

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПОТОКОВ С РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ БОРА КОДОМ REMIX

В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, А.В. Петросян, С.Е. Якуш

ФГУП «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций», г. Электрогорск



В данной работе излагается описание трехмерного гидродинамического кода REMIX (REactor MIXing), разработанного в Электрогорском научно-исследовательском центре по безопасности атомных электростанций для расчета перемешивания теплоносителя с различной концентрацией борной кислоты в проточном тракте реактора ВВЭР-1000. В коде REMIX применяется усовершенствованная численная методика, позволяющая уменьшить искажающее влияние численной диффузии.

Кодом REMIX выполнены тестовые расчеты для задачи о течении жидкости в трубе и за уступом. Получено хорошее совпадение с соответствующими аналитическими решениями и экспериментальными данными. Показано, что усовершенствование численной методики в коде REMIX позволило улучшить качество моделирования.

С использованием программного комплекса REMIX проведены расчеты течения теплоносителя и распространения пробки неборированной воды в проточном тракте реактора ВВЭР-1000. Получено, что максимальное относительное уменьшение средней концентрации бора по сравнению с нормальным уровнем составляет 31%. В отдельных точках на входе в активную зону относительное уменьшение концентрации достигает 38%.

ВВЕДЕНИЕ

В водо-водяных реакторах под давлением (ВВЭР/PWR) борная кислота H_3BO_3 используется в качестве средства для мягкого регулирования мощности и обеспечения необходимой подкритичности в остановленном реакторе, при перегрузке топлива или других операциях [1]. Так, например, при выводе реактора в критическое состояние концентрация борной кислоты постепенно снижается путем отвода части борированной воды из первого контура и подпиткой чистой воды в холодную нитку. На практике при расчете процессов разбавления борной кислоты предполагается мгновенное, однородное перемешивание между борированной и чистой подпиточной водой во всем реакторном контуре, в том числе и в активной зоне реактора. Однако возможны ситуации с неоднородным перемешиванием или даже с отсутствием перемешивания, при этом образующийся объем чистой или слабоборированной воды может достигнуть активной зоны и вызвать неконтролируемый рост реактивности, грозящий серьезным разрушением тепловыделяющих сборок и выходом активности в

первый контур реактора. Изучение путей возникновения аварийных ситуаций такого типа, особенностей движения объемов неборированного теплоносителя в проточном тракте реактора, оценка последствий такого инцидента весьма актуальны и являются составной частью общей задачи обеспечения безопасности атомных станций.

Экспериментальное и теоретическое изучение разбавления бора активно ведется в ряде стран, включая США, Германию, Францию, Финляндию, Швецию [2 – 6]. Многочисленные эксперименты и расчеты показали, что основной вклад в смешение вносят плохо обтекаемые элементы реактора. Это свидетельствует о том, что характеристики перемешивания существенным образом зависят от особенностей геометрии проточного тракта, что ограничивает общность получаемых результатов заданной экспериментальной установкой (геометрией конкретного реактора). Общепринятая методология исследований состоит в проведении верификации расчетных кодов на экспериментальных данных, полученных на масштабных гидродинамических моделях данного типа реактора, и последующем применении верифицированных кодов для анализа процессов перемешивания теплоносителя с различной концентрацией бора в проточном тракте реактора.

В России экспериментальные исследования разбавления бора в проточном тракте реактора ВВЭР-1000 проводятся в ОКБ «Гидропресс» на модели, имеющей масштаб 1:5 [7]. Экспериментальная установка представляет собой замкнутый контур, включающий циркуляционный насос, модель реактора и модельную петлю. На установке были выполнены эксперименты по моделированию перемешивания чистого конденсата и борированного теплоносителя на входе в активную зону.

В [8] предложена нестационарная одномерная модель для расчета изменения концентрации борной кислоты в воде холодной нитки ГЦТ при ее разбавлении чистой водой до входа в активную зону. Затем эта модель была обобщена на трехмерный случай и проведен расчет перемешивания сосредоточенной массы чистой воды с борированной при прохождении через реактор ВВЭР-1000 [9]. Несмотря на перспективность предложенного подхода, модель не получила дальнейшего развития и применения.

Разработанный в ОКБ «Гидропресс» программный комплекс ТРАП-97 использует точечную модель нейтронной кинетики и одномерную модель расчета параметров теплоносителя в камерах реактора. Для учета пространственного распределения параметров теплоносителя в корпусе реактора и деформации поля тепловыделений в активной зоне были разработаны два специализированных модуля – КАМЕРА и МАЗ-3 [10]. Модуль КАМЕРА предназначен для моделирования процессов перемешивания теплоносителя в напорной камере реактора, модуль МАЗ-3 – для расчета параметров теплоносителя и топлива в активной зоне с использованием трехмерной модели нейтронной кинетики. Процессы межпетлевого перемешивания описываются с помощью введения коэффициентов турбулентной диффузии/температуропроводности, определяемых на основе экспериментальных данных [11]. С помощью модернизированного комплекса ТРАП-97 были проведены расчеты некоторых реактивных аварий, выполнено сопоставление результатов расчета с использованием точечной и пространственной моделей кинетики и показано, что код может использоваться для консервативного анализа.

Применение коммерческой программы STAR-CD для расчета трехмерных полей температур и скоростей в областях, моделирующих нижнюю и сборную камеры реактора ВВЭР в области входного и выходного патрубков, представлено в [12]. Моделировался стационарный режим нормальной эксплуатации и нестационарные режимы подачи в патрубки холодной воды. Рассматривались как чисто гидродинамические, так и сопряженные задачи, в которых температурные поля в твердых элементах

конструкции определялись из уравнений теплопроводности с условиями сопряжения на границах с теплоносителем. В результате решения получены температурные поля и поля скоростей в расчетных объемах, тепловые потоки и коэффициенты теплоотдачи на стенках. Сделаны выводы о необходимости продолжения работ по применению программы STAR-CD для определения температур, скоростей и характеристик теплоотдачи в стационарных и нестационарных режимах.

В Физико-энергетическом институте (г. Обнинск) разрабатывается код PORT3D, предназначенный для расчета трехмерных полей скорости, давления и температуры в контурах и элементах реакторной установки [13]. В коде реализована «объектная модель анизотропного пористого тела», учитывающая специфические параметры наиболее типичных структур проточных трактов реакторных установок. Одним из возможных применений кода PORT3D является моделирование процессов перемешивания теплоносителя с различной концентрацией борной кислоты в проточном тракте реактора.

В [14] предложена методология моделирования переноса сосредоточенных масс теплоносителя с возмущенными значениями температуры и/или концентрации бора в реакторе типа ВВЭР, основанная на трехмерных уравнениях сохранения массы, импульса, энергии и концентрации бора с привлечением модели крупномасштабной турбулентности. Особенностью применяемого подхода является использование неструктурированной расчетной сетки при конечно-разностной аппроксимации уравнений, что позволяет рассматривать гидродинамические процессы в областях со сложной геометрией. С помощью предложенного подхода рассмотрены модельные задачи переноса возмущений концентрации бора и температуры теплоносителя на входном патрубке ВВЭР-640. Отмечено, что необходима верификация кода на экспериментальных данных и дальнейший анализ его возможностей.

В Электрогорском научно-исследовательском центре по безопасности атомных электростанций был разработан программный комплекс BOR3D для расчета нестационарных течений в проточном тракте реактора, который использовался для анализа эксперимента на стенде ОКБ «Гидропресс» по перемешиванию потоков при аварии с внезапным запуском главного циркуляционного насоса [15].

В данной работе излагается описание трехмерного гидродинамического кода REMIX (REactor MIXing), являющегося дальнейшим развитием кода BOR3D. Основное отличие кода REMIX от BOR3D состоит в применении усовершенствованной численной методики, позволяющей уменьшить искажающее влияние численной диффузии. Представлены результаты тестирования кода REMIX, а также приведен пример расчета перемешивания в реакторе ВВЭР-1000.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОДА REMIX

Код REMIX позволяет моделировать нестационарные пространственные течения теплоносителя, содержащего в качестве поглотителя нейтронов растворенную борную кислоту, в проточном тракте реактора ВВЭР-1000 на участке от входных патрубков петель до выхода из активной зоны. Математическая модель кода REMIX основана на трехмерных нестационарных уравнениях движения вязкой несжимаемой жидкости с учетом действия сил плавучести в приближении Буссинеска.

Для описания областей, содержащих мелкомасштабные элементы конструкции, которые не могут быть разрешены на используемых расчетных сетках (для реактора ВВЭР-1000 это перфорированное эллиптическое днище, нижняя камера и собственно активная зона) использован континуальный подход механики многофазных сред, основанный на введении средней доли объема, занятой жидкостью [16]. Фактически, при этом мелкомасштабные элементы конструкции рассматриваются как некото-

рая эквивалентная пористая среда, занимающая часть объема и оказывающая сопротивление течению теплоносителя. Эта среда, в общем случае, является анизотропной, т.е. сила сопротивления потоку за счет трения об элементы конструкции зависит от направления течения.

Определяющие уравнения

Система определяющих уравнений, используемых в модели REMIX, имеет следующий вид:

$$\nabla(\alpha \vec{U}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha \vec{U}}{\partial t} + \nabla(\alpha \vec{U} \vec{U}) = -\frac{\alpha}{\rho} \nabla P + \nabla(\alpha \nu \nabla \vec{U}) - \alpha \frac{C_d}{2} |\vec{U}| \vec{U} + \beta \theta \vec{g}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha \theta}{\partial t} + \nabla(\alpha \theta \vec{U}) = \nabla(\alpha \kappa \nabla \theta), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha C}{\partial t} + \nabla(\alpha \vec{U} C) = \nabla(\alpha D \nabla C), \quad (4)$$

где \vec{U} – скорость, α – доля объема, занятого теплоносителем (эквивалентная пористость среды), P – давление, ρ – плотность жидкости, β – коэффициент объемного расширения жидкости, $\theta = T - T_0$ – избыточная температура (T – локальная температура, T_0 – начальная температура жидкости), \vec{g} – ускорение свободного падения, C – концентрация борной кислоты.

В уравнения (1)–(4) входят эффективные коэффициенты кинематической вязкости $\nu = \nu_l + \nu_t$, температуропроводности $\kappa = \kappa_l + \kappa_t$ и диффузии $D = D_l + D_t$, являющиеся суммой соответствующих ламинарных и турбулентных коэффициентов. Для определения турбулентных коэффициентов переноса используется двухпараметрическая k - ϵ модель турбулентности. Эта модель относится к дифференциальному типу, а основными входящими в нее величинами служат кинетическая энергия турбулентности k и скорость ее диссипации ϵ . Для каждой из указанных величин решается уравнение сохранения с соответствующими источниковыми членами, описывающими скорость генерации турбулентной энергии на градиентах средней скорости и скорость ее объемной диссипации:

$$\frac{\partial \alpha k}{\partial t} + \nabla(\alpha k \vec{U}) = \nabla \left(\frac{\alpha \nu}{\sigma_k} \nabla k \right) + \alpha (G - \epsilon), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \alpha \epsilon}{\partial t} + \nabla(\alpha \epsilon \vec{U}) = \nabla \left(\frac{\alpha \nu}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + \frac{\alpha k}{\epsilon} (C_1 G - C_2 \epsilon), \quad (6)$$

где G – скорость генерации турбулентной энергии, выражаемая через характеристики осредненного течения как

$$G = 2\nu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \nu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] - \nu_t g \beta \frac{\partial \theta}{\partial z}. \quad (7)$$

Последний член в правой части выражения для скорости генерации (7) описывает влияние вертикального градиента плотности на генерацию турбулентной энергии: силы плавучести способствуют генерации турбулентной энергии в тех областях, где температурная стратификация среды неустойчива (более холодная и тяжелая жидкость находится над более горячей и легкой, так что вертикальный градиент избыточной температуры отрицателен) и препятствуют генерации турбулентности в устойчиво стратифицированных областях жидкости (вертикальный градиент температуры положителен).

