также с твэлами, дистанционируемыми проволочной навивкой. Витые твэлы используются, например, в исследовательском реакторе ПИК [1] и ядерных энергодвигательных установках [2], а твэлы с проволочной навивкой – в быстрых натриевых реакторах.

Известные методы приближенного теплогидравлического расчета тепловыделяющих сборок с оребренными твэлами основаны либо на моделях пористого тела, либо на поканальных моделях. Для замыкания системы уравнений движения и энергии, в этих моделях используются зависимости для коэффициентов гидравлического трения, теплоотдачи и другие, которые могут быть определены либо из экспериментов, либо из трехмерных расчетов с помощью CFD кодов. В настоящее время трехмерный расчет многостержневой ТВС с оребренными твэлами возможен только на мощных многопроцессорных компьютерах (кластерах или суперкомпьютерах). Например, расчет ТВС, содержащей 19 твэлов с проволочной навивкой (что в несколько раз меньше, чем количество твэлов в ТВС энергетических реакторов), потребовал от 65 до 85 Гб оперативной памяти и производился в течение приблизительно 10 дней с использованием 256-процессорного компьютера [3]. Многочисленные примеры трехмерных расчетов, выполненных на персональных компьютерах, относятся к элементам симметрии ТВС, состоящих из твэлов без оребрения и дистанционирующих решеток. В этом случае, на боковых гранях элемента симметрии ставятся граничные условия равенства нулю производных от искомым функций. Если же твэлы имеют витое оребрение, указанные условия не выполняются в силу появления поперечной составляющей скорости теплоносителя.

В настоящей работе предложено решение трехмерной теплогидравлической задачи для бесконечного пучка твэлов, имеющих витое оребрение и одинаково ориентированных в пространстве. В случае, если поле тепловыделения в каждом твэле и расстояние между ними одинаковы, поля температуры и скорости теплоносителя в пучке повторяются в некоторой области, содержащей один оребренный твэл и теплоноситель. В случае расположения твэлов в треугольной решетке, указанная область представляет собой шестигранную призму, а в случае прямоугольной решетки – прямоугольную. Для расчета поля скорости и температуры теплоносителя, противоположные грани расчетной области попарно связываются с помощью периодических граничных условий, что может быть легко реализовано в большинстве коммерческих CFD кодов. Это означает, что теплоноситель, покидающий боковую грань, входит в связанную с ней боковую грань в соответствующих точках поверхности, получаемых при наложении граней друг на друга. На поверхностях твэла и дистанционирующей проволоки ставятся общепринятые граничные условия для твердых непроницаемых поверхностей. Аналогично может быть выделена расчетная область и для твэлов с другими возможными типами дистанционирования, а также для пучка теплообменных труб. Необходимым условием применимости данного метода является условие периодического повторения геометрии в одинаковых смежных расчетных областях твэльного или трубного пучка.

Для тепловыделяющих сборок проектирующегося опытно-демонстрационного реактора БРЕСТ-ОД-300 [4], рассматриваются различные способы дистанционирования твэлов, расположенных в треугольной решетке - например с помощью спиральной проволочной навивки типа «проволока по оболочке». В этом случае на твэл навивается одна проволока, которая касается оболочки соседних твэлов. Для дистанционирования твэлов типа «проволока по оболочке» в отечественных литературных источниках (которыми мы ограничимся в данной работе) предложены различные экспериментальные формулы для коэффициента гидравлического трения в бесконечном твэльном пучке, например

$$\xi = \frac{0.210}{Re^{0.25}} \left\{ 1 + \frac{124 \cdot Re^{0.06}}{(h/d)^{1.65}} \left[1.78 + 1.485 \left(\frac{S}{d} - 1 \right) \right] \left(\frac{S}{d} - 1 \right) \right\} \pm 15\%, \quad (1)$$

где Re – число Рейнольдса, S – шаг расположения твэла, d – диаметр твэла, h – шаг навивки проволоки [6]. Формула (1) имеет следующие пределы применимости -

$$1.0 \leq \frac{S}{d} \leq 1.5, \quad 8.0 \leq \frac{H}{d} \leq 50, \quad 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5.$$

