

ВЕРИФИКАЦИЯ КОДА ТИГРСП НА ПРИМЕРЕ 19-СТЕРЖНЕВОЙ СБОРКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ CFD РАСЧЕТОВ

О.Е. Степанов, И.Ю. Галкин, С.С. Мелех, М.М. Курносков, А.А. Пронин

Одним из направлений использования CFD-кодов при обосновании проектов РУ в настоящее время является выполнение так называемых поддерживающих расчетов в рамках кроссверификации при аттестации новых или переаттестации используемых инженерных кодов. При этом сама CFD-модель должна быть предварительно протестирована и верифицирована в соответствии с международными рекомендациями.

В настоящей работе рассматривалась стандартная задача, представляющая из себя компактную модель ТВС – 19-стержневую сборку, для условий которой в ФЭИ были выполнены несколько серий экспериментов. Данная модель по своим геометрическим параметрам, скорости и давлению теплоносителя, а также тепловым потокам близка к условиям в ТВС реактора типа ВВЭР-1000.

Для CFD моделирования использовался код ANSYS CFX. Применялись осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса в стационарной постановке (RANS) с различными моделями турбулентности, использовалась вода с переменными свойствами по таблицам IAPW-97.

На первом этапе выполнялись расчеты применительно к пустому (без сборки) шестигранному каналу с размером под ключ 57,3 мм. Использовалась сетка с гексаэдрическими и призматическими элементами общим объемом 1 млн элементов. Длина исследуемого канала принята равной 3 м, из них отдельно выделялся участок 2 м для гидродинамической стабилизации потока, результаты на котором не учитывались. На основе вариантных расчетов определены параметры сетки, модель турбулентности и высота эквивалентной шероховатости для шестигранного чехла.

Затем модель верифицировалась по гидросопротивлению 19-стержневой сборки в шестигранном канале, рассмотренном выше. Диаметр имитаторов твэл 9,1 мм, шаг расположения имитаторов в треугольной решетке 12,75 мм, расстояние между отборами давления 3,56 м, расстояние между ДР – 340 мм, количество ДР между отборами давления – 10 шт, высота ДР 30 мм, расположение решеток – см. рисунок 1.

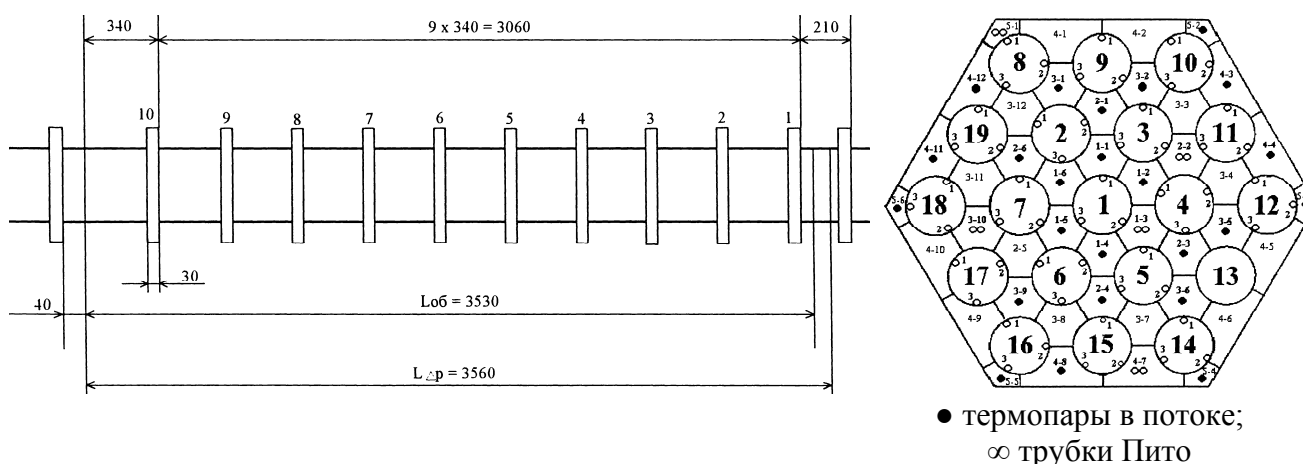


Рис. 1 Схема экспериментального участка

Использовалась сетка с тетраэдрическими/призматическими элементами общим объемом 92 млн элементов (см. рисунок 2). Высота пристенного элемента принята равной на основе предварительных тестовых расчетов 0,01 мм, эквивалентная шероховатость стенок чехла задавалась равной 6 мкм, остальные поверхности проточной части принимались гидравлически гладкими. Варьировались модели турбулентности.

Результаты CFD-расчетов вместе с экспериментальными данными представлены на рисунке 3. Можно видеть, что наилучшие результаты для области $Re \approx 10^5$ получены с применением моделей турбулентности SST и BSL, с ростом числа Рейнольдса результаты расчетов по всем моделям сходятся.

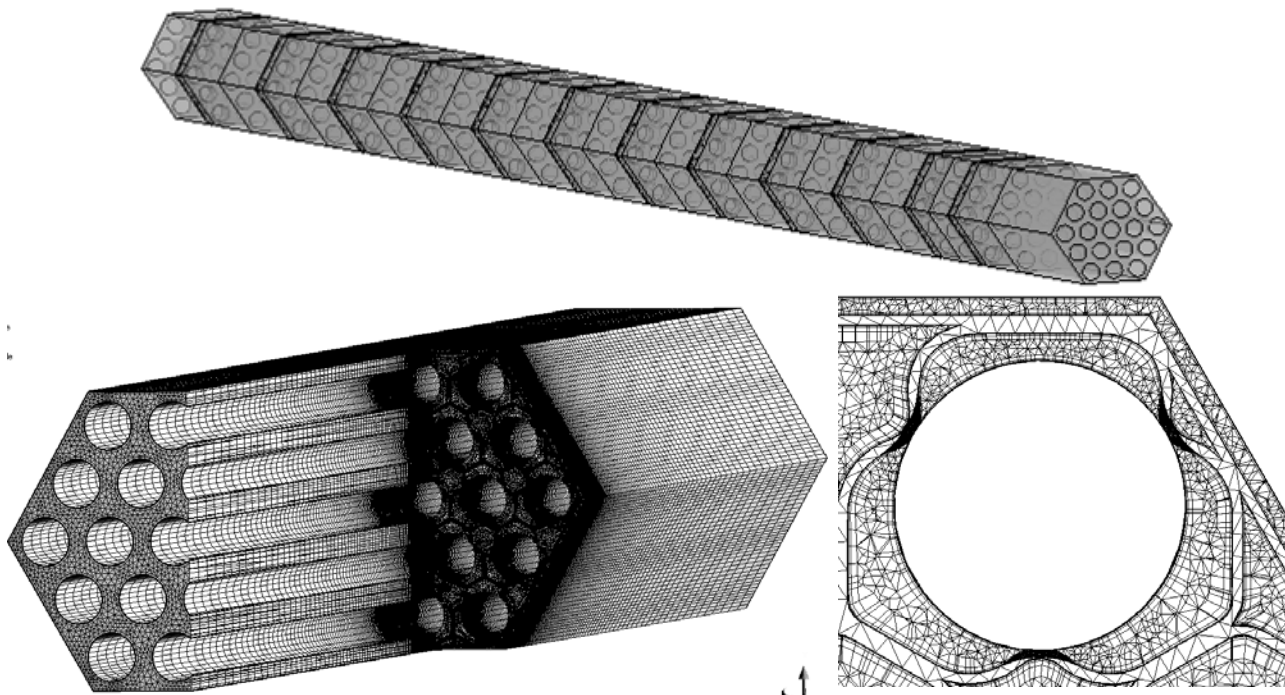


Рис. 2 Сеточная модель 19-стержневой сборки

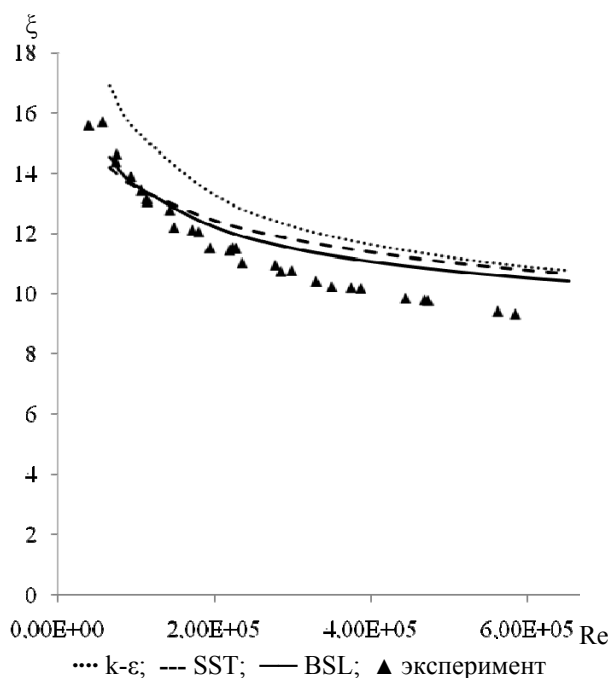


Рис. 3 Результаты для холодной проливке 19-стержневой сборки

На заключительном этапе проводилась верификация кода ТИГРСИ и CFD-кода по измерениям локальных параметров (динамический напор и температура), полученным на 19-стержневом пучке с электрообогревом имитаторов твэл. Обогреваемая длина 3,53 м. Прочие геометрические параметры сборки приведены выше. В настоящей работе рассматривались два эксперимента с параметрами, близкими к номинальным условиям ВВЭР-1000 (давление 15,7 МПа, массовая скорость 4000 кг/(с·м²)):

1) температура на входе 288 С, тепловой поток 422,5 кВт/м²;

2) температура на входе 291 С, тепловой поток 627,9 кВт/м².

Отклонение мощности имитаторов от средней по пучку составляло в эксперименте от -1,4 до +1,0 %. Погрешности измерений составляли: температура воды в потоке $\pm 1,5$ С, мощность сборки $\pm 1,2\%$, давление воды $\pm 0,9\%$, расход воды $\pm 2\%$.

Для моделирования течения и теплообмена в сборке была разработана ячейковая модель средствами кода ТИГРСИ. Разбиение по поперечному сечению, аналогично представленному на рисунке 1. Дискретизация по длине включает 100 участков. Коэффициент гидравлического сопротивления для каждой ячейки определялся из эквивалентного диаметра канала, образованного ячейкой, также учитывались местные КГС в области ДР. На входе в сборку задавались равномерные профили скорости, температуры и давления. По длине энерговыделение принято постоянным, но учитывалась неравномерность тепловыделения по каждому из имитаторов ТВЭЛ в поперечном сечении пучка.

В целях визуализации результатов расчетов кода ТИГРСИ средствами языка программирования С++ в среде программирования Borland С++ Builder (v 6.0) был разработан постпроцессор, позволяющий строить картограммы распределения параметров (температуры, скорости, плотности и др.) по сечениям тепловыделяющей сборки.

Для поддерживающих CFD-расчетов использовалась расчетная сетка, показанная на рисунке 2. Расчеты выполнялись в стационарной постановке (RANS) с использованием модели турбулентности BSL EARSM, кипение не моделировалось.

На входе в сборку задавались скорость и температура. Профиль скорости на входе был принят равномерным. На стенках чехла – условия прилипания и эквивалентная шероховатость 6 мкм, а также тепловые потери в пределах 3% от суммарной мощности. На стенках ДР – адиабатная граница и условие прилипания. На стенках имитаторов твэл – равномерный тепловой поток и условие прилипания.

Результаты расчета распределения относительной массовой скорости и относительного подогрева по ячейкам, полученные по кодам ТИГРСИ и ANSYS CFX, приведены на рисунках 4 и 5 вместе с экспериментальными данными. На рисунках 6 - 8 показаны поля скорости и температуры, полученные для второго расчетного варианта – в том числе недогрев теплоносителя до температуры насыщения в пристенном слое жидкости у имитаторов твэл.

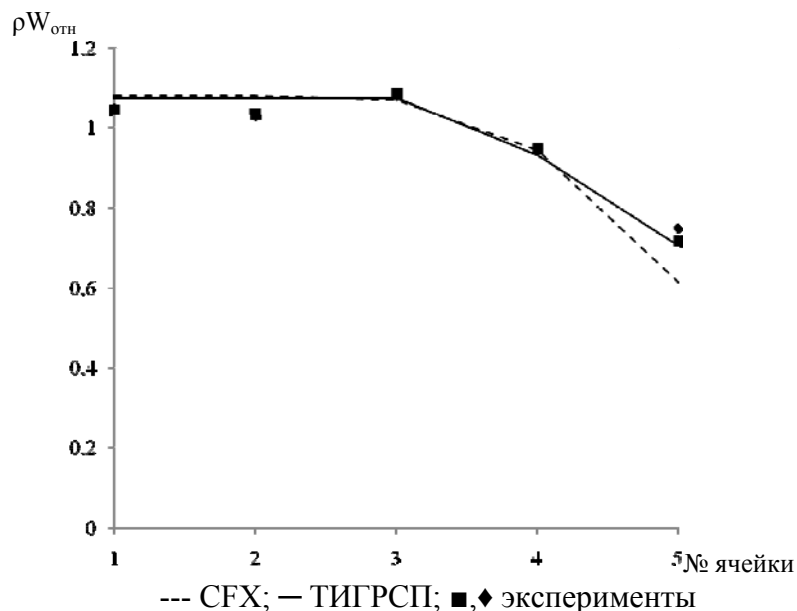


Рис. 4 Распределение относительного расхода по ячейкам

Видно, что центральная группа твэл находятся практически в номинальных условиях обтекания (скорость обтекания близка к среднемассовому значению). В то время как часть поверхности периферийной группы имитаторов, в особенности обращенная в углы чехла,

омывается с пониженной скоростью. В этих же областях располагается максимум температур поверхности твэл и следует ожидать начала кипения в первую очередь.

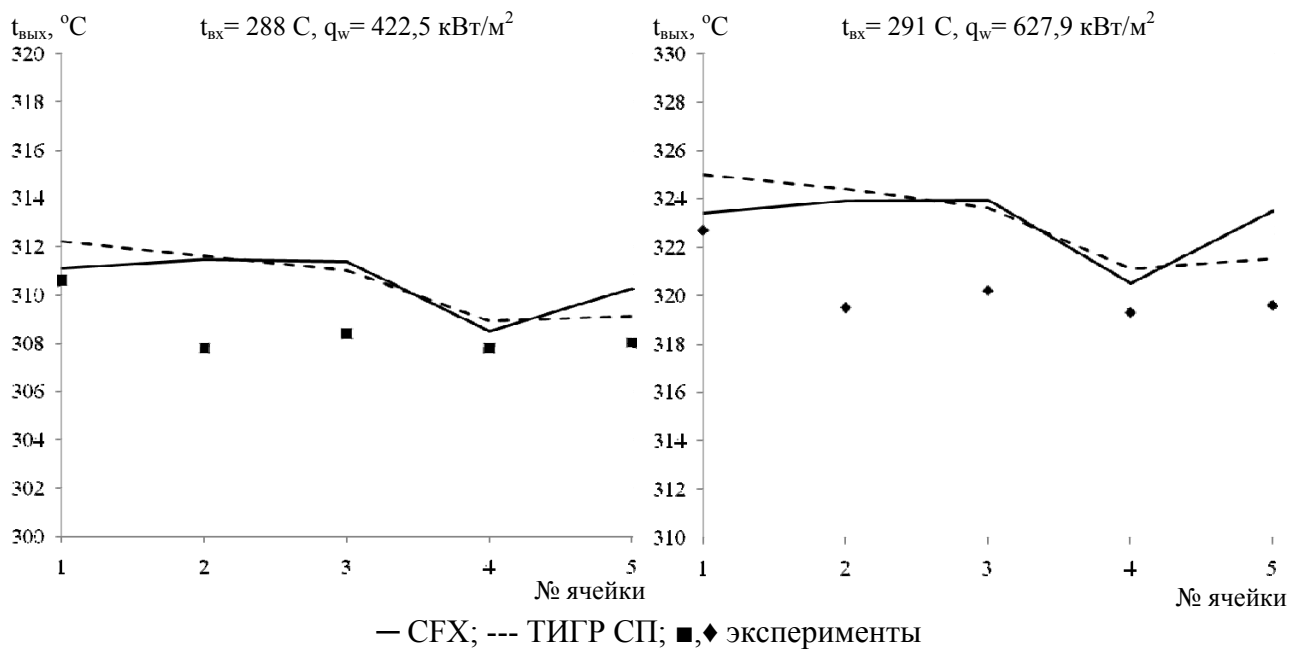


Рис. 5 Температуры воды на выходе из сборки

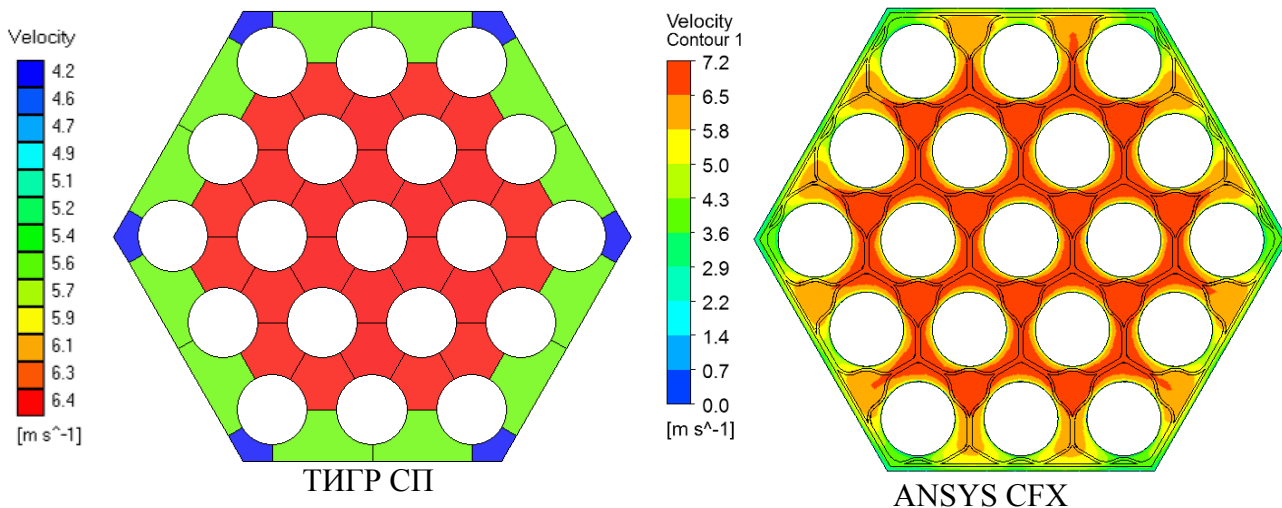


Рис. 6 Поле скорости на выходе из обогреваемого участка

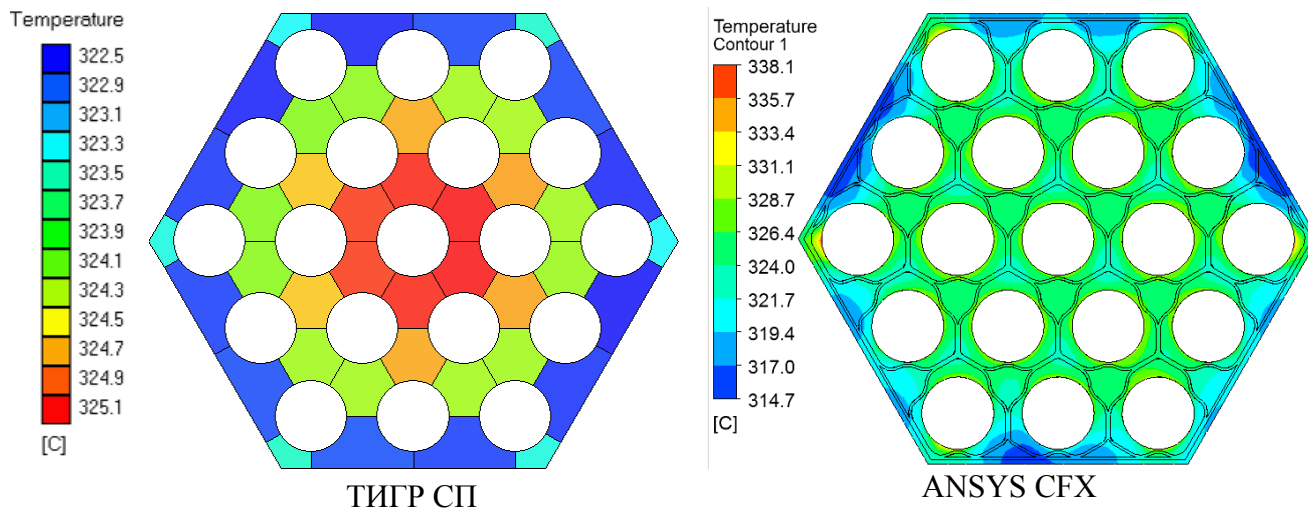


Рис. 7 Поле температуры на выходе из обогреваемого участка

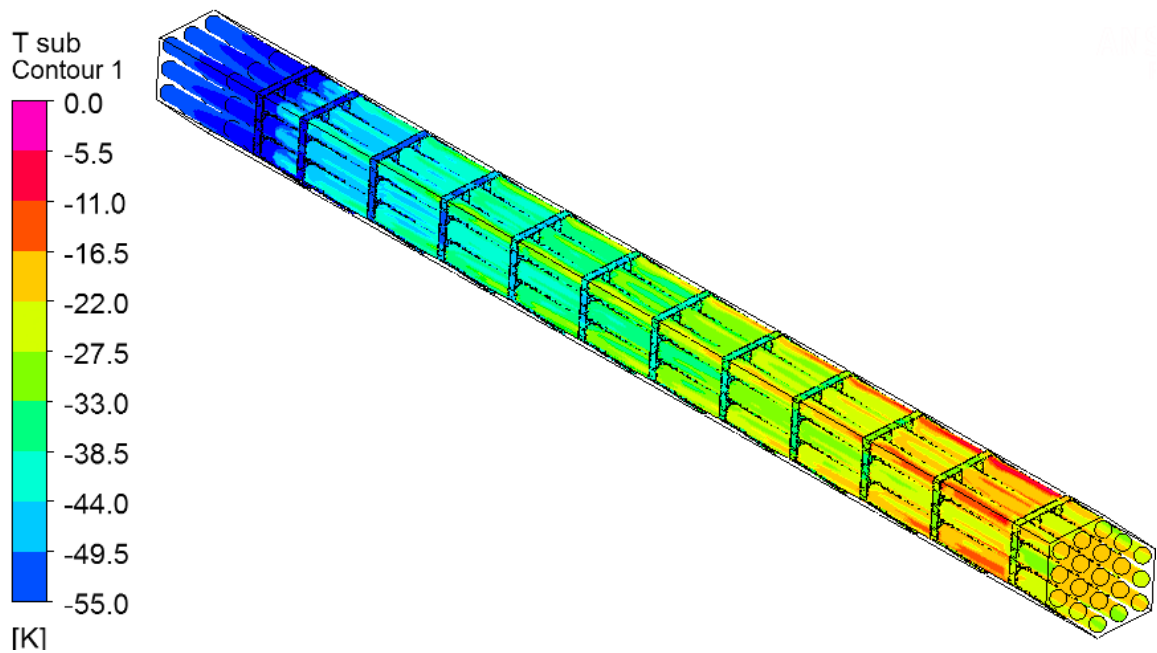


Рис. 8 Недогрев до температуры насыщения на поверхности имитаторов ТВЭЛ, ANSYS CFX

По распределению расхода по поперечному сечению сборки результаты расчетов в целом совпадают с экспериментальными данными: в центральных ячейках расход составляет 102-106% от среднего, в угловых ячейках расход падает до 65-75% от среднего значения. Причем для угловых ячеек результаты расчетов по коду ТИГРСИ полностью совпадают с экспериментальными данными, в то время как CFD расчет несколько занижает массовую скорость в углах сборки.

Распределение подогрева теплоносителя по ячейкам ведет себя несколько иначе. В частности максимальный подогрев 108-110% от среднего приходится на центральные ячейки, для прочих ячеек подогрев лежит в области среднего значения в пределах погрешности измерений.