Коэффициент турбулентной кинематической вязкости ν_t выражается через кинетическую энергию турбулентности k и скорость ее диссипации ε как

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (8)$$

Использовался стандартный набор констант, входящих в уравнения k - ε модели турбулентности: $C_\mu = 0,09$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,93$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$. Турбулентные коэффициенты температуропроводности и диффузии связаны с коэффициентом турбулентной вязкости через числа Прандтля Pr и Шмидта Sc :

$$\kappa_t = \frac{\nu_t}{Pr}, \quad D_t = \frac{\nu_t}{Sc}. \quad (9)$$

В расчетах числа Прандтля и Шмидта полагались равными 0,71, что справедливо для развитых турбулентных течений.

Для описания трения потока об элементы конструкции, которые не могут быть разрешены на расчетной сетке, в уравнение импульса (2) введен квадратичный по скорости источниковый член. Коэффициент C_d описывает силу сопротивления; в анизотропной среде значения коэффициента сопротивления по каждому координатному направлению $C_{d,x}$, $C_{d,y}$, $C_{d,z}$ могут быть разными. Для задания численных значений коэффициентов сопротивления используются данные по гидравлическим сопротивлениям ζ соответствующих элементов конструкции.

В использованной модели влияние элементов конструкции, рассматриваемых как пористая среда, на турбулентность течения не учитывалось. Чтобы учесть такое влияние, необходимо принять во внимание возникновение пограничных слоев на препятствиях, отрывных зон, изменение масштаба турбулентности при прохождении отверстий и т.д. В настоящее время общепринятые подходы к учету такого взаимодействия в рамках k - ε модели турбулентности отсутствуют, поэтому в настоящей работе модель турбулентности была принята в ее стандартном виде. По-видимому, наиболее адекватным подходом будет проведение расчетов на сетках, подробных настолько, чтобы разрешить отдельные элементы конструкции и использовать пристеночные функции на их поверхностях. Такой подход, однако, требует соответствующего увеличения вычислительных ресурсов.

Начальные и граничные условия

Начальные и граничные условия для уравнений (1)–(6) задавались в соответствии с задачей и выбранным сценарием. Для расчетов течения в реакторе при внезапном старте главного циркуляционного насоса в начальный момент времени задавалась нулевая скорость течения, а также постоянные по объему штатные значения температуры и концентрации. В приведенных ниже тестовых расчетах (стационарные течения в трубе и за уступом) для ускорения сходимости задавались начальные поля скорости с постоянным по продольному сечению расходом жидкости (например, для трубы – постоянная продольная скорость, равная скорости во входном сечении).

На тех границах расчетной области, где задавался расход жидкости, граничные условия для скорости $U_{in}(t)$ определялись по этому расходу. Если же на участке границы происходит свободное истечение, то для компонент скорости задавался нулевой градиент по нормали к границе.

Если скорость на границе направлена внутрь расчетной области, то на этом участке границы задаются входные значения для концентрации C_{in} и температуры θ_{in} . Кроме того, входные значения кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации определяются соотношениями

$$k_{in} = \eta U_{in}^2, \quad \varepsilon_{in} = \frac{C_\mu k_{in}^{3/2}}{\Lambda}, \quad (10)$$

где $\eta = 2,5 \cdot 10^{-3}$ – степень турбулентности, $\Lambda = 0,05D$ – масштаб турбулентности, D – диаметр входного патрубка или поперечный размер канала (в задаче о течении за обратным уступом). На тех же участках, где поток направлен из расчетной области, задаются нулевые градиенты всех скалярных величин.

На твердых стенках задавались нулевые градиенты концентрации и температуры (адиабатические непроницаемые стенки). При этом для определения граничных значений для турбулентных параметров k , ε и турбулентной вязкости ν использовались пристеночные функции, задающие логарифмический закон изменения скорости в пристеночном погранслое, который не может быть разрешен на используемой расчетной сетке. Именно, для ближайшего к твердой стенке узла сетки, находящегося от нее на расстоянии y_p , значения скорости U_p , турбулентной кинетической энергии k_p , скорости ее диссипации ε_p и напряжения на стенке τ_w считались связанными соотношениями равновесного турбулентного погранслоя:

$$\frac{U_p}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{E y_p}{y_*} \right), \quad U_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}, \quad y_* = \frac{U_*}{\nu_l}, \quad \varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{\kappa y_p}, \quad (11)$$

где $\kappa = 0,41$ – константа Кармана, $E = 9,8$ – эмпирическая константа. Соответствующей модификации в пристеночных узлах подвергалась и скорость генерации турбулентной энергии (7):

$$G_p = \tau_w \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_p, \quad (12)$$

где производная скорости по нормали к поверхности в (12) должна вычисляться из логарифмического закона стенки (11). Значения эффективной вязкости на стенке находились из соотношения $\rho \nu_w U_p / y_p = \tau_w$. Отметим, что пристеночные функции (11), (12) широко используются при расчете турбулентных течений на основе моделей турбулентности при высоких числах Рейнольдса, к которым относится и стандартная k – ε модель турбулентности (5)–(9), применяемая в модели REMIX.

ЧИСЛЕННАЯ МЕТОДИКА КОДА REMIX

Система определяющих уравнений (1)–(6) с начальными и граничными условиями решается численно с использованием неструктурированных сеток с шестигранными ячейками, позволяющих моделировать течения в областях сложной формы. Построение сеток осуществлялось при помощи входящего в состав программного комплекса REMIX специального модуля. Для построения сетки область течения сначала разбивалась на более простые подобласти, в которых строились структурированные (т.е. имеющие логическую структуру, подобную декартовой сетке, содержащей $N \times M \times K$ ячеек по трем координатным направлениям) сеточные блоки. После того как вся расчетная область покрывалась необходимым количеством сеточных блоков

(каждый из которых в общем случае содержит различное число ячеек), производилась их глобальная перенумерация и объединение в единую неструктурированную сетку, используемую при интегрировании уравнений.