В более ранних изданиях справочника [6] предложены и другие формулы:

$$\xi = \frac{0.210}{Re^{0.25}} \left\{ 1 + \frac{124}{(h/d)^{1.65}} \left[1.78 + 1.485 \left(\frac{S}{d} - 1 \right) \right] \left(\frac{S}{d} - 1 \right)^{0.32} \right\} \pm 15\%, \quad (2)$$

$$1.0 \leq \frac{S}{d} \leq 1.5, \quad 8.0 \leq \frac{H}{d} \leq 50, \quad 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5 \quad [7];$$

$$\xi = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \left(\frac{1.03}{(S/d)^{0.12}} + \frac{30(S/d)^7 Re^{0.09}}{(h/d)^{2.2}} \right)^{0.9} \pm 10\% \quad (3)$$

$$1.0 \leq \frac{S}{d} \leq 1.5, \quad \frac{H}{d} \geq 5, \quad 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5 \quad [8];$$

В табл.1 представлены результаты расчетов по формулам (1)-(3) для решетки твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300.

Табл.1. Результаты расчета коэффициента гидравлического трения в пучке твэл для реактора БРЕСТ-ОД-300

Формула	Re	S/d	h/d	ξ
(1)	$5.56 \cdot 10^4$	1.23	23.6	0.0223
(2)				0.0258
(3)				0.0266

Расчет гидравлического сопротивления твэльного пучка реактора БРЕСТ для дистанционирования твэл типа «провода по оболочке» был проведен с помощью CFD кода [FlowVision](#) [5] с целью сравнения результатов расчета с данными таблицы 1. При использовании периодических граничных условий, такой расчет может быть проведен даже на обычном персональном компьютере с объемом оперативной памяти более 2 Гб.

Расчетная область, которая создается для кода FlowVision с помощью какой-либо из CAD систем трехмерного моделирования, может быть подготовлена двумя способами: либо между дистанционирующей проволокой и оболочкой твэла оставляется зазор, либо дистанционирующая проволока объединяется с оболочкой твэла. Трехмерная модель, подготовленная первым способом, показана на рисунке 1 (а), вторым способом - на рисунке 1 (б). В обоих случаях расчетная область ограничена шестью плоскостями симметрии, равноудаленными от твэлов и поверхностями проволок и твэла. Поскольку в данном расчете не ставилось задачи определения поля температуры в твэле и дистанционирующей проволоке, они не моделировались.

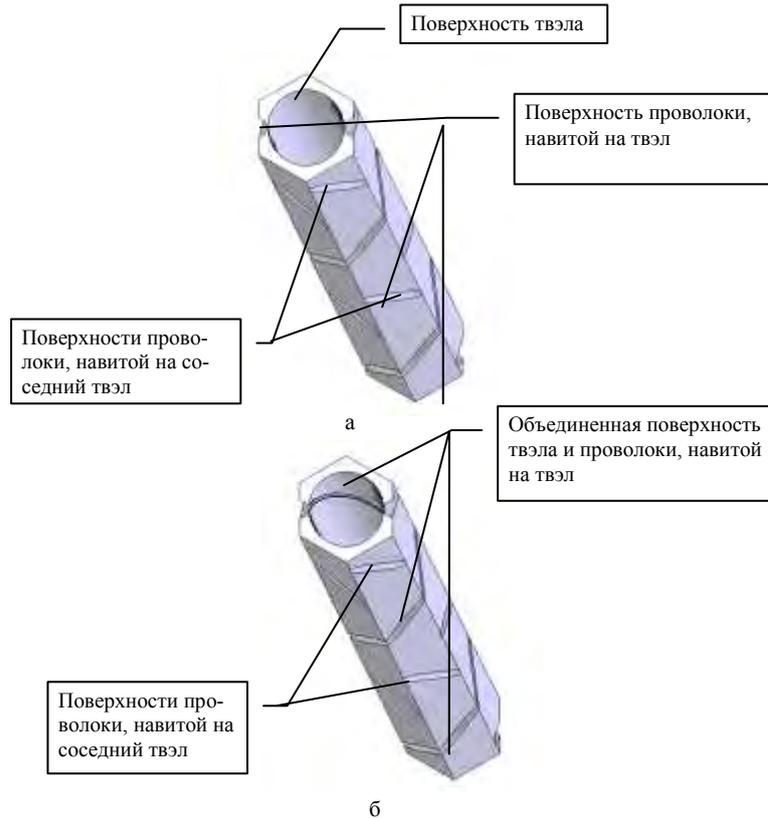


Рисунок 1. Расчетная область, а) проволока отделена от оболочки зазором б) проволока объединена с оболочкой

В трехмерной модели, показанной на рисунке 1 (а), имеется небольшой зазор между дистанционирующей проволокой и оболочкой, составляющий 0.1 мм, что, с учетом ограниченного количества оперативной памяти персонального компьютера, приводит к слишком грубому разрешению зазора расчетной сеткой. В модели, показанной на рисунке 1 (б), дистанционирующая проволока «утоплена» на небольшое расстояние в оболочку и объединена с ней с целью ликвидации зазора между проволокой и оболочкой. Теплоноситель входит в расчетную область через нижнюю торцевую поверхность параллельно оси твэла и выходит через верхнюю. Высота твэла принималась равной 500 мм (реальная высота твэла составляет 2,4 м), что, как показали результаты расчетов, достаточно для гидродинамической стабилизации потока теплоносителя на большей части длины твэла. На боковых гранях расчетной области ставились периодические граничные условия с попарной «сшивкой» противоположных граней (которые полностью совпадают при наложении друг на друга). На остальных поверхностях использовались граничные условия с пристеночной функцией для скорости теплоносителя. Расчет поля скорости теплоносителя производился с использованием стандартной k-ε модели турбулентности.

На рисунке 2 приведено распределение скорости теплоносителя для различных по высоте поперечных сечений расчетной области, показанной на рисунке 1 (б). Сходимость по расчетной сетке достигалась при количестве узлов сетки, составляющем 584000. Из рисунка 2 видно, что поле скорости в поперечном сечении расчетной области напоминает поле скорости при поперечном обтекании цилиндра, однако в разных по высоте поперечных сечениях направление этого обтекания различно.

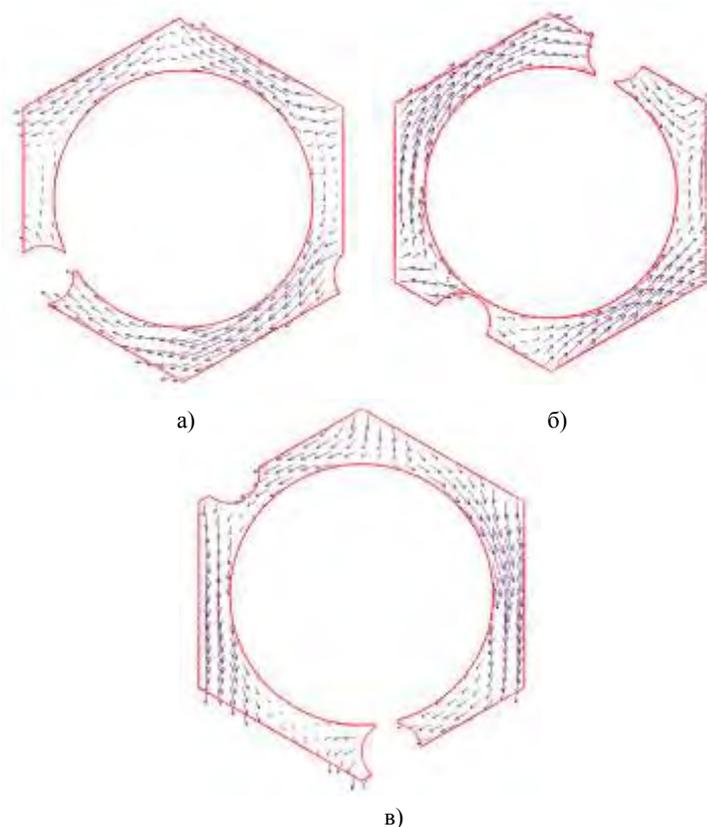


Рисунок 2. Поле скорости теплоносителя в поперечном сечении расчетной области для различных значений расстояния h от входа:
а) $h=0.23\text{м}$ б) $h=0.33\text{м}$ в) $h=0.43\text{м}$

На основании результатов численного расчета определялся коэффициент гидравлического трения:

$$\xi = \frac{2\Delta P D_h}{L \rho w^2}, \text{ где } \Delta P - \text{ перепад полного давления на участке гидродинамической стабилизации потока теплоносителя,}$$

D_h – гидравлический диаметр, L – длина участка гидродинамической стабилизации, ρ – плотность теплоносителя (принималась постоянной), w – средняя продольная скорость теплоносителя. Рассчитанное значение коэффициента гидравлического трения составило 0.0229 для расчетной области, показанной на рисунке 1 (а), и 0.0219, для расчетной области, показанной на рисунке 1 (б), что близко к результату расчета по формуле (1). Поскольку формула (1) имеет погрешность 15%, можно сделать вывод, что в данном случае для расчета коэффициента гидравлического трения может быть применена как трехмерная модель, показанная на рисунке 1 (а), так и модель, показанная на рисунке 1 (б).

Для твэльного пучка реактора ПИК, состоящего из самодистанционирующихся крестообразных витых твэлов (рис.3), охлаждаемых водным теплоносителем, был выполнен расчет с учетом теплообмена в теплоносителе.

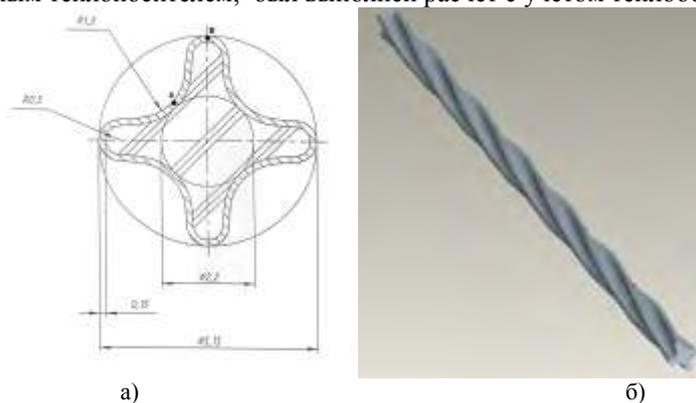


Рисунок 3. Крестообразный твэл; а) геометрические размеры твэла б) трехмерная модель твэла

Геометрические размеры крестообразного твэла реактора "ПИК" показаны на рис. 5 (а). Длина твэла составляет 0,5 м, шаг закрутки ребер - 0,3 м. Остальные параметры твэла и водяного теплоносителя приняты следующими:

- температура теплоносителя на входе - 50 °С;
- давление на входе - 5 МПа;
- плотность теплового потока - $3,88 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

Расчеты были проведены при постоянной плотности теплового потока на границе теплоносителя с твэлом (при этом твэл не моделировался). Этот вариант близок к условиям многочисленных экспериментов, в которых твэлы имитируются тонкостенными электрообогреваемыми витыми оболочками. Для этого варианта расчеты выполнялись как при постоянных, так и при переменных теплофизических свойствах теплоносителя, зависящих от температуры.

Для решения задачи конвективного теплообмена с заданной плотностью теплового потока использовалась расчетная сетка с 570000 узлами с применением адаптации расчетной сетки первого уровня на поверхности твэла. Решение получено с использованием стандартной k-ε модели турбулентности.

