

СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПО КОДУ ППР ПТ С БЕНЧМАРК-ЭКСПЕРИМЕНТАМИ В МОДЕЛЬНОЙ СБОРКЕ СТЕРЖНЕЙ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

И.Р. Уголева, С.Н. Ложкин (НТЦ ЯРБ), А.С. Ложкин (ООО “Ласерта”)

В НТЦ ЯРБ разработаны методика и код альтернативного (без коэффициентов теплоотдачи) расчета теплогидравлики активных зон (АЗ) реакторных установок – ППР ПТ (программное средство поверочного расчета поля температуры). В методике использованы не применявшиеся ранее в теплогидравлических кодах феноменологические закономерности. В частности, осредненное уравнение турбулентного движения теплоносителя замыкается с использованием синергетического критерия установившегося движения, а не способом тарировки эмпирических коэффициентов по условию наилучшего согласия результатов расчетов с опытными данными. Подробно это рассмотрено в статьях [1,2]. Результаты расчетов по коду ППР ПТ позволяют на независимой основе проверять качество теплогидравлических расчетов, выполненных в обоснование безопасности АЗ, а также получать дополнительную расчетную информацию о кинематике теплоносителя и о локальном распределении температуры по периметру твэлов (если, конечно, есть уверенность в корректности результатов расчетов по этому коду).

Код ППР ПТ прошел апробацию при расчетах теплогидравлики АЗ полномасштабного стенда безопасности (ПСБ) ВВЭР, стенда ОКБ “Гидропресс”, АЭС “Райнсберг” (Германия). Ее результаты отражены в трудах международных научно-технических конференций [3, 4]. Но в этих экспериментах погрешности измерения температуры теплоносителя и оболочек твэлов были весьма велики, в частности, на ПСБ ВВЭР: ± 3 °С – для температуры теплоносителя и $\pm 7,5$ °С – для температуры внутренней поверхности оболочек имитаторов твэлов. Поэтому чтобы иметь представление о предельных возможностях кода по моделированию теплогидравлики АЗ, необходимо было сопоставить результаты расчетов с данными бенчмарк-экспериментов, проведенных с особой тщательностью.

Результаты бенчмарк-экспериментов в модельной сборке из 25 имитаторов твэлов (с квадратным расположением их и с наличием дистанционирующей решетки), обтекаемых сплавом Na-K (22% Na + 78% K) в режимах с переменным по подзонам энерговыделением, приведены в работе [5]. Схема поперечного сечения модельной тепловыделяющей сборки (ТВС) показана на рис. 1. В ТВС дистанционирование имитаторов осуществлялось с использованием нижней и верхней центрирующих решеток и поперечной дистанционирующей решетки, расположенной на расстоянии $Z = 372$ мм от начала зоны энерговыделения. Длина зоны энерговыделения в сборке Z_0 составляла 960 мм. Имитаторы твэлов в ТВС различались по размеру диаметра: 15 – имели диаметр $d_1 = 14$ мм, 10 – диаметр $d_2 = 12$ мм. Они размещались в квадратной обечайке с внутренним размером между стенками 90,4 мм и были объединены в две группы таким образом, что в сечении ТВС сформировались две подзоны, содержащие: три ряда из 15 стержней диаметром d_1 (N15), упакованных с шагом $s/d_1 = 1,25$, и два ряда из 10 стержней диаметром d_2 (N10), упакованных с шагом $s/d_2 = 1,34$. Измерения проводились в стационарных режимах работы стенда (постоянные – расход теплоносителя, подводимая электрическая мощность, температура теплоносителя на входе). Отношение между мощностями имитаторов твэлов в подзонах, обозначенное как $n = N15/N10$ (кВт/кВт), в пяти исследованных стационарных режимах равнялось 1,35/2; 1,65/2; 2/2; 2/1,65; 2/1,35. В этих режимах (кроме третьего) устанавливался

скачок энерговыделения на границе раздела двух подзон (см. эпюры тепловых потоков q_1 и q_2 , показанные на рис.1). В экспериментах измерялась:

- температура теплоносителя на выходе ТВС во всех ячейках потока (для этого использовались микротермопары в защитных капиллярах, вмонтированные в терморешетку, наложенную на верхнюю торцевую решетку модельной сборки таким образом, что спаи микротермопар располагались по центрам отверстий торцевой решетки на уровне ее нижней кромки);
- температура наружной оболочки измерительного имитатора, который выделен на рис.1 кружком черного цвета.

Измерительный имитатор твэла выполнен поворотным в сальниковом уплотнении. На его поверхности на разной высоте с шагом по азимуту $\Delta\varphi = 30^\circ$ заделаны в продольных пазах 12 микротермопар. Остальные имитаторы твэлов (неизмерительные) неподвижные. Нагреватели имитаторов – спирали из нихромовой проволоки – обеспечивали постоянный по высоте и периметру имитатора тепловой поток. Погрешность измерения температуры микротермопарами не превышала $\pm 0,2^\circ\text{C}$, что отмечено в учебном пособии [6].

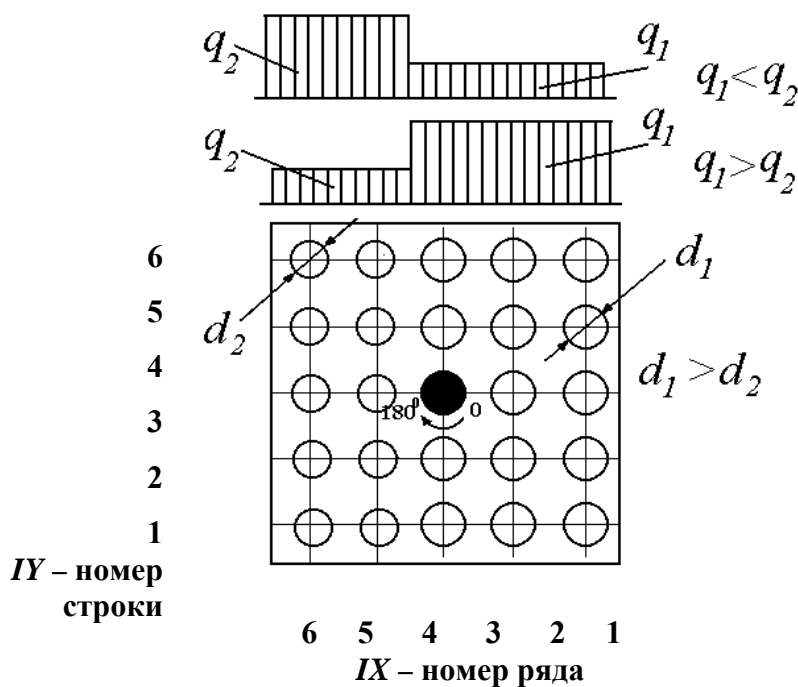


Рис.1. Схема поперечного сечения модельной ТВС с двумя подзонами энерговыделения:

q_1 и q_2 – тепловые потоки в подзонах (в опытах отношение q_1/q_2 равнялось 1,35/2; 1,65/2; 2/2; 2/1,65; 2/1,35); $d_1 = 14$ мм и $d_2 = 12$ мм – диаметры имитаторов твэлов в подзонах. Номера (IX, IY) идентифицируют ячейки потока, в которых измерялась температура теплоносителя на выходе ТВС

В статье [5] результаты измерения ΔT , $^\circ\text{C}$ – подогрева теплоносителя на выходе ТВС – приведены как средние по рядам IX. Имеющихся в статье [5] данных достаточно для проведения расчетов режимов 1, 3 и 5 по коду ППР ПТ. Ре-

зультаты расчетов по коду ППР ПТ подогрева теплоносителя в этих режимах в ячейках (IX,IY), а также результаты сравнения их средних значений по рядам IX с соответствующими осредненными опытными данными приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что в размерных величинах расчетные, осредненные по рядам IX значения подогрева теплоносителя согласуются с соответствующими осредненными опытными данными с погрешностью $\pm 0,9$ °C. Наглядно это продемонстрировано также на рис. 2 (а, б, в), где дополнительно представлены взятые из статьи [5] результаты расчетов, выполненных специалистами из Испании (с использованием кода FLUENT), Нидерландов (код STAR-CD), Южной Кореи (коды MATRA и CFX) и Японии (коды SPIRAL и AQUA). Эти рисунки показывают, что по качеству моделирования подогрева теплоносителя код ППР ПТ не уступает названным зарубежным кодам.

Таблица 1

| Номер режима | IX IY | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|--|-------|------|------|------|-------|-------|
| | | 1 | 1 | 3,5 | 3,4 | 3,4 | 3,4 |
| 1 | 2 | 3,4 | 3,8 | 3,9 | 3,8 | 3,8 | 3,7 |
| | 3 | 3,2 | 4,0 | 3,9 | 3,6 | 3,6 | 3,2 |
| | $\Delta T_{\text{ср}}, \text{ }^\circ\text{C}$ | 3,4 | 3,8 | 3,7 | 3,6 | 3,8 | 3,6 |
| | $\Delta T_{\text{опыт}} [5]$ | 4,3 | 4,2 | 4,0 | 3,5 | 3,4 | 3,3 |
| | $\delta(\Delta T)_{\text{ср}} = \Delta T_{\text{ср}} - \Delta T_{\text{опыт}}$ | -0,9 | -0,4 | -0,3 | 0,1 | 0,4 | 0,3 |
| $(\delta(\Delta T)_{\text{ср}} / \Delta T_{\text{опыт}}) 100\%$ | | -20,9 | -9,5 | -7,5 | 2,9 | 1,2 | 9,1 |
| 3 | 1 | 4,9 | 5,0 | 5,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| | 2 | 5,0 | 6,0 | 5,8 | 4,5 | 3,8 | 3,7 |
| | 3 | 4,6 | 5,9 | 5,7 | 4,7 | 3,6 | 3,2 |
| | $\Delta T_{\text{ср}}, \text{ }^\circ\text{C}$ | 4,8 | 5,6 | 5,5 | 4,4 | 3,8 | 3,6 |
| | $\Delta T_{\text{опыт}} [5]$ | 5,5 | 5,4 | 5,1 | 4,4 | 4,2 | 3,9 |
| $\delta(\Delta T)_{\text{ср}} = \Delta T_{\text{ср}} - \Delta T_{\text{опыт}}$ | | -0,7 | 0,2 | 0,4 | 0,0 | -0,4 | -0,3 |
| $(\delta(\Delta T)_{\text{ср}} / \Delta T_{\text{опыт}}) 100\%$ | | -12,7 | 3,7 | 7,8 | 0,0 | -9,5 | -7,7 |
| 5 | 1 | 4,9 | 5,0 | 5,0 | 3,5 | 2,7 | 2,7 |
| | 2 | 5,0 | 6,0 | 5,8 | 3,8 | 2,6 | 2,5 |
| | 3 | 4,6 | 5,9 | 5,7 | 3,6 | 2,5 | 2,2 |
| | $\Delta T_{\text{ср}}, \text{ }^\circ\text{C}$ | 4,8 | 5,6 | 5,5 | 3,6 | 2,6 | 2,5 |
| | $\Delta T_{\text{опыт}} [5]$ | 5,1 | 5,0 | 4,7 | 3,7 | 3,5 | 3,3 |
| $\delta(\Delta T)_{\text{ср}} = \Delta T_{\text{ср}} - \Delta T_{\text{опыт}}$ | | -0,3 | 0,6 | 0,8 | -0,1 | -0,9 | -0,8 |
| $(\delta(\Delta T)_{\text{ср}} / \Delta T_{\text{опыт}}) 100\%$ | | -5,9 | 12,0 | 17,0 | -2,7 | -25,7 | -24,2 |

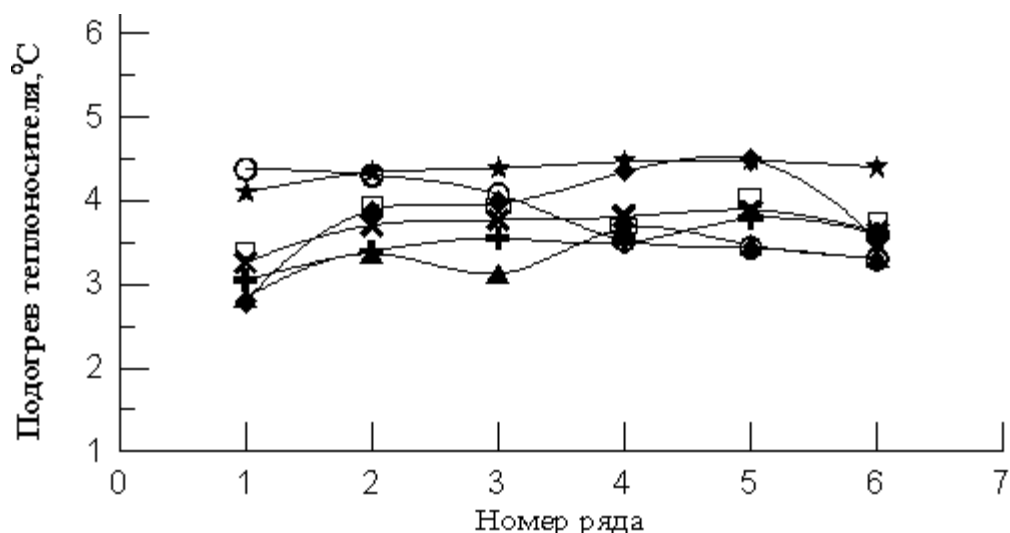


Рис. 2а. Подогревы теплоносителя на выходе из модельной сборки как средние величины по рядам IX (опытный режим 1):
 ○ – экспериментальные данные, × – Россия (НИКИЭТ),
 + – Япония, ▲ – Испания, ★ – Нидерланды, ◆ – Южная Корея,
 □ – Россия (НТЦ ЯРБ)

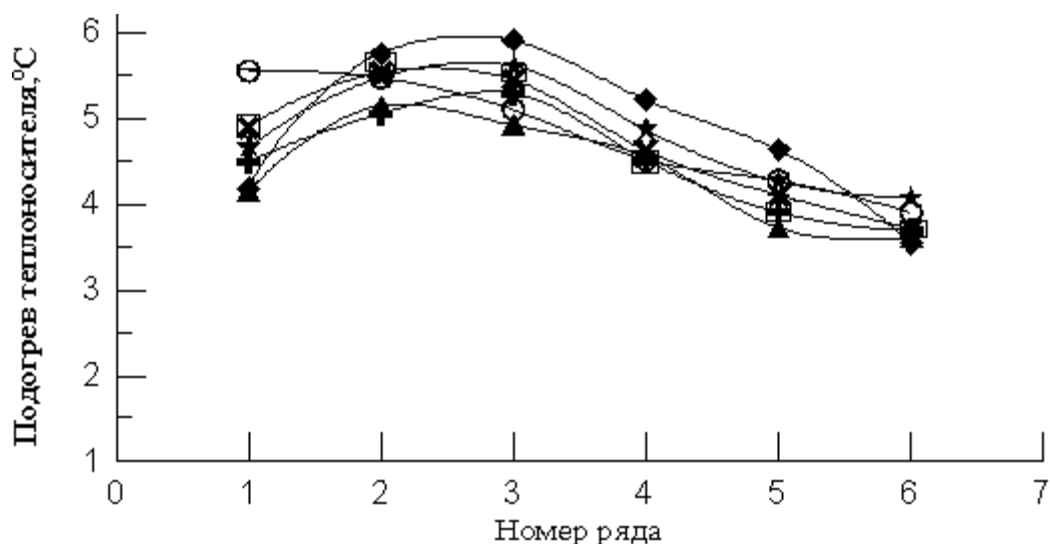


Рис. 2б. Подогревы теплоносителя на выходе из модельной сборки как средние величины по рядам IX (опытный режим 3):
 ○ – экспериментальные данные, × – Россия (НИКИЭТ), + – Япония,
 ▲ – Испания, ★ – Нидерланды, ◆ – Южная Корея, □ – Россия (НТЦ ЯРБ)

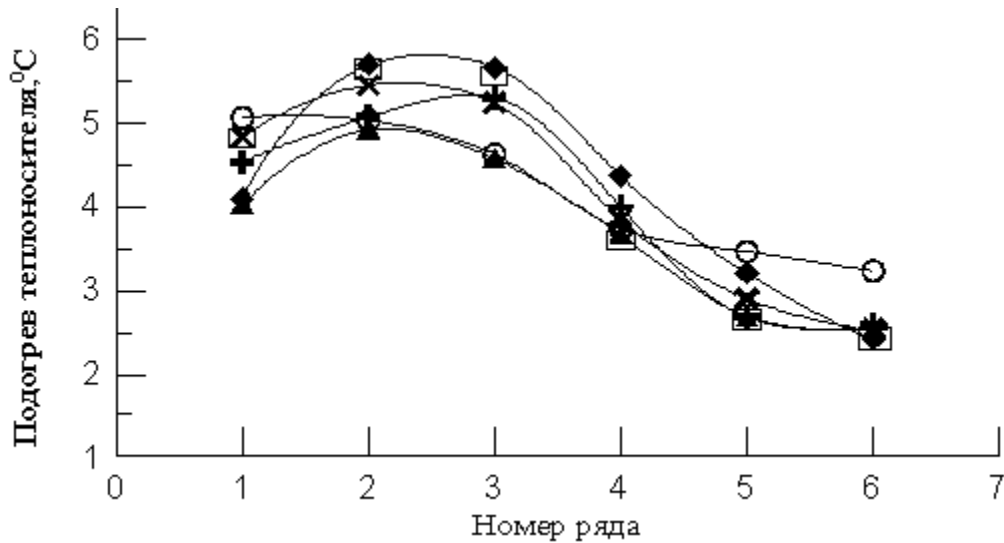


Рис. 2 в. Подогревы теплоносителя на выходе из модельной сборки как средние величины по рядам IX (опытный режим 5):
 ○ – экспериментальные данные, x – Россия (НИКИЭТ), + – Япония,
 ▲ – Испания, ★ – Нидерланды, ◆ – Южная Корея, □ – Россия (НТЦ ЯРБ)

В табл. 2 приведены рассчитанные по коду ППР ПТ значения температур поверхности измерительного имитатора твэла в режимах 1 и 3 (числитель – режим 1, знаменатель – режим 3). Здесь же приведены значения температур, осредненных по угловой координате φ в интервалах (0 – 90) и (90 – 180) град. (см. рис. 1). Такое осреднение выполнено по причине того, что в статье [5] температуры поверхности измерительного имитатора твэла представлены усредненными по участкам его периметра с $s/d_1 = 1,25$ ($\varphi = 270 - 90$) и $s/d_2 = 1,34$ ($\varphi = 90 - 270$). Сравнение расчетных и измеренных температур имитатора твэла, осредненных по участкам его периметра с $s/d = 1,25$ и $1,34$, показано на рис. 3 (а, б, в, г) для опытных режимов 1 и 3. Эти рисунки дополнительно содержат информацию о результатах расчетов, выполненных с использованием кодов FLUENT, STAR-CD, MATRA, SPIRAL и AQUA (данные взяты из работы [5]). Из рис. 3 (а, б, в, г) видно, что по качеству моделирования температуры поверхности измерительного имитатора твэла код ППР ПТ не уступает названным зарубежным кодам.

Таблица 2

| Z/Z_0 | Угловая координата φ , град. | | | | $T_{ср}$ $\varphi =$ 0 – 90 | Угловая координата φ , град. | | | | $T_{ср}$ $\varphi =$ 90 – 180 |
|---------|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------------------|
| | 4,5 | 31,5 | 58,5 | 85,5 | | 94,5 | 121,5 | 148,5 | 175,5 | |
| 0,05 | 57,3/ 64,9 | 57,1/ 64,7 | 57,1/ 64,7 | 57,3/ 64,9 | 57,2/ 64,8 | 57,3/ 64,9 | 57,0/ 64,5 | 57,0/ 64,4 | 57,0/ 64,5 | 57,1/ 64,6 |
| 0,15 | 57,8/ 65,7 | 57,5/ 65,3 | 57,5/ 65,3 | 57,8/ 65,6 | 57,6/ 65,5 | 57,8/ 65,6 | 57,4/ 65,1 | 57,3/ 64,9 | 57,4/ 65,0 | 57,5/ 65,1 |

| Z/Z_0 | Угловая координата φ , град. | | | | $T_{ср}$ $\varphi =$ 0 – 90 | Угловая координата φ , град. | | | | $T_{ср}$ $\varphi =$ 90 – 180 |
|---------|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|--|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|--|
| | 4,5 | 31,5 | 58,5 | 85,5 | | 94,5 | 121,5 | 148,5 | 175,5 | |
| 0,25 | 58,3/ 66,4 | 58,0/ 65,9 | 57,9/ 65,9 | 58,3/ 66,3 | 58,1/ 66,1 | 58,2/ 66,3 | 57,8/ 65,6 | 57,7/ 65,3 | 57,8/ 65,4 | 57,9/ 65,6 |
| 0,35 | 58,8/ 67,1 | 58,4/ 66,5 | 58,3/ 66,5 | 58,7/ 67,0 | 58,6/ 66,8 | 58,7/ 66,9 | 58,1/ 66,1 | 58,0/ 65,7 | 58,2/ 65,8 | 58,2/ 66,1 |
| 0,45 | 59,2/ 67,8 | 58,8/ 67,1 | 58,8/ 67,1 | 59,1/ 67,6 | 59,0/ 67,4 | 59,1/ 67,5 | 58,5/ 66,6 | 58,4/ 66,2 | 58,6/ 66,2 | 58,6/ 66,6 |
| 0,55 | 59,7/ 68,4 | 59,2/ 67,7 | 59,2/ 67,7 | 59,5/ 68,2 | 59,4/ 68,0 | 59,5/ 68,1 | 58,9/ 67,1 | 58,7/ 66,6 | 59,0/ 66,6 | 59,0/ 67,1 |
| 0,65 | 60,1/ 69,0 | 59,6/ 68,3 | 59,6/ 68,3 | 59,9/ 68,8 | 59,8/ 68,6 | 59,9/ 68,7 | 59,2/ 67,6 | 59,1/ 67,1 | 59,4/ 67,0 | 59,4/ 67,6 |
| 0,75 | 60,5/ 69,7 | 60,0/ 68,9 | 60,0/ 68,9 | 60,3/ 69,3 | 60,2/ 69,2 | 60,3/ 69,2 | 59,6/ 68,1 | 59,5/ 67,5 | 59,8/ 67,5 | 59,8/ 68,1 |
| 0,85 | 60,9/ 70,3 | 60,4/ 69,5 | 60,4/ 69,5 | 60,7/ 69,9 | 60,6/ 69,8 | 60,7/ 69,8 | 60,0/ 68,5 | 59,8/ 68,0 | 60,1/ 67,9 | 60,2/ 68,5 |
| 0,95 | 61,3/ 70,9 | 60,8/ 70,1 | 60,8/ 70,1 | 61,1/ 70,5 | 61,0/ 70,4 | 61,1/ 70,3 | 60,4/ 69,0 | 60,2/ 68,4 | 60,5/ 68,3 | 60,6/ 69,0 |

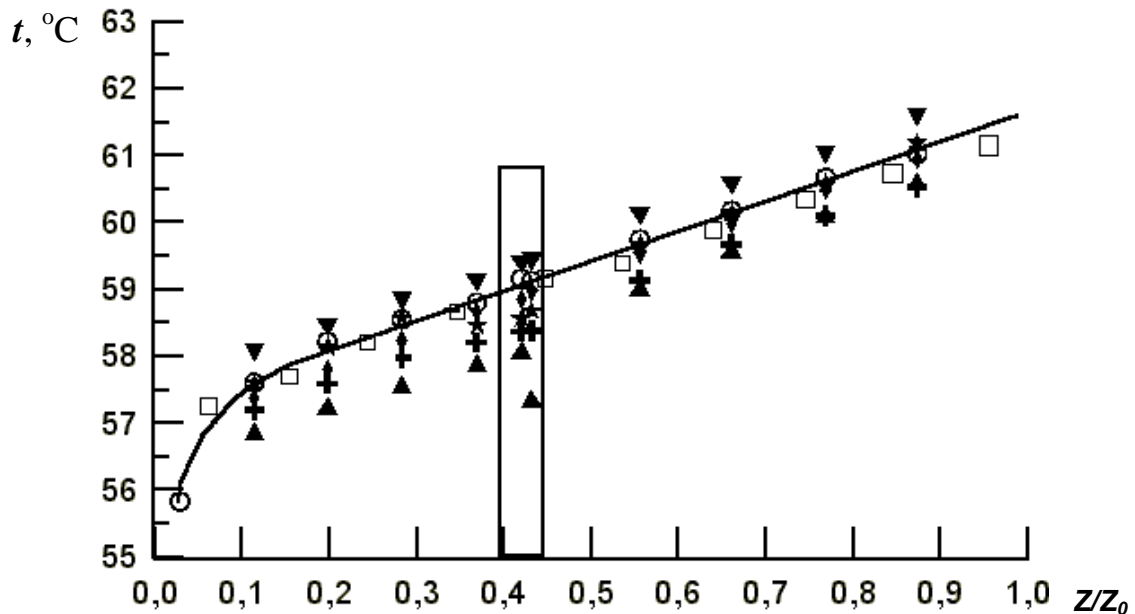


Рис. 3а. Сравнение расчетных и измеренных температур по длине измерительного имитатора твэла в обработке по зоне с $s/d_1 = 1,25$ (опытный режим 1):

○ – экспериментальные данные, + – код SPIRAL, ▼ – код AQUA,
▲ – код FLUENT, ★ – код STAR-CD, ◆ – код MATRA, □ – код ППР ПТ

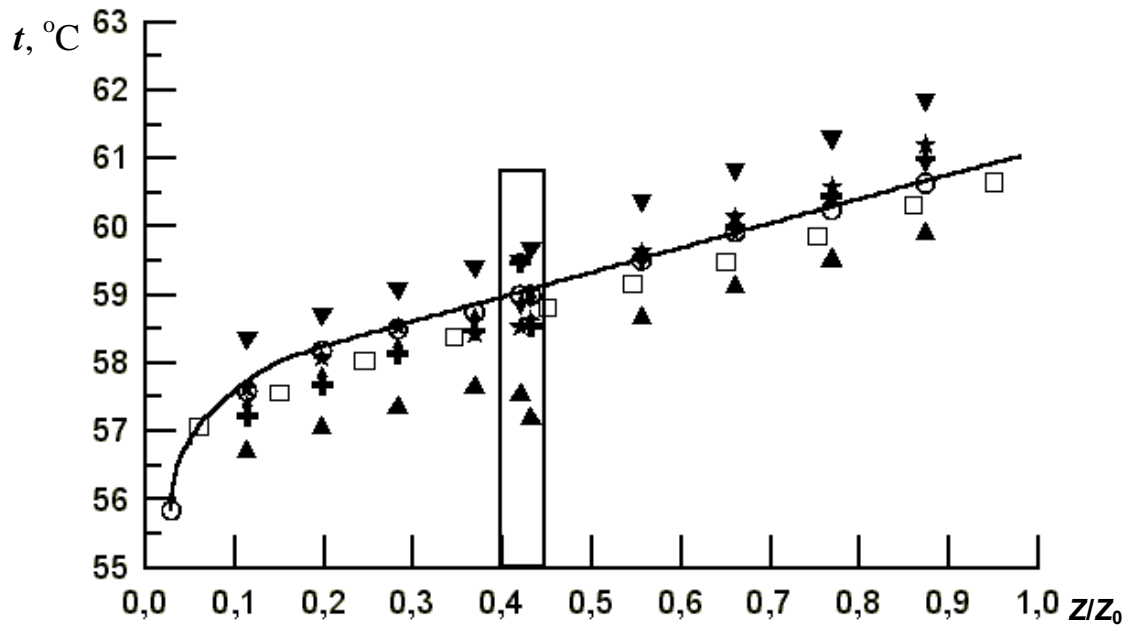


Рис. 3б. Сравнение расчетных и измеренных температур по длине измерительного имитатора твэла в обработке по зоне с $s/d_2 = 1,34$ (опытный режим 1):
 ○ – экспериментальные данные, + – код SPIRAL, ▼ – код AQUA,
 ▲ – код FLUENT, ★ – код STAR-CD, ◆ – код MATRA, □ – код ППР ПТ

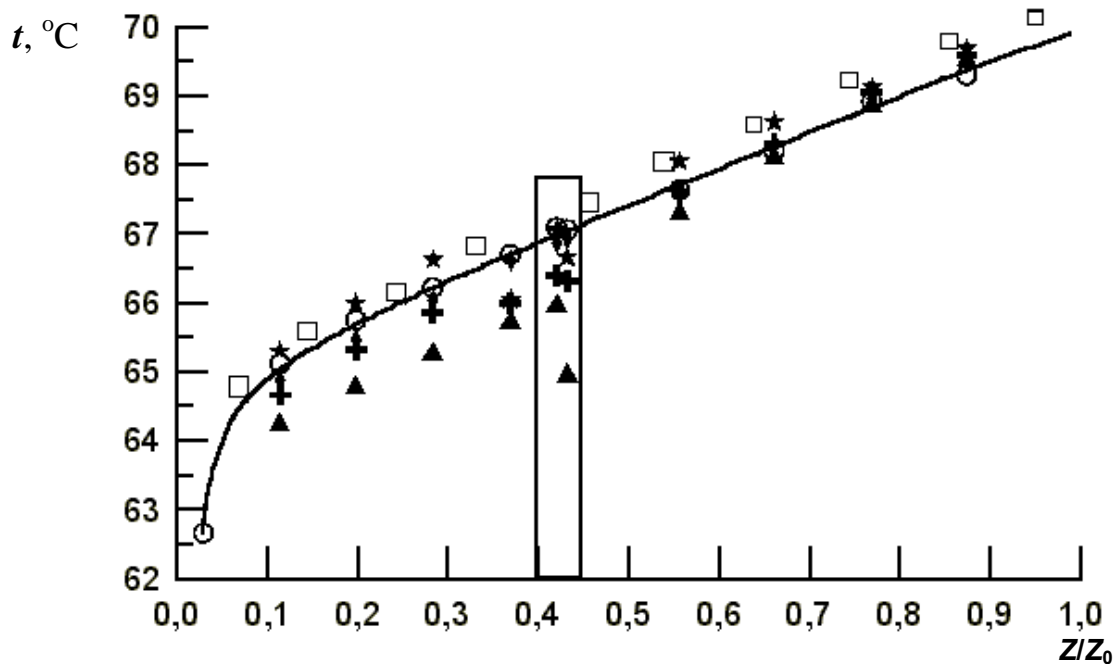


Рис. 3в. Сравнение расчетных и измеренных температур по длине измерительного имитатора твэла в обработке по зоне с $s/d_1 = 1,25$ (опытный режим 3):
 ○ – экспериментальные данные, + – код SPIRAL, ▼ – код AQUA,
 ▲ – код FLUENT, ★ – код STAR-CD, ◆ – код MATRA, □ – код ППР ПТ

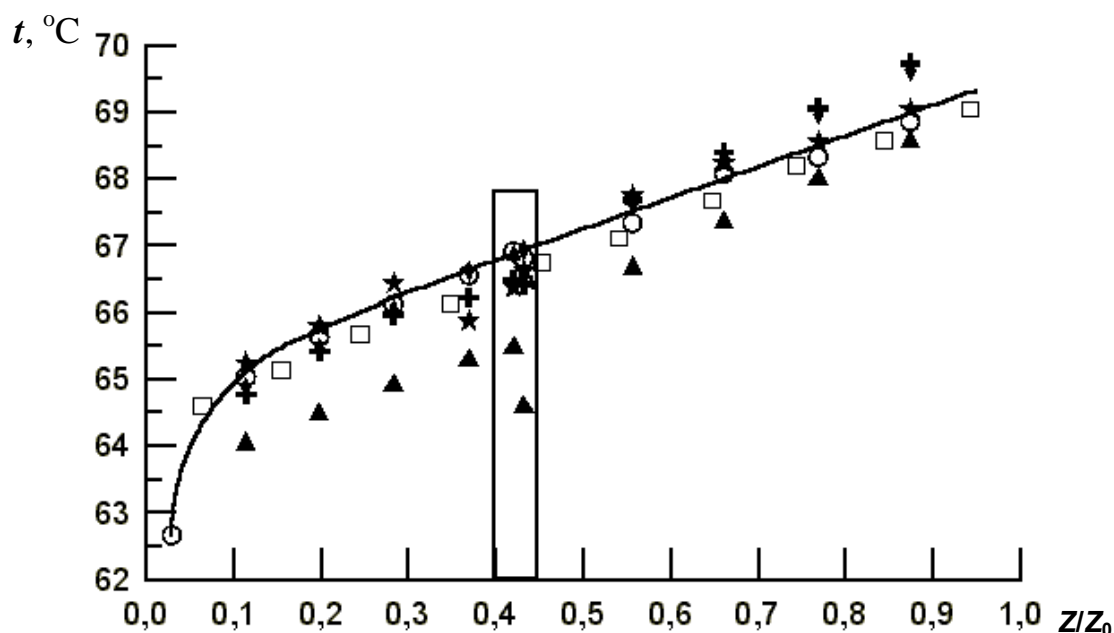


Рис. 3а. Сравнение расчетных и измеренных температур по длине измерительного имитатора твэла в обработке по зоне с $s/d_2 = 1,34$ (опытный режим 3):

○ – экспериментальные данные, + – код SPIRAL, ▼ – код AQUA, ▲ – код FLUENT, ★ – код STAR-CD, ◆ – код MATRA, □ – код ППР ПТ

Отметим, что в бенчмарк-эксперименте наряду с температурными полями измерялись и скорости теплоносителя вблизи поверхности измерительного имитатора твэла. Моделирующим теплоносителем, как и в тепловых опытах, был эвтектический сплав Na-K. Измерения скоростей проводились электромагнитным методом, который подробно описан в работе [7]. В этом методе внутри трубки имитатора твэла монтируются датчики с размерами магнитов около 5х3х2 мм так, что торцевые поверхности магнитов становятся частью поверхности имитатора твэла. В районе торца магнита имеется выточка, в которой зафиксированы (с помощью эпоксидной смолы) две взаимноперпендикулярные пары электродов. Одна пара реагирует на продольную составляющую скорости, другая – на поперечную. ЭДС датчика связывается со средней скоростью w_i в локальной площадке, образованной радиальными лучами, проведенными через электроды датчика (угол между лучами составляет 11 град.) до пересечения с линией максимальной скорости (ЛМС) в ячейке потока, контактирующей с измерительным имитатором. Повороты трубки позволяют получать распределение по периметру измерительного имитатора твэла плановой эпюры скоростей, т.е. скоростей, осредненных по местной глубине в ячейках потока. Под местной глубиной понимается расстояние по нормали от поверхности имитатора твэла до ЛМС.

Применительно к коду ППР ПТ, который представляет собой код ячейкового теплогидравлического расчета, значимо то, что в нем скорости, осредненные по местной глубине в ячейках потока теплоносителя, рассчитываются из решения уравнения плановой эпюры скоростей, приведенного в работе [8]. Это позволяет напрямую сравнивать расчетные и экспериментально измеренные эпюры скоростей в ячейках потока. Но прежде чем мы представим результаты такого

сравнения, акцентируем внимание на том, что установленная в сборке дистанционирующая решетка создавала эффект закрутки всего потока в целом. Под влиянием закрутки плановая эпюра скоростей вокруг измерительного имитатора трансформировалась, т. е. перестала быть симметричной относительно оси симметрии поперечного сечения ТВС – центральной горизонтальной линии на рис. 1. Код же ППР ПТ принудительную закрутку потока не моделирует, поэтому здесь расчетная эпюра скоростей обладает симметрией. Опыты показали, что эффект закрутки потока сохраняется до самого выхода из ТВС, хотя и несколько ослабевает. В безразмерном виде (по отношению к средней скорости теплоносителя на входе ТВС) плановые эпюры скоростей вокруг измерительного имитатора твэла на выходе из ТВС показаны на рис. 4.

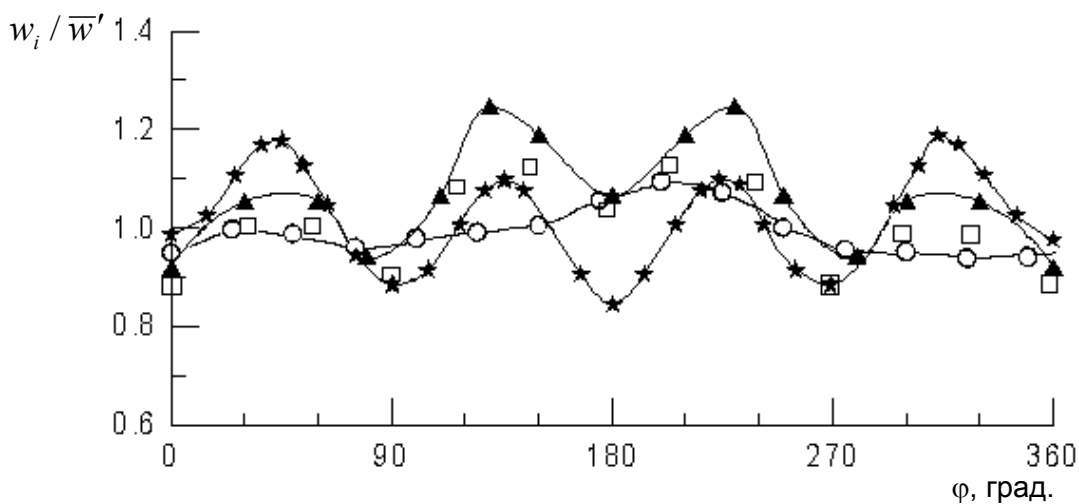


Рис. 4. Безразмерные плановые эпюры скоростей по периметру измерительного имитатора твэла на выходе из ТВС (по отношению к средней скорости теплоносителя на входе ТВС):

○ – экспериментальные данные, ▲ – код FLUENT, ★ – код STAR-CD, □ – код ППР ПТ

Как видно из рис.4, на выходе из ТВС рассчитанная по коду ППР ПТ эпюра скоростей близка к экспериментально измеренной. Это свидетельствует о том, что на расстоянии от дистанционирующей решетки, равном $40,5$ гидравлических диаметров сборки ($d_H = 13,54$ мм), эффект полной закрутки потока себя почти исчерпал. На меньших же расстояниях он весьма заметен. Составить представление о его величине помогут приведенные в табл. 3 относительные эпюры скоростей, измеренные на расстоянии $(6,5; 18,3; 40,5)d_H$ за дистанционирующей решеткой. Сравнить их надо как между собой, так и с плановой эпюрой скоростей, рассчитанной по коду ППР ПТ без закрутки потока на дистанционаторах решетки. Отметим, что в прямолинейных каналах сложного поперечного сечения без принудительной закрутки потока плановая эпюра скоростей, рассчитанная по коду ППР ПТ, согласуется с данными измерений с погрешностью $\pm 10\%$ (см. статьи [8, 9]). На выходе из ТВС различие между измеренной и рассчитанной эпюрами скоростей не превысило этой величины $\pm 10\%$. Отсюда следует сделанное выше заключение: эффект закрутки всего потока на дистанционаторах решетки проявляется на расстояниях, меньших $40,5 d_H$.

Таблица 3

| φ, град. | Z/d_H | | | Расчет по коду ППР ПТ |
|----------|----------------------------------|------|------|--------------------------|
| | 6,5 | 18,3 | 40,5 | |
| | w_i / \bar{w}' , по данным [5] | | | w_i / \bar{w}' |
| 0 | 1,00 | 0,90 | 0,97 | 0,88 |
| 30 | 1,28 | 0,95 | 1,01 | 1,01 |
| 60 | 1,28 | 0,91 | 1,01 | 1,01 |
| 90 | 0,67 | 0,94 | 0,98 | 0,90 |
| 120 | 0,98 | 0,96 | 1,01 | 1,08 |
| 150 | 0,98 | 1,01 | 1,03 | 1,12 |
| 180 | 0,51 | 1,04 | 1,08 | 1,05 |
| 210 | 0,73 | 1,15 | 1,12 | 1,12 |
| 240 | 0,78 | 1,19 | 1,06 | 1,08 |
| 270 | 0,73 | 1,09 | 0,98 | 0,90 |
| 300 | 1,13 | 0,94 | 0,97 | 1,01 |
| 330 | 1,23 | 0,85 | 0,95 | 1,01 |
| 360 | 1,00 | 0,90 | 0,97 | 0,88 |

Заключение

Представленные в статье результаты сравнения расчетов по коду ППР ПТ с данными измерений скоростей теплоносителя и полей температуры в модельной сборке из 25 имитаторов твэлов (с квадратным расположением их и с наличием дистанционирующей решетки), обтекаемых сплавом Na-K (22% Na + 78% K) в режимах с переменным по подзонам энерговыделением, наглядно показали и доказали, что феноменологические закономерности, используемые кодом ППР ПТ, позволяют корректно моделировать теплогидравлику в АЗ реакторных установок.

То обстоятельство, что код ППР ПТ моделирует теплогидравлику с использованием альтернативных закономерностей, не применяемых в других расчетных кодах, делает получаемые с его помощью результаты моделирования независимыми по отношению к результатам, полученным по традиционным теплогидравлическим кодам, при применении которых используются коэффициенты теплоотдачи при расчете температуры и прием тарировки для замыкания моделей турбулентного движения. В итоге появляется возможность на независимой феноменологической основе проверить качество теплогидравлических расчетов, выполненных в обоснование безопасности АЗ. Это особенно значимо при отсутствии представительных экспериментальных данных (такая ситуация не редкость, ибо прямые эксперименты на натуральных объектах не всегда возможно проводить, а экстраполяция модельных исследований на натурные объекты, как это показано в работе [10], часто бывает не вполне правомерной). При сопоставлении результатов альтернативных расчетов их близость свидетельствует о приемлемом качестве расчетного обоснования безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), тогда как далекие между собой результаты однозначно указывают либо на наличие ошибки в каком-либо из проведенных расчетов, либо на неточности моделирования рассматриваемого физического процесса. Поиск и устранение ошибок повышают доверие к результатам расчетного обоснования безопасности ОИАЭ.

Код ППР ПТ не заменяет собой коды традиционного теплогидравлического расчета ТВС реакторов и для этого не предназначен. Но в соответствии с основополагающим принципом безопасности – принципом разнообразия (сформулирован в нормативном документе [11]), он позволяет на независимой феноменологической основе проверить качество расчетов, выполненных в обоснование безопасности ОИАЭ. Именно в этом состоит его основное назначение.

Совместное использование ППР ПТ и традиционных кодов на разных стадиях выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ будет способствовать повышению надежности расчетного обоснования безопасности ОИАЭ.

Литература

1. Скребков Г.П., Ложкин А.С., Ложкин С.Н. Принцип Ле-Шателье и его адаптация для замыкания осредненных уравнений гидродинамики// Метеорология и гидрология. 2007. № 5.
2. Скребков Г.П., Ложкин А.С., Ложкин С.Н. О замыкании модели турбулентного потока в каналах и руслах альтернативным приемом тарировки способом// Метеорология и гидрология. 2008. № 3.
3. Ложкин С.Н. О важности принципа разнообразия в экспертных расчетах// Материалы 5-й Международной научно-технической конференции “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, 29 мая – 1 июня 2007 г., ФГУП ОКБ “Гидропресс”, Подольск, Россия.
4. Lozhkin S.N. Alternative Thermal-Hydraulic Calculation of Reactor Core Not Using Heat Transfer Coefficients// Advances in Heat Transfer. Proceeding of the Baltic Heat Transfer Conference, September 19-21, 2007, Saint-Petersburg, Russia. - V. 1.
5. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. Анализ бенчмарк-эксперимента по гидравлике и теплообмену в сборке имитаторов твэлов с жидкометаллическим охлаждением. Атомная энергия. 2005, Т. 99. Вып. 5.
6. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет реакторов. Часть 3. Теплоотдача и температурные поля твэлов в регулярных решетках (однофазное течение: эксперимент – расчет, методики и формулы). Учебное пособие для студентов специальности 101000 – АЭУ. В 2-х томах. Том 1. Обнинск. ГНЦ РФ ФЭИ. 2006.
7. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. Теоретические основы и физика процесса. М.: Энергоатомиздат, 1989.
8. Скребков Г.П., Ложкин С.Н. Применение принципа Ле-Шателье к расчету равномерного потока в каналах из упакованных стержней// Теплофизика высоких температур. 1985. Т. 23. № 4.
9. Ложкин С.Н. Расчет кинематических характеристик равномерного потока каналов// Гидротехническое строительство. 1988. № 5.
10. Гордон Б.Г. Моделирование теплогидравлических процессов на крупномасштабных исследовательских установках// Теплоэнергетика. 1993. № 6.
11. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций (ПБЯ РУ АС-89). ПНАЭ Г-1-024-90. М.: Госпроматомнадзор СССР, 1991.