Пространственно-временная дискретизация уравнений производится методом конечных объемов, при этом все переменные (компоненты скорости, давление, концентрация, температура) определяются в центрах контрольных объемов. Все уравнения решаются в декартовой системе координат, т.е. без введения криволинейных координат, связанных с поверхностью тела, что делает метод значительно более гибким в применении к областям сложной геометрии. Конечно-объемная аппроксимация уравнений переноса (2)–(6) осуществляется путем их интегрирования по ячейке сетки и последующей замены объемного интеграла от конвективных и диффузионных членов поверхностными интегралами от соответствующих потоков по всем граням ячейки. При построении сетки поверхности, где происходит резкое изменение пористости α , совмещаются с гранями ячеек, поэтому при таком подходе не возникает проблем с дифференцированием разрывной функции.

При аппроксимации конвективных и диффузионных потоков через границы ячеек требуется определить градиент искомой функции в центре ячейки $\nabla\phi_c$ через значения функции в центрах окружающих ее ячеек. Для этого используется линейное представление искомой функции ϕ в окрестности центра ячейки с радиус-вектором \vec{r}_c :

$$\phi(\vec{r}) = \phi(\vec{r}_0) + \nabla\phi_c (\vec{r} - \vec{r}_c). \quad (10)$$

Подставляя в (10) значения функции $\phi(\vec{r}_i)$ во всех центрах окружающих ячеек с радиус-векторами \vec{r}_i , получим систему линейных уравнений относительно компонент вектора градиента $\nabla\phi_c$. В общем случае эта система получается переопределенной, поэтому для ее решения применяется метод наименьших квадратов. Данный подход применим к ячейкам произвольной формы [17], что позволит в дальнейшем модифицировать код REMIX на случай гибридных (т.е. содержащих помимо шестигранных, тетраэдрических, призматических и пирамидальных ячеек) сеток.

Для уменьшения влияния схемной вязкости конвективные слагаемые аппроксимируются схемой, являющейся обобщением известной схемы TVD на случай неструктурированных сеток [18]. Схема TVD обеспечивает второй порядок точности по пространству в областях плавного изменения переменных, тогда как вблизи зон резкого изменения функций порядок аппроксимации адаптивно понижается до первого, обеспечивая монотонность решения. Дискретизация производных по времени осуществляется методом дробных шагов с весовыми коэффициентами, обеспечивающими второй порядок точности по времени.

Процедура совместного решения уравнений (1)–(6) аналогична известному методу SIMPLE [19]: на каждом шаге по времени осуществляются глобальные итерации, в ходе которых сначала определяются предварительные поля скорости с использованием давления с предыдущей итерации, после чего решается эллиптическое уравнение для коррекции давления, восстанавливающей бездивергентное поле скорости (1).

Важным элементом численной методики является выбор эффективной итерационной процедуры решения матричных уравнений, возникающих при дискретизации дифференциальных уравнений сохранения импульса, концентрации, а также эллиптического уравнения для коррекции давления. Решение этих уравнений осуществляется известным методом PGMRES, обеспечивающим высокую скорость сходимости при решении уравнений с несимметричными матрицами.

Программная реализация описанного конечно-объемного метода в коде REMIX осуществлялась на языке FORTRAN 90. Расчеты, представленные в настоящей работе,

проводились версиями кода, работающими под операционными системами Linux и Windows. Дальнейшее совершенствование программного комплекса REMIX будет осуществляться путем его распараллеливания, что позволит проводить расчеты на многопроцессорных платформах с использованием значительно более подробных сеток.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОДА REMIX

Тестирование кода REMIX осуществлялось путем расчета ряда течений, для которых имеются надежные экспериментальные и теоретические данные (течение в трубе, пограничный слой на плоской пластине, пристеночная струя и т.п.). В этих расчетах моделировались течения в отсутствие загромождения ($\alpha = 1$). Для проверки правильности работы модуля, описывающего силы сопротивления в пористом теле, проводились расчеты течения в трубе с пористыми вставками различной длины; полученные перепады давления сопоставлялись с вычисленными по формуле $\Delta P = \zeta \rho U_0^2 / 2$, где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления, используемый для вычисления коэффициента C_d в (2).

Ниже в качестве примера приведены результаты некоторых верификационных расчетов.

Течение жидкости в круглой трубе

Рассматривается стационарное течение жидкости в трубе, диаметром D и длиной L ($L/D = 25$). На входе в трубу задается равномерная по поперечному сечению входная скорость, равная U_0 , на стенках трубы используются условия прилипания. Проводились расчеты ламинарного и турбулентного течений при различных числах Рейнольдса $Re = U_0 D / \nu_l$, где ν_l – ламинарная кинематическая вязкость жидкости.

Течение в ламинарном режиме рассчитывалось при значениях числа Рейнольдса $Re = 10, 50$ и 100 . Во всех случаях у выходного торца трубы были получены практически одинаковые параболические профили скорости, хорошо совпадающие с известным аналитическим решением Пуайзеля.

Расчеты турбулентного течения жидкости в трубе выполнялись для параметров экспериментов, проводившихся на установке Superpipe в Принстонском университете США [20]. Сравнивались установившиеся профили скорости у стенки трубы и по всему сечению. На рис. 1 показана зависимость продольной скорости от расстояния до стенки трубы, полученная при $Re = 3,1577 \cdot 10^5$. Используются принятые для пограничных слоев безразмерные координаты $U^+ = U/u_*$, $Y^+ = y u_* / \nu_l$, где $u_* = (\tau_w / \rho)^{1/2}$ – скорость трения, вычисляемая по напряжению трения τ_w на стенке трубы. Видно хорошее совпадение результатов расчетов и измеренных данных.

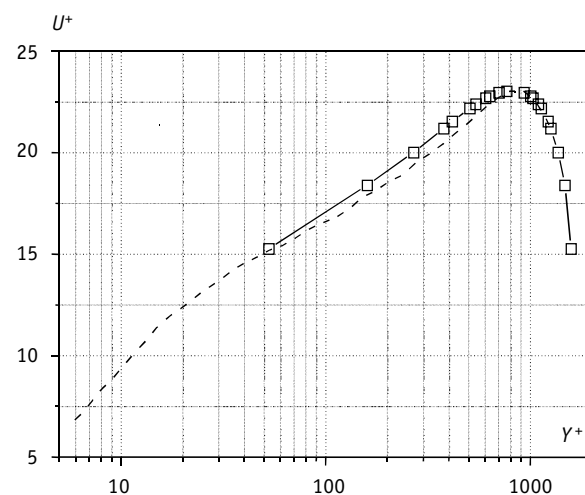


Рис. 1. Зависимость скорости от расстояния до стенки трубы в безразмерных координатах: — — эксперимент; \square — REMIX

Видно хорошее совпадение результатов расчетов и измеренных данных.

Течение за уступом

В качестве второй задачи рассматривается стационарное течение жидкости в области, имеющей обратный уступ высотой H . На входе в расчетную область задается входная скорость, равная U_0 , на твердых поверхностях

задаются условия прилипания. За уступом наблюдается отрыв потока и формирование области рециркуляции, дальнейшее присоединение потока к нижней границе происходит на некотором расстоянии L , которое может быть определено по изменению знака горизонтальной скорости у поверхности с отрицательного (в вихре) на положительный. Безразмерная длина присоединения потока L/H является параметром, по которому результаты расчета сравнивались с экспериментами и расчетными данными других авторов (см., например, [21]).

Для оценки качества решений, получаемых при использовании на неструктурированных сетках схем высокого порядка точности, кодом REMIX было выполнено несколько расчетов для ламинарного режима течения при различных числах Рейнольдса. Зависимость длины зоны рециркуляции L/H от числа Рейнольдса, рассчитанная кодами REMIX и BOR3D, а также результаты экспериментального исследования [21] показаны на рис. 2. Как видно, применение TVD-схемы, используемой в коде REMIX, улучшает качество моделирования (в коде BOR3D конвективные члены аппроксимировались с первым порядком точности, что приводило к значительной схемной вязкости).

Для турбулентного режима течения при расчете кодом REMIX было получено, что длина присоединения потока практически не зависит от числа Рейнольдса и составляет $L/H = 6$. Это несколько меньше, чем экспериментальное значение 7,5, однако такой же результат был получен другими авторами в численных расчетах на основе $k-\epsilon$ модели турбулентности.

РАСЧЕТ КОДОМ REMIX ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РЕАКТОРЕ ВВЭР-1000

В качестве примера приложения кода REMIX для расчета перемешивания борированного и деборированного теплоносителя в ходе реальной аварии на АЭС с ВВЭР-1000 был рассмотрен сценарий, связанный с образованием пробки деборированной воды в одном из гидрозатворов и последующим внезапным пуском главного циркуляционного насоса. Для определения граничных условий для кода REMIX во входных патрубках (расход теплоносителя и концентрация бора) был выполнен расчет этой аварии с помощью одномерного теплогидравлического кода RELAP5 (рис. 3).

В рассматриваемой задаче использовалась расчетная неструктурированная сетка, содержащая 59348 ячеек, показанная на рис. 4. Размеры сетки определялись имеющимися вычислительными ресурсами.

После поступления деборированного теплоносителя во входной патрубок первой петли ($t = 14,5$ с) происходит своего рода расщепление потоков теплоносителя, деборированная пробка устремляется влево и вправо от входного патрубка, смыкаясь на противоположной от входного патрубка стороне опускающего канала и продвигаясь вниз в первую очередь вдоль противоположной стенки. Движение теплоносителя сопровождается сильной закруткой потока и образованием сильных вихревых течений.

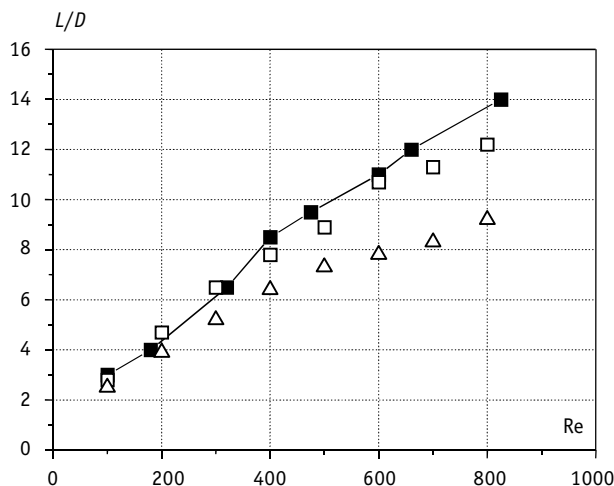


Рис.2. Зависимость параметра длины рециркуляционной зоны от числа Рейнольдса при ламинарном течении за уступом: —■— эксперимент; □ REMIX; △ BOR3D

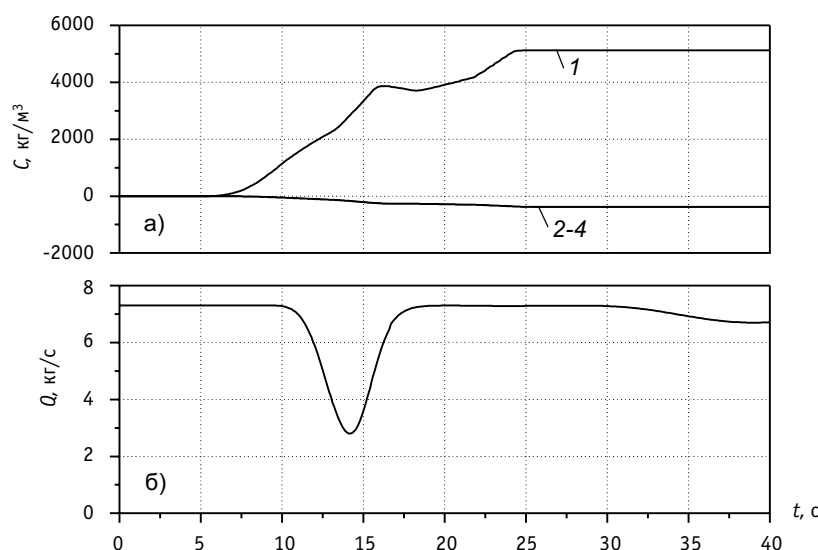


Рис.3. Граничные условия во входных патрубках, полученные в расчете кодом RELAP5: а) массовый расход теплоносителя по петлям 1–4; б) концентрация бора на входе в патрубок первой петли

ний на боковых (по отношению к входному патрубку) сторонах реактора. Эти вихри хорошо видны на рис. 5, где представлена картина течения в момент времени $t = 16$ с. Отметим, что при расчетах кодом BOR3D из-за сильного влияния схемной вязкости наблюдалась качественно иная картина течения: боковые вихри были выражены значительно слабее, а вертикальное продвижение пробки деборированного теплоносителя наблюдалось в основном со стороны входного патрубка.

К моменту времени $t = 18,5$ с во входном патрубке первой петли начинается подъем концентрации бора, поэтому минимум концентрации в «пробке» достигается внутри

реактора. В момент $t = 25,1$ с пробка достигает нижней камеры реактора и начинает проникать в активную зону. По-прежнему, из-за упоминавшегося выше расщепления потока наблюдаются два пятна пониженной концентрации, которые переносятся вверх по течению ($t = 23,2$ с; $25,1$ с). В дальнейшем реактор заполняется теплоносителем с высокой концентрацией бора. На рис. 6 (а-г) показаны пространственные распределения концентрации бора в реакторе ВВЭР-1000, полученные в ходе расчетов трехмерным кодом REMIX.

На рис. 7 изображены временные зависимости концентрации бора во входном патрубке C_{in} , а также средней по входному сечению активной зоны кон-

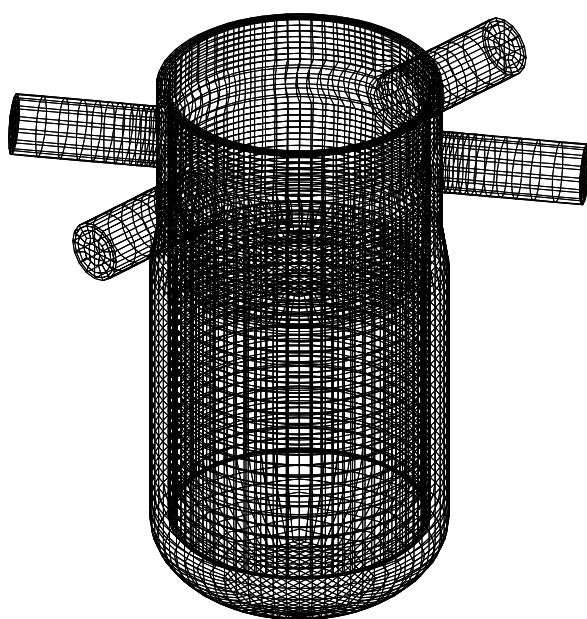


Рис.4. Расчетная сетка для реактора ВВЭР-1000

центрация бора C_{av} и минимальной в данный момент концентрации во входном сечении C_{min} . Из представленных данных видно, что по мере продвижения пробки в реакторе происходит перемешивание с борированным теплоносителем. Если на входе в реактор минимальная концентрация бора составляет $2,8 \text{ кг/м}^3$, то на входе в активную зону минимальная средняя концентрация C_{av} , достигаемая за время прохождения пробки деборированного теплоносителя, увеличивается почти в два раза и составля-

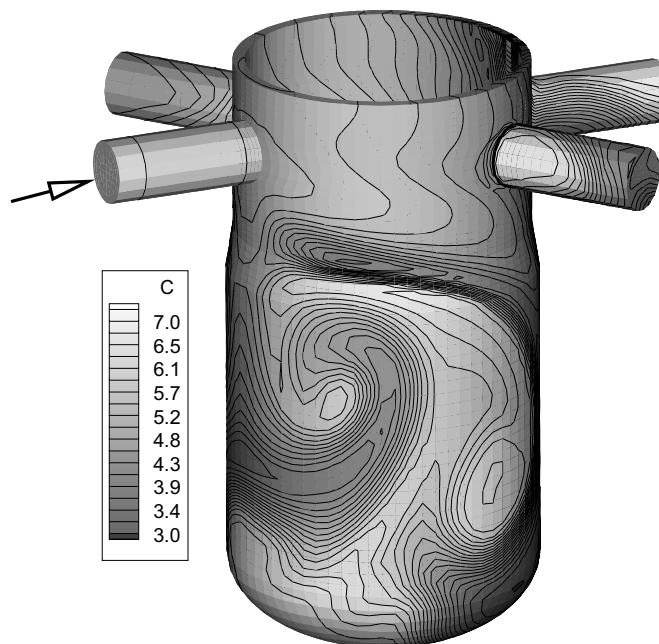


Рис.5. Распределение концентрации бора в реакторе ВВЭР-1000 в момент времени $t = 16 \text{ с}$ (стрелкой показан входной патрубок)

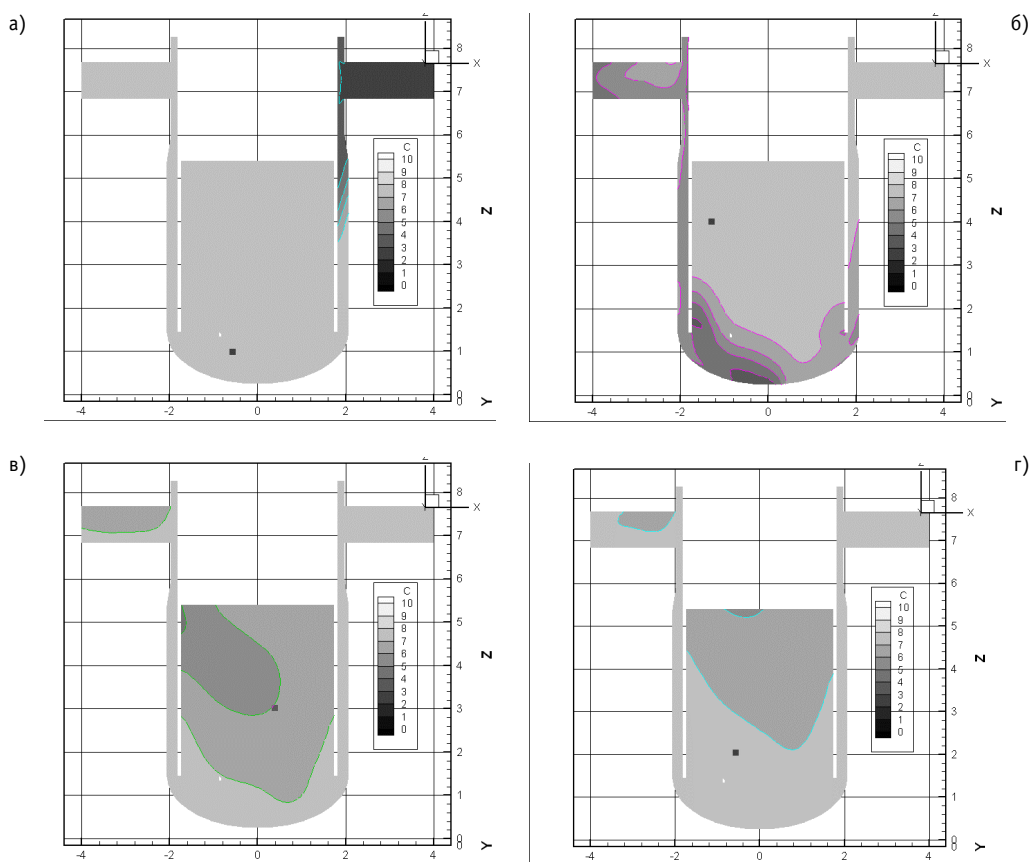


Рис. 6. Картина движения пробки деборированного теплоносителя в проточном тракте реактора ВВЭР-1000: а) $t = 14,5 \text{ с}$, б) $t = 18,5 \text{ с}$, в) $t = 23,2 \text{ с}$, г) $t = 25,1 \text{ с}$

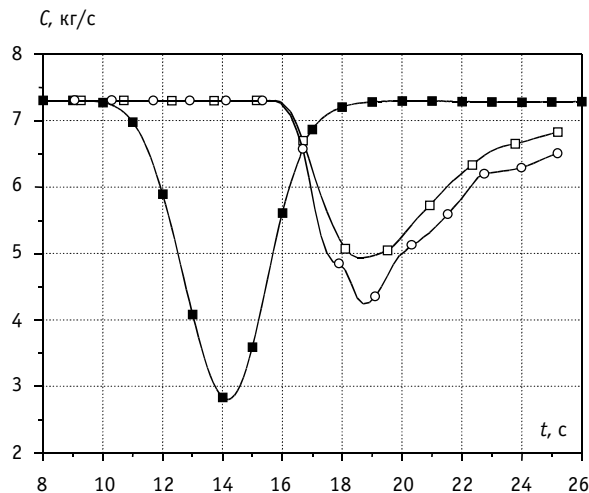


Рис. 7. Концентрация бора во входном патрубке C_{in} (■); минимальная на входе в активную зону C_{min} (○) и средняя по входному сечению активной зоны C_{av} (□)

ет $C_{min} = 5,0 \text{ кг/м}^3$, т.е. максимальное уменьшение средней концентрации бора по сравнению с нормальным уровнем $C_0 = 7,3 \text{ кг/м}^3$, составляет 31%. В отдельных точках на входе в активную зону уменьшение концентрации достигает $4,2 \text{ кг/м}^3$ (относительное уменьшение – 38%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кодом REMIX выполнены тестовые расчеты для задачи о течении жидкости в трубе и за уступом. Получено хорошее совпадение с соответствующими аналитическими решениями и экспериментальными данными. Показано, что усовершенствование чис-

ленной методики в коде REMIX позволило улучшить качество моделирования.

С использованием программного комплекса REMIX проведены расчеты течения теплоносителя и распространения пробки неборированной воды в проточном тракте реактора ВВЭР-1000. Получено, что максимальное относительное уменьшение средней концентрации бора по сравнению с нормальным уровнем составляет 31%. В отдельных точках на входе в активную зону относительное уменьшение концентрации достигает 38%.

Литература

1. Нигматулин И.Н., Нигматулин Б.И. Ядерные энергетические установки. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 168.
2. Alvarez D., Martin A., Scheider J.P. Boron mixing transients in a 900 MW PWR vessel for a reactor start-up operation // 4th Int. Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety. – Taipei, 1994. – P.56-63.
3. Gango P. Numerical boron mixing studies for Loviisa nuclear power plant // Nucl. Eng. Design. – 1997. – V.197. – P. 239–254.
4. Cheng H.W., Johnson E., Sehgal B.R. Analysis of rapid boron dilution consequences for PWRs with ARROTA code // Int. Conf. on Physics of Nuclear Science and Technology. – Oct. 5-8, 1998, Long Island, New York.
5. Gavelli F., Kiger K. High-resolution boron dilution measurements using laser induced fluorescence (LIF) // Nucl. Eng. Design. – 2000. – V.195. – P. 13-25.
6. Kliem S., Prasser H.-M., Grunwald G. et al. ROCOM experiments on the coolant mixing in the upper plenum of a PWR // Proceedings of Annual Meeting on Nuclear Technology. – Germany, 2003. – P. 73-76.
7. Ульяновский В.Н., Безруков Ю.А., Логвинов С.А., Салий Л.А. Исследование перемешивания потоков с разной концентрацией бора на входе в активную зону/Труды Международной конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР» (Обнинск, 26-29 мая). – Т.1. – С. 37-46.
8. Зайчик Л.И., Нигматулин Б.И., Скибин А.П., Хасанов Р.Х., Петухов С.М. Нестационарная одномерная модель для анализа неоднородности разбавления борной кислоты в первом контуре реактора на воде под высоким давлением//Атомная энергия. – 1997. – Т. 83. – С. 305-307.
9. Нигматулин Б.И., Зайчик Л.И., Скибин А.П., Хасанов Р.Х., Югов В.П. Моделирование разбавления бора при реактивных инцидентах в ВВЭР/Труды международной конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР» (Обнинск, 26-29 мая). – Т.1. – С. 27-36.

10. Алехин Г.В., Беляев Ю.В., Быков М.А., Зайцев С.И., Кинаш П.М., Надинский Ю.Н. Модернизация программного комплекса ТРАП-97 для расчета пространственного распределения параметров в реакторе и активной зоне//Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. – 2002. – Вып. 1 «Реакторные установки с ВВЭР». – С. 71-86.
11. Алехин Г.В., Мальцев Е.Ю., Подшибякин А.К., Зайцев С.И., Воронков А.В., Филь Н.С. Исследование межпетлевого перемешивания в реакторе типа ВВЭР//Труды Международной конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР» (Обнинск, 26-29 мая). – Т.1. – С. 465-477.
12. Федоров Э.М., Левин Е.И., Драгунов Ю.Г. Трехмерная гидродинамика и теплообмен в узлах реактора ВВЭР//Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. – 2002. – Вып. 1 «Реакторные установки с ВВЭР». – С. 87-99.
13. Кумаев В.Я., Веремеев А.А. Применение расчетного кода PORT3D для моделирования трехмерных явлений течения и теплообмена в элементах и контурах РУ/Труды 2-ой Всероссийской научно-технической конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, 19-23 ноября 2001 г.).
14. Кобаров В.В. Математическое моделирование массопереноса в реакторе на неструктурированной расчетной сетке//Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2002. – Вып. 3. – С. 3-10.
15. Безруков Ю.А., Логвинов С.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Исследование разбавления бора в реакторе ВВЭР-1000//Теплоэнергетика. – 2002. – № 5. – С. 22-26.
16. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987.
17. Muzaferija S., Gosman D. Finite-volume CFD procedure and adaptive error control strategy for grids of arbitrary topology//J. Comput. Physics. – 1997. – V. 138. – P. 766–787.
18. Darwish M.S, Moukalled F. TVD-schemes for unstructured grids//International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2003. – V.46. – P. 599-611.
19. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – С. 152.
20. <http://www.princeton.edu/~gasdyn/Facilities/Facilities.html#SuperPipe>
21. Armaly B.F., Durst F., Pereira J.C.F. and Shonung B. Experimental and theoretical investigations of backward-facing step flow//J. Fluid Mech. – 1983. – V. 127. – P. 473–496.

Поступила в редакцию 11.04.2005

УДК 539.173.12

Experimental Cross-Sections of ^{238}U Fission Induced by Intermediate Energy Protons \A.Yu. Doroshenko, V.V. Ketlerov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 12 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 42 titles.

It was made the review of experiments on determining cross-section of ^{238}U fission induced by protons with energies from 200 to 1000 MeV. Experimental methods used in measurements were analyzed. Estimation of fragment fission registration effectiveness was provided on basis of the experiments description and with the help of newer solid track detectors characteristics measurements. As a result of conducted analysis of the effectiveness, we have corrected cross-section of the ^{238}U fission induced by protons in the energy region of interest.

УДК 621.039.56

Numerical Modeling of Coolant Mixing with REMIX Code \V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, A.V. Petrosyan, S.E. Yakush; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 13 pages, 7 illustrations. – References, 21 titles.

REMIX (REactor MIXing) code for numerical analysis of coolant mixing is developed in Electrogorsk Research and Engineering Centre on NPP Safety. In this paper the mathematical model and numerical scheme of REMIX code is described. REMIX code is verified on two test problems: laminar/turbulent pipe flow, and flow behind a backward-facing step. The REMIX code is applied to calculation of boron mixing in VVER-1000 NPP reactor after start of main coolant pump. The calculations show that the decrease in the average boron concentration at the core inlet reached 31%, while local concentrations dropped by 38%.

УДК 621.039.524

Physical Statutes of Reactor VVER-1000 Analyze and Management of Emergency Situations \A.N. Shkarovskii, V.I. Aksekov, N.P. Serdun'; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 9 pages, 4 illustrations. – References, 8 titles.

Physical categories of nuclear power installation (NPI) determined by physical process which pass in elements of it equipment are suggested and founded. It is shown that combination (configuration) of physical categories determines physical conditions of NPI. Methodic for analysis of physical categories for determination of physical conditions is given. Analysis of different physical conditions of NPI is conducted, methodic of decision acceptance by operator on management of emergency situation (in support of safety system) with the purpose of consistent conversion to the final (safety) condition is developed.

УДК 621.039.526: 621.039.546.8

Experimental Research of Hydraulic Parameters of Modified Fuel Assembly for RBMK-1000 Reactor \E.F. Avdeev, I.A. Chusov, V.A. Levchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 12 pages, 11 illustrations, 1 table. – References, 5 titles.

Main results of experimental research on hydraulic parameters of the RBMK-1000 modified fuel assembly are presented. Data on full friction for TC with fuel assembly and local friction of the inlet and outlet of fuel assembly taking into account TC diameter change are given. Influence of change in dissector longitudinal direction relative to rod bundle on the hydraulic parameters of inlet, outlet, and of the bundle at whole has been investigated. Results of local friction measurements for the single grid spacer of the typical fuel assembly are also given.

УДК 621.039.526

Influence of Track Geometry Deviation in Two-Loop Hydraulic Model on Total Hydraulic Friction Uncertainties \Yu.S. Yur'ev, Yu.D. Levchenko, I.A. Chusov, A.A. Kazantsev, I.N. Leonov; Editorial board of