Основная цель трехмерных расчетов состояла в сопоставлении результатов расчета коэффициента гидравлического трения и числа Нуссельта с известными экспериментальными зависимостями, полученными при течении воздуха в сборках с витыми стержнями [2]:

$$\xi = a_{\xi} \cdot \xi_0 = \left(1 + \frac{3,6}{Fr^{0,357}}\right) \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b}\right)^{0,17}, \quad (4)$$

$$Nu = a_{Nu} \cdot Nu_0 = \left(1 + \frac{3,6}{Fr^{0,257}}\right) \cdot 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{Pr_b}{Pr_w}\right)^{0,11}, \quad (5)$$

где первые члены в правой части (4) и (5) представляют собой коэффициенты a_{ξ} и a_{Nu} , учитывающие влияние закрутки потока; оставшиеся члены в правой части (4) и (5) описывают зависимости для трубы. Индекс «b» относится к ядру потока, индекс «w» – к поверхности твэла. В формулах (4) и (5) температурные факторы записаны для воды.

Число Фруда определяется как $Fr = \frac{H^2}{d_0 \cdot d_h}$, где d_0 – описанный диаметр твэла, d_h – гидравлический диаметр регулярной ячейки ТВС. Остальные безразмерные параметры определяются обычным образом. Число Фруда для твэла реактора ПИК равно 5478. Значения величин $\frac{\xi}{\xi_0}$ и $\frac{Nu}{Nu_0}$, полученные с помощью расчета по коду FlowVision и по формулам (4)-(5), приведены в таблицах 2 – 3.

Табл.2. Результаты расчета при постоянных теплофизических свойствах теплоносителя и постоянном тепловом потоке на поверхности твэла.

Параметр	Расчет по FlowVision	Расчет по формулам (4-5)
$\frac{\xi}{\xi_0}$	1.16	1.17
$\frac{Nu}{Nu_0}$	1.13	1.17

Таблица 3. Результаты расчета при переменных теплофизических свойствах теплоносителя и постоянном тепловом потоке на поверхности твэла.

Параметр	Расчет по FlowVision	Расчет по формулам (3-4)
$\frac{\xi}{\xi_0}$	1.08	1.07
$\frac{Nu}{Nu_0}$	1.22	1.24

Анализ данных, приведенных в таблицах 2 – 3, показал, что при постоянном тепловом потоке на поверхности твэла, расчеты по коду FlowVision хорошо согласуются с экспериментальными зависимостями (отклонение не более 4%).

На рисунке 4 приведено в качестве иллюстрации распределение поперечной компоненты скорости теплоносителя поперечном сечении ТВС для условий постоянного теплового потока на поверхности твэла и переменных теплофизических свойствах теплоносителя.

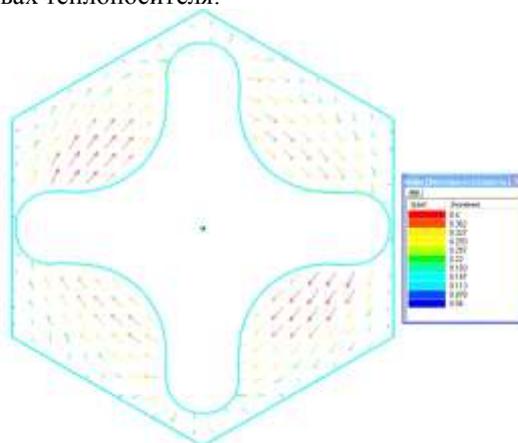


Рисунок 4. Распределение поперечной компоненты скорости (м/с) в сечении z=300мм

Анализ расчетных полей скорости показал следующее:

- закрутка ребер вызывает поперечную циркуляцию потока (поперечная составляющая скорости достигает 5% от продольной составляющей);
- существует отличие полей продольной составляющей скорости теплоносителя в областях, примыкающих к противоположным сторонам ребра твэла;
- на границах шестигранника поперечная скорость теплоносителя относительно невелика и составляют не более 1% от продольной составляющей;
- в поперечном сечении регулярной ячейки реактора ПИК вторичные циркуляционные зоны не наблюдаются, в отличие от пучков витых оребренных стержней с малым шагом закрутки ребер ($H/d_0 \leq 20$) [2].

Описанная выше картина течения в регулярной ячейке определяет также распределение температуры теплоносителя по поверхности твэла.

В случае $q=const$, с подветренной стороны ребер твэлов наблюдается более высокая температура теплоносителя, чем с "наветренной" стороны (по отношению к осевому потоку теплоносителя). Подобный характер распределения температуры теплоносителя определяет несимметричное распределение температуры поверхности твэла относительно оси симметрии ребер (см. рис. 5). Начало координаты Π находится на середине галтели с подветренной стороны (см. рис.3(а) точка А). Как видно из рис. 5, максимумы температуры наружной поверхности твэла наблюдаются в серединах галтелей твэлов. Неравномерность температуры поверхности твэла достигает 30 - 35 °С.

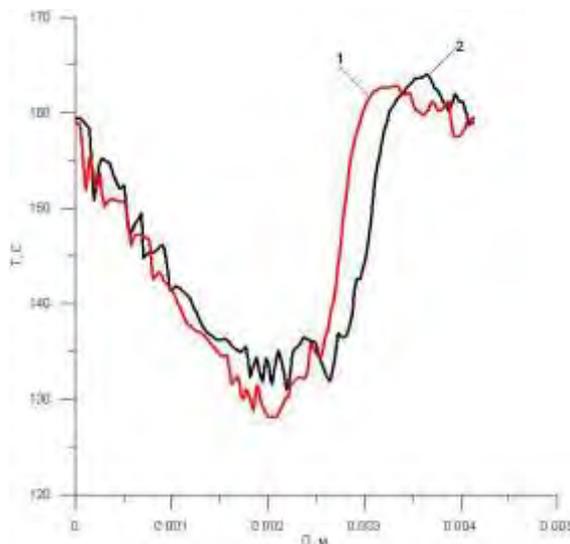


Рисунок 5. Распределение температуры по периметру поверхности твэла в поперечном сечении $z=300$ мм ($q=const$)
1 - ребро, не касающееся соседнего твэла 2 - ребро, касающееся соседнего твэла

Таким образом, как показано на примере проведенных расчетов, предложенный подход открывает возможность для решения широкого класса трехмерных задач, связанных с теплогидравлическим расчетом бесконечных решеток твэл или теплообменных труб.

Список литературных источников

1. А.С. Захаров, К.А. Коноплев, М.С. Онегин. Эксперименты и расчеты для обоснования пусковых активных зон реактора ПИК. Материалы XL-XLI зимних школ. Физика и техника реакторов. Петербургский институт ядерной физики им. П.Б. Константинова, Санкт-Петербург, 2007г. стр. 20 – 76.
2. Б.В. Дзюбенко, Л.В. Ашмантас, М.Д. Сегаль. Моделирование стационарных и переходных теплогидравлических процессов в каналах сложной формы. Вильнюс, Pradai, 1994.
3. K.D. Hammar, R.A. Bezzy. ACFD M&S Processor Fast Reactor Fuel Assamblies. Experiments and CFD Code Applications to Nuclear Reactor safety (XCFD4NRC 2008), Grenoble, France, September 10-12, 200
4. В.Н. Леонов и др. Конструктивные и компоновочные решения основных узлов и оборудования реактора БРЕСТ–ОД –300. Вопросы атомной науки и техники, серия Обеспечение безопасности АЭС, вып. 4, Ядерные технологии для энергетики будущего, 2004г, стр. 65-72.
5. А. Щеляев «FlowVision – современный российский инструмент математического моделирования». САПР и графика, Компьютер пресс, декабрь 2010, стр. 43-48.
6. П.Л. Кириллов, В.П. Бобков, А.В. Жуков, Ю.С. Юрьев. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. М., ИздАТ, 2010.
7. П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М., Энергоатомиздат, 1990.
8. П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М., Энергоатомиздат, 1984.