

В. Г. Крапивцев, О. В. Кудрявцев,
В. И. Солонин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ НА ВХОДЕ В АКТИВНУЮ ЗОНУ РЕАКТОРОВ ВВЭР

Разработана расчетная модель экспериментальной установки реактора ВВЭР-1000. Исследовано течение теплоносителя во входном участке реактора от подводящих патрубков до входа в активную зону. Проведена валидация результатов расчета с использованием экспериментальных данных.

E-mail: en7@power.bmstu.ru

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, опорные стояки, модель турбулентности, модель входного участка реактора ВВЭР-1000, реакторы с водой под давлением.

В настоящее время реакторы с водой под давлением являются основными в атомной энергетике России (ВВЭР) и мира (PWR). Стратегия развития атомного реакторостроения России в ближайшей перспективе ориентирована на широкое использование именно реакторов с водой под давлением. Основным направлением эволюции реакторов данного типа является модернизация уже существующих и хорошо себя зарекомендовавших в эксплуатации проектов, которая заключается в увеличении мощности блока, повышении глубины выгорания топлива, длительности периода между перезагрузками. Важным для обоснования надежности и безопасности реакторных установок (РУ) является более детальное расчетное исследование процессов гидродинамики и тепло-массообмена при организации теплоотвода от активной зоны.

Одной из таких задач для активных зон с чехловыми и, особенно, бесчехловыми тепловыделяющими сборками (ТВС) является распределение параметров теплоносителя (скорости, температуры, концентрации жидкого поглотителя) на входе в активную зону, поскольку они влияют на нейтронно-физические характеристики активной зоны, процессы теплоотдачи и динамические нагрузки, испытываемые элементами конструкции активной зоны.

До недавнего времени для расчетного обоснования безопасности проектов РУ в основном использовались контурные расчетные коды: RELAP [1], ТРАП [2], КОРСАР [2] и другие, в которых теплогидравлические процессы описывались в одномерном приближении. Такие программы не могут в полной мере описать процессы, имеющие место при движении теплоносителя в реакторе, вследствие, как правило, их трехмерного характера. Для этого требуется использование CFD-кодов, которые позволяют описать пространственный характер

гидродинамики благодаря использованию более сложных расчетных моделей, требующих больших вычислительных ресурсов.

В настоящее время в России и за рубежом течение теплоносителя во входном участке реакторов с водой под давлением широко исследуется как с помощью экспериментов на маломасштабных стендах [3, 4], так и с помощью численного моделирования с привлечением CFD-кодов [5, 6].

В настоящей статье описываются результаты экспериментального и расчетного исследований гидродинамики и теплообмена в потоке воды, движущейся от входных патрубков в опускном и напорном участках (в напорной камере) на входе в активную зону модели реактора ВВЭР-1000 при подаче воды в четыре напорных патрубка модели.

Для валидации кода применительно к задаче моделирования течения в напорной камере использованы результаты экспериментов на модели напорной камеры, геометрически подобной напорной камере реактора ВВЭР-1000 с масштабом моделирования 1:17. Модель создана при поддержке ОАО “МСЗ” на кафедре “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Экспериментальная установка. Модель напорной камеры (рис. 1) включает в себя подводящие патрубки воды к корпусу 1, корпус 2 и шахту модели 3, перфорированное днище шахты 4, имитаторы опорных стоячков 5, опорную (6) и измерительную (7) решетки. В правой части рис. 1 представлено условное разбиение тракта течения экспериментальной модели на подобласти в целях более удобного представления и анализа результатов экспериментов и расчетов: подводящий патрубок 8, опускной (9) и эллиптический (10) кольцевые коллекторы, конический коллектор 11.

Тепловыделяющие сборки активной зоны, устанавливаемые в реакторах ВВЭР-1000 на опорные стояки, а также “выгородка” не моделировались. Поток модельной среды отводился через перфорацию в верхней части модели и затем через отводящие патрубки.

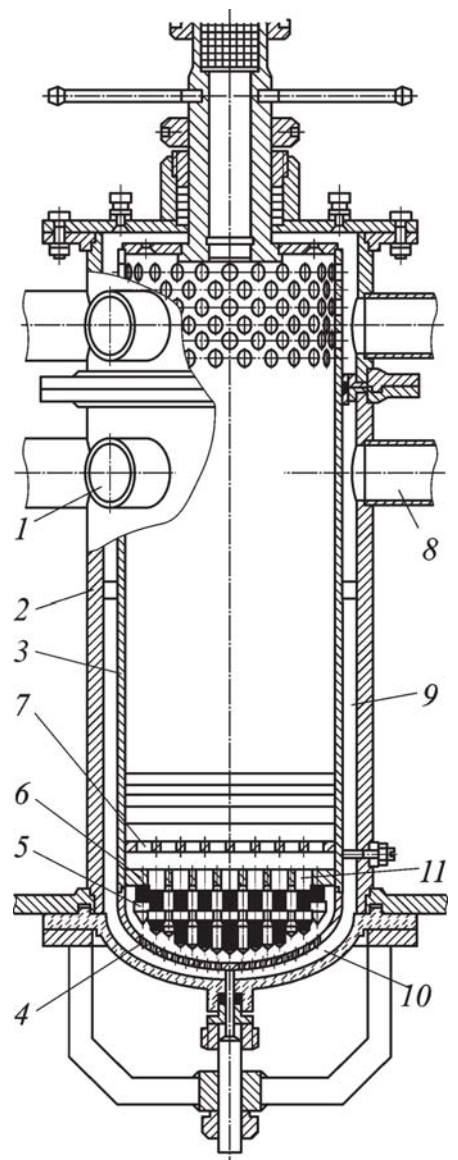


Рис. 1. Схема модели реактора ВВЭР-1000 (В-320) с опорными стоячками

Проточная часть модели выполнена с сохранением геометрического подобия. Напорная камера модели создана для двух различных вариантов геометрии с имитаторами опорных стояков (см. рис. 1) и без имитаторов. Для подводящих и отводящих патрубков, опускного тракта и коллекторов под днищем шахты масштаб моделирования равен 1:17. Число имитаторов опорных труб и число отверстий перфорации в днище шахты модели уменьшено по сравнению с натурными: 55 имитаторов вместо 163 натуральных опорных стояков; число отверстий — 379 вместо 1332. Доли площади для течения модельной среды через перфорацию днища шахты и имитаторы опорных стояков выбраны в модели одинаковыми с натурными. Такое решение преследовало цель увеличить числа Рейнольдса течения в отверстиях перфорации и имитаторах опорных стояков для достижения подобия в условиях достаточно высоких чисел Рейнольдса.

Эти условия моделирования позволили повысить значения числа Рейнольдса течения в отверстиях перфорации днища шахты и имитаторах до $3,2 \cdot 10^4$ и 3080 соответственно и обеспечить близкие значения местных гидравлических сопротивлений, слабо зависящих от значения числа Рейнольдса при турбулентном течении потока. В реакторе ВВЭР-1000 при номинальном режиме соответствующие числа Рейнольдса равны $4,5 \cdot 10^6$ и $2,3 \cdot 10^5$.

Течение в модели напорной камеры исследовалось при использовании дистиллированной воды с температурой 30...40°C и давлением до 0,3 МПа, циркулирующей в замкнутом контуре гидродинамического стенда Э7-ЭЛЕМАШ [7]. Во вспомогательных экспериментах в качестве модельной среды использовали воздух с температурой 40...60°C и давлением, близким к атмосферному, при размещении в разомкнутом газодинамическом контуре. Числа Рейнольдса течения воды и воздуха в подводящих патрубках модели составляли $2,7 \cdot 10^5$ и $1,1 \cdot 10^5$ против $7,3 \cdot 10^7$ в натуральных условиях в реакторах ВВЭР-1000.

Для исследования характеристик потока в модели напорной камеры в экспериментах измеряли:

- распределение скорости потока по поверхности симметрии кольцевого опускного тракта (в четырех сечениях по высоте тракта);
- значения скорости потока на оси симметрии имитаторов опорных стояков в сечении истечения потока из имитаторов.

Для установления распределения скорости потока по сечению выхода из имитаторов опорных стояков во вспомогательных экспериментах были выполнены измерения скорости потока вдоль линий симметрии треугольной решетки имитаторов. Поскольку указанные распределения скорости характеризовались существенной неравномерностью, зависящей от положения имитаторов, на выходе из каждого имитатора были установлены трубки длиной 145 мм (диаметр трубок

18 мм), на выходе из которых распределения скорости приближались к стабилизированному симметричному. Измерение скорости на выходе из указанных трубок позволило установить коэффициенты, связывающие скорость на оси потока (измеряемую в экспериментах) со среднерасходной скоростью на выходе из имитаторов опорных стояков модели.

Измерение скорости потока теплоносителя в модели реактора ВВЭР-1000 проводилось в напорной камере и на входе в активную зону. В процессе измерения фиксировались полный напор и статическое давление потока, по которым определялись значения скорости в исследуемых точках потока. Трубки полного напора выполнены в виде трубок Пито с острым входным импульсным отверстием, для измерений статического давления в этих же точках используются трубки Прандтля.

Во входном участке скорость измеряется в четырех сечениях по высоте — датчики расположены в опускной части экспериментальной модели. Измерительные зонды закреплены в шахте модели, и получение распределения скорости по тангенциальному направлению обеспечивалось вращением шахты относительно корпуса.

Измерение скорости потока теплоносителя на входе в активную зону в модели реактора ВВЭР-1000 проводилось в сечении за опорной решеткой (см. рис. 1, поз. 6), соответствующем входу потока в активную зону модели. Измерения проводились в пяти точках, расположенных в радиальном направлении в центре и в отверстиях второго–пятого ряда опорной решетки. Измерительная решетка (см. рис. 1, поз. 7) с зондами фиксировалась внутри шахты модели на расстоянии 20 мм над опорной решеткой.

Погрешность измерения локальных значений скоростей в тракте модели составляет $\pm 10\%$.

Расчетная модель. Для создания расчетной модели экспериментального стенда и выполнения численного моделирования использовался CFD-код STAR-CD [8].

Решалась система уравнений движения и неразрывности, записанная в декартовой системе координат. Ось z направлена вдоль оси модели. Замыкающими соотношениями были уравнения баланса кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε . Следует отметить, что, несмотря на бурное развитие методов моделирования турбулентных течений, k – ε -модель турбулентности остается одной из самых популярных моделей и часто используется при проведении схожих расчетных исследований [6].

Расчеты проводились со схемами дискретизации первого (UD) и второго (MARS) порядков, а также с использованием следующих моделей турбулентности:

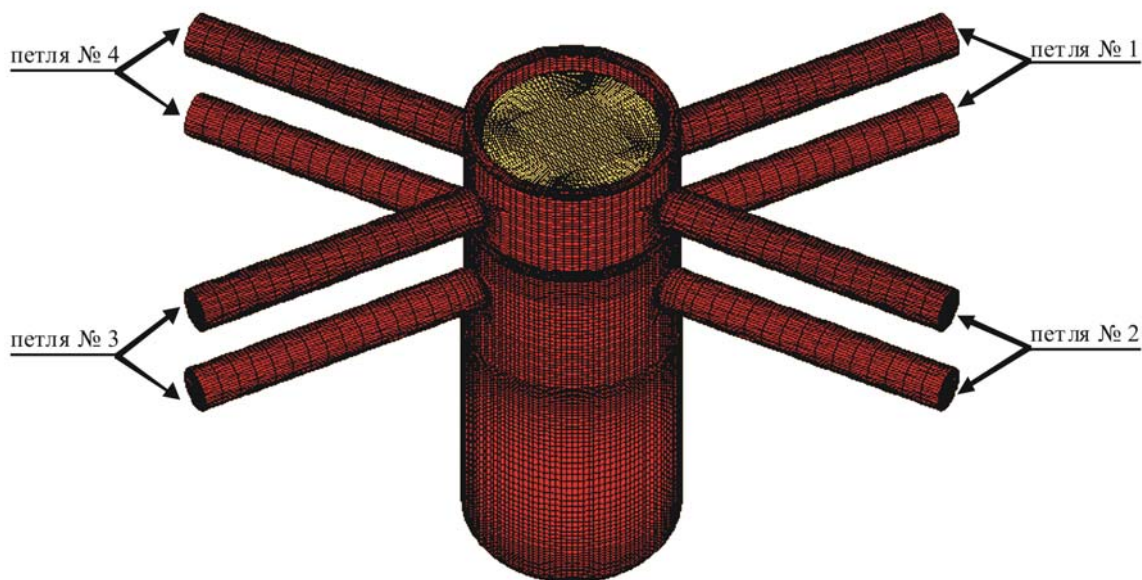


Рис. 2. Сеточная модель экспериментального стенда

- стандартная $k-\varepsilon$;
- квадратичная $k-\varepsilon$;
- кубическая $k-\varepsilon$.

Исходя из анализа имеющихся вычислительных ресурсов, возможностей кода, геометрии расчетной области и с учетом рекомендации [9, 10] была разработана сеточная топология на основе гексаэдрических элементов, содержащая 4,5 млн контрольных объемов (рис. 2).

Граничные условия задавались во входных и выходных сечениях патрубков в виде стабилизированных распределений скорости и соответствующих распределений характеристик турбулентности. В пристенной области использовались стандартные “функции стенки” для гидравлически гладкой поверхности.

При анализе результатов расчета и их сравнении с результатами эксперимента в области течения теплоносителя от подводящих патрубков до выхода из имитаторов опорных стояков применялось условное разбиение, представленное на рис. 1 (поз. 8–11).

Течение в опускном кольцевом коллекторе. При выходе из подводящих патрубков, поток воды образует веерные струи, возникающие при ударе потока, выходящего из патрубков, о стенку шахты. Эти струи формируют опускной кольцевой поток, имеющий признаки кольцевого течения в канале, со значительной неравномерностью распределения скорости. Максимальные значения скорости в этом течении наблюдаются между патрубками.

Это подтверждается физическими и численными экспериментами, результаты которых приведены на рис. 3. Области с повышенными значениями скоростей (тангенциальная неравномерность), сформировавшиеся в опускном коллекторе, будем условно называть струями. Число струй равно числу промежутков между патрубками, через каждый из которых подавался одинаковый расход воды $25 \text{ м}^3/\text{ч}$. Ширина

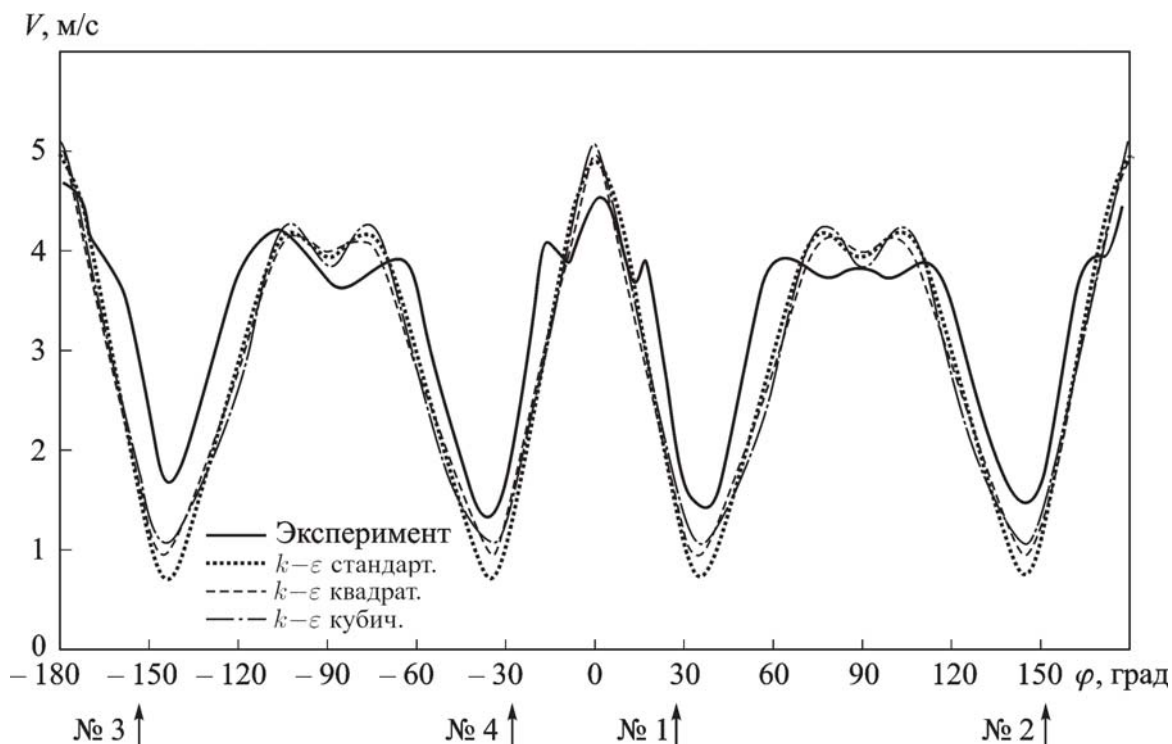


Рис. 3. Изменение абсолютного значения скорости теплоносителя в тангенциальном направлении в опускном кольцевом коллекторе на 90 мм ниже осей подводных патрубков (стрелками показано положение осей подводных патрубков)

струи и максимальная скорость в ней зависят от расстояния между патрубками. Для узкой струи максимальная скорость больше, чем для широкой.

Согласно результатам сравнения данных расчета и эксперимента среднеквадратическая погрешность для локальных значений скоростей составила от 1,7% до 2,0% в зависимости от выбранных параметров расчетной модели. Исходя из этих данных, можно сделать вывод, что расчет продемонстрировал хорошее совпадение результатов с данными эксперимента. При сравнении результатов расчетов для разностных схем 1-го и 2-го порядков с результатами экспериментов можно отметить их хорошее соответствие друг другу (различие составляет 0,3%). Также следует отметить хорошее согласие результатов расчетов между собой при варьировании моделями турбулентности (различие составляет 0,2%). Лучшее соответствие продемонстрировала квадратичная $k-\varepsilon$ -модель турбулентности.

Течение в эллиптическом кольцевом и коническом коллекторах. В области эллиптического и конусного коллекторов отсутствуют данные физических экспериментов. Поэтому изучение течения в данной области с использованием результатов численного моделирования является важным для понимания причин, вызывающих неравномерность распределения расхода теплоносителя на входе в ТВС активной зоны. Результаты расчетного моделирования течения, представленные в виде распределения векторов скорости в рассматриваемой области, приведены на рис. 4 и 5 (3-я полоса обложки для вариантов с наличием

и при отсутствии имитаторов опорных стояков ТВС соответственно). Такие распределения относятся к сечению, проходящему через ось симметрии между близко расположенными подводными патрубками.

На рис. 4 (см. 3-ю полосу обложки) приведен вариант с установкой имитаторов опорных стояков ТВС 7, вход потока воды в которые происходит через вертикальные щели 10 в верхней части входных устройств, а выход — через цилиндрические патрубки 11. Корпус 8 и перфорированное днище шахты 5 модели образуют кольцевой эллиптический коллектор, в котором кольцевой опускной поток 3, сформированный подводом воды в напорные патрубки, изменяет направление своего движения 4 и втекает в отверстия перфорации 6 днища. Система струй, вытекающих из отверстий перфорации днища, формирует течение в коническом коллекторе 9, образованном поверхностью днища 5, нижней цилиндрической частью шахты 2, перфорированной опорной решеткой 1. Вариант со свободным коническим коллектором представлен на рис. 5 (см. 3-ю полосу обложки).

В результате анализа вариантных расчетов выявили, что характер потока в кольцевом эллиптическом коллекторе практически не зависит от геометрии конусного коллектора (остается одинаковым как при наличии опорных стояков, так и при их отсутствии). На этот поток оказывает влияние его предыстория — в нем сохраняется тангенциальная неравномерность течения, имеющая место в опускном кольцевом коллекторе. Скорость потока вдоль осевой линии коллектора не является постоянной: начиная от входа в коллектор она вначале умеренно увеличивается (отвод теплоносителя через перфорацию не компенсирует полностью уменьшение проходного сечения), а в приосевой области коллектора скорость потока уменьшается в 3–5 раз по сравнению со входной скоростью. Статическое давление вдоль осевой линии коллектора изменяется в соответствии со скоростью — при уменьшении скорости давление повышается и наоборот.

Среднерасходная скорость потока в отверстиях перфорированного днища не является одинаковой. Она уменьшается от приосевой области днища к его периферии примерно на 35...40%. Распределение средних значений локальных скоростей по сечениям отверстий не является осесимметричным, а зависит от направления втекания потока в отверстия перфорации днища. Значение среднерасходных скоростей, расположенных в области “следов” струй (области пониженных скоростей), меньше, чем в области “осей” струй.

На характер течения в коническом коллекторе оказывает влияние его внутренняя геометрия (наличие или отсутствие имитаторов опорных труб). Для геометрии с имитаторами в коническом коллекторе, в поперечных сечениях, удаленных от днища шахты и расположенных между опорными стояками, статическое давление выравнивается.

Исключение составляет область на периферии коллектора, где статическое давление больше на $\sim 20\%$ скоростного напора струй, вытекающих из перфорационных отверстий днища шахты. Скорость восходящего потока в области на периферии шахты в 1,2–2 раза больше, чем в центральной части течения в коллекторе. При течении в коллекторе без опорных стояков повышение давления на периферии составляет $\sim 30\%$, а скорость восходящего потока на периферии превышает скорость в центральной области коллектора в 3–3,6 раза.

Таким образом, течения в эллиптическом кольцевом и коническом коллекторах развиваются при существенном влиянии предыстории течения в опускном кольцевом коллекторе и при взаимном влиянии характеристик потока. Основной особенностью влияния перфорированного днища на течение в конусном коллекторе является преобразование распределения расходной скорости от уменьшающейся к периферии (формируется за перфорацией днища шахты) к существенно увеличивающейся (выше по потоку) на периферии коллектора, особенно в области, прилегающей к его боковой стенке. Эта особенность проявляется меньше, но сохраняется и при формировании потока на входе в ТВС опорными стояками. Как показывает анализ вариантных расчетов, влияние опорных стояков, разрушающих вихревое течение со слабopоточной зоной циркуляции, характерное для свободного объема конусного коллектора (7, 9, 10, см. рис. 5), оказывается недостаточным для исключения периферийного вихревого течения в геометрии, приведенной на рис. 4.

Распределение скорости потока и расходов воды на выходе из имитаторов опорных стояков. Определяющее влияние на распределение локальных скоростей из имитаторов опорных стояков оказывает предыстория потока, особенно течение в коническом коллекторе, где подвод теплоносителя через перфорированное днище, геометрия коллектора и расположение в нем стояков формируют на периферии восходящее транзитное течение.

Пример полученных в расчетах распределений абсолютной скорости на выходе из опорной решетки приведены на рис. 6 и 7 (4-я полоса обложки) для вариантов с имитаторами опорных стояков и без них. В обоих случаях отчетливо видна несимметрия распределения расхода в сечении стояков, нарастающая для стояков 2, 3 и 4-го рядов стояков от центрального. При сопоставлении двух рисунков видна выравнивающая роль опорных стояков (для варианта с наличием опорных стояков неравномерность в отверстиях существенно меньше).

Для стояков 3-го и 4-го ряда (вариант с опорными стояками) отмечается центральная симметрия в распределении скорости в сечении стояков, которая, однако, не является полной. Последнее связано с несимметрией в расположении патрубков относительно расположения выходных сечений стояков.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает неравномерность распределения расходов через стояки, наиболее существенную вдоль радиуса модели. Если принять расход через центральный стояк за единицу, то для ближайших шести стояков происходит небольшое (2...3%) снижение расхода, а при продвижении к периферийным стоякам происходит увеличение расхода до 10...15% расхода через центральный.

Этот экспериментальный результат, полученный на модели с масштабом моделирования 1:17 при числах Рейнольдса в подводящих патрубках существенно меньше натуральных ($2,7 \cdot 10^5$ и $7,3 \cdot 10^7$ соответственно) хорошо согласуется с данными пусконаладочных испытаний ВВЭР-1000 [11, 12].

Сравнение рассчитанных и экспериментальных значений средних расходных скоростей в стояках показывает, что тенденция в распределении расхода по опорным стоякам одинакова. В то же время в расчетах радиальная неравномерность расходов через стояки меньше, чем в экспериментах. Для большей части опорных стояков различие в экспериментальных и расчетных расходах не превышает 5...7%. Но для стояков периферийной части модели в расчетах наблюдаются отклонения в расходах до 10...12%. Такое различие можно объяснить как недостаточно мелкой расчетной сеткой, так и несовершенством модели турбулентности. Число контрольных объемов в отверстиях перфорации днища шахты составляло 257720.

Апробация различных моделей турбулентности типа $k-\varepsilon$, двух схем дискретизации расчетной области не привела к существенному изменению результатов моделирования. Отклонение расчетных данных от экспериментальных сохраняется практически на одном уровне. С учетом сохранения крупных вихрей в области коллектора за эллиптическим днищем целесообразно апробировать модель турбулентности с прямым моделированием крупных вихрей.

В целом по результатам численного моделирования течения в модели можно констатировать, что используемая модель и схема дискретизации дают более сглаженные по отношению к экспериментальным результаты. Этот вывод следует из сравнения локальных распределений скорости в кольцевом опускном тракте на выходе из опорных стояков, а также из распределения расходов по отдельным стоякам. С использованием апробированной модели турбулентности можно прогнозировать локальные и интегральные характеристики течения на входе в активную зону с погрешностью $\sim 12\%$, что можно считать приемлемым для анализов распределений расходов на входе в активную зону.

Заключение. Приведены результаты физического и численного моделирования течения в модели входного участка реактора ВВЭР-1000, включающей патрубки петель циркуляции, кольцевой опускной

участок, коллекторы под и над эллиптическим днищем шахты, имитаторы опорных стояков под установку ТВС.

Показано, что созданная расчетная модель с умеренной степенью дискретизации способна качественно и количественно правильно (с погрешностью $\sim 12\%$) описать локальные и интегральные характеристики течения.

Результаты численного моделирования позволяют существенно дополнить результаты физического эксперимента, детализировать гидродинамику турбулентного течения в областях, где трудно получить экспериментальные данные.

Общий вывод по результатам валидации расчетного метода, апробированного в работе, состоит в том, что CFD-модели, безусловно, целесообразно применять для расчетов течения в проточной части внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР.

Результаты численного моделирования и физического эксперимента показывают, что течение в опускном кольцевом и эллиптическом коллекторах взаимосвязаны, но практически не зависят от течения в коническом коллекторе. На течение в коническом коллекторе существенное влияние оказывает геометрия его исполнения, влияющая на формирование потоков вытекающих из отверстий перфорации струй.

Авторы выражают признательность концерну “Росэнергоатом” за поддержку выполненного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.relap.com/>
2. М о д е л и р о в а н и е процессов перемешивания теплоносителя в реакторе кодами ТРАП-КС, ДКМ и КОРСАР/ГП / М.А.Быков, Е.А.Лисенков, Ю.А.Безруков и др. // Труды 6 Междунар. науч.-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, Подольск, Россия, 26–29 мая, 2009. – 10 с.
3. И с л е д о в а н и е перемешивания теплоносителя в опускной камере реактора / Е.А. Лисенков, Ю.А.Безруков, В.Н.Ульяновский // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. – 2008. – Вып. 23. – С. 3–17.
4. R o h d e U., K l i e m S., H o h n e V. Fluid mixing and flow distribution in the reactor circuit, measurement data base // Nucl. Eng. Des., 235. – 2005. – P. 421–433.
5. R o h d e U., H o h n e T., K l i e m S. Fluid mixing and flow distribution in a primary circuit of a nuclear pressurized water reactor — Validation of CFD codes // Nucl. Eng. Des., 237. – 2007. – P. 421–433.
6. P e t r o v V., M a n e r a A. Development and validation of a CFD model for the EPRTM pressure vessel // Proc. of ICAPP '10, San Diego, StateCA, USA. June 13–17, 2010. Paper 10343. – 7 p.
7. А н н о т а ц и о н н ы й отчет по научно-исследовательской работе. Договор № 2004/4.1.1.1.7/10339 от 18.01.2005 г. УНЦ “НУКЛОН” при МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М., 2005. – 90 с.
8. M e t h o d o l o g y STAR-CD VERSION 3.20. 2004 CD adapco Group.

9. Best practice guidelines for the use of CFD in nuclear reactor safety applications / NEA/CSNI/R(2007)5, 2007. – 166 p.
10. Hansen G., Owen S. Mesh generation technology for nuclear simulation; barriers and opportunities // Nucl. Eng. Des., 238. – 2008. – P. 2590–2605.
11. VVER-1000 coolant transient benchmark, Phase 2 (V1000CT-2). Summary results of Exercise 1 on vessel mixing simulation // OECD, 2010. – 144 с.
12. Логвинов С. А., Безруков Ю. А., Драгунов Ю. Г. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. – М.: ИКЦ “Академкнига”, 2004. – 255 с.

Статья поступила в редакцию 27.02.2011



Вениамин Григорьевич Крапивцев — канд. техн. наук, доцент кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

V.G. Kravtsev — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Nuclear Reactors and Plants” department of the Bauman Moscow State Technical University.



Олег Вячеславович Кудрявцев – инженер-конструктор ОАО “ОКБ Гидропресс”.

O.V. Kudryavtsev — engineer-designer of ОАО “ОКБ Hidropress”.



Владимир Иванович Солонин — д-р техн. наук, профессор кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

V.I. Solonin — D. Sc. (Eng.), professor of “Nuclear Reactors and Plants” department of the Bauman Moscow State Technical University.