

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ВВЭР С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ТРЕТОН»

Н.Н. Давиденко, А.С. Корсун, Ю.А. Маслов, И.Г. Меринов,
В.С. Харитонов, Б.Е. Шумский

Московский инженерно-физический институт (государственный университет)



Проведено усовершенствование модели пористого тела для описания теплогидравлических процессов в активной зоне реактора ВВЭР с бесчехловыми ТВС. Создан программный комплекс ТРЕТОН для моделирования нестационарных трехмерных тепловых и гидродинамических процессов. Выполнено тестирование теплогидравлического модуля ТРЕТОН путем сопоставления результатов расчетов с аналитическим решением модельной задачи теплообмена. Проведено сравнение результатов серии расчетов полей температур и скоростей теплоносителя для номинального режима работы активной зоны ВВЭР-1000 с независимыми расчетами по аттестованной программе NOSTRA.

Ключевые слова: активная зона, анизотропия, ВВЭР, гидродинамика, модель пористого тела, реактор, ТВС, тепломассоперенос, трехмерное моделирование, ТРЕТОН.

Key words: 3D modeling, anisotropy, core, fuel assembly, heat-mass transfer, hydrodynamic, porous model, reactor, TRETON, VVER.

ВВЕДЕНИЕ

Активная зона ВВЭР-1000 с бесчехловыми тепловыделяющими сборками (ТВС) является существенно анизотропной структурой, в которой трехмерный характер массо- и теплопереноса проявляется даже в номинальных режимах нормальной эксплуатации, например, при работе реактора при пониженных расходах на полном числе ГЦН. Поэтому для корректного описания пространственно распределенных процессов гидродинамики и теплообмена в активной зоне необходимо применение методов моделирования турбулентных течений применительно к структуре типа пучков стержней. Следует отметить, что возможности использования для этой цели так называемых поканальных методик ограничены, когда меж-

канальный обмен играет роль относительно малых поправок. Что касается расчетных методов, основанных на решении трехмерных уравнений Навье-Стокса, то их применение сопряжено с необходимостью использования большого числа расчетных элементов. Дополнительной проблемой в этом случае является отсутствие моделей турбулентности для описания переноса в областях с сильной турбулизацией потока.

В работе проблема построения алгоритма расчета трехмерных теплогидравлических процессов в активной зоне с бесчехловыми ТВС решается на основе развития модели пористого тела. Применительно к моделированию сложных турбулентных течений при обтекании потоком теплоносителя модель пористого тела была существенно доработана в части описания анизотропных свойств переноса импульса и тепла. Были определены коэффициенты эффективной теплопроводности и вязкости, а также уточнены формулировки граничных условий.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ВВЭР-1000

Для описания трехмерных тепловых и гидродинамических процессов в активной зоне ВВЭР-1000 с бесчехловыми ТВС использовалась многоуровневая модель. В этой модели наряду с расчетом полей температур, скорости и давления во всей активной зоне в приближении пористого тела [1] (уровень «активная зона») одновременно в отдельных частях активной зоны производится расчет локальных значений (уровень «ячейка-твэл») и осредненных по сечению ячеек температур, скорости и давления (уровень «сборка твэлов»). На локальном уровне рассчитывается нестационарное распределение температур по радиусу тепловыделяющих элементов в каждой узловой точке по объему активной зоны. Решение задач более детального уровня позволяет определить необходимые эффективные коэффициенты переноса импульса и энергии и замкнуть систему уравнений сохранения в пористом теле. Многоуровневый расчет позволяет корректно учитывать изменение эффективных коэффициентов во времени.

Основные уравнения модели теплогидравлики активной зоны в приближении пористого тела

В приближении пористого тела [1] активная зона представляет собой многокомпонентную среду. Количество компонент в зависимости от уровня детализации задачи может быть различным. В описываемом варианте активная зона состоит из следующих компонент: однофазный теплоноситель; тепловыделяющие элементы нескольких типов ($k = 1, \dots, type$); конструкционные элементы. Представительный объем осреднения V

$$V = V_f + \sum_{k=1}^{type} V_k + V_c, \quad (1)$$

где V_f , V_k , V_c – части объема V , приходящиеся на теплоноситель, твэлы и конструкционные элементы соответственно.

Поскольку доля конструкционных элементов в зоне невелика и плотность энерговыделения в них мала, то распределение по активной зоне средней температуры конструкционных элементов T_c принимается равным распределению средней температуры теплоносителя T_f .

Уравнения сохранения массы, импульса, энергии и состояния теплоносителя в модели пористого тела имеют следующий вид:

$$\frac{\partial(\epsilon_f \rho_f)}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\epsilon_f \rho_f \vec{u}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\epsilon_f \rho_f u_i)}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\epsilon_f \rho_f \vec{u} u_i) = (\operatorname{div} \vec{\sigma})_i - F_i - \epsilon_f (\operatorname{grad} P, \vec{e}_i) + \epsilon_f \rho_f g_i, \quad (3)$$

$$c_f \left(\frac{\partial(\epsilon_f \rho_f T_f)}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\epsilon_f \rho_f \vec{u} T_f) \right) = -\operatorname{div}(\vec{q}) + q_v, \quad (4)$$

$$\rho_f = \rho_f(p, T_f), \quad (5)$$

где $\epsilon_f = V_f/V$ – пористость по теплоносителю; τ – время; ρ_f – плотность теплоносителя; \vec{u} – вектор скорости теплоносителя; $\vec{\sigma}$ – тензор напряжений, содержащий эффективную вязкость теплоносителя μ_{eff} ; $F_i = K_i \rho_f |e\vec{u}| u_i$ – i -ая проекция силы сопротивления потоку жидкости; p – давление теплоносителя; \vec{e} – единичный направляющий вектор i -ой координаты; g_i – i -ая проекция ускорения свободного падения; c_f – теплоемкость теплоносителя; \vec{q} – вектор теплового потока, содержащий эффективную теплопроводность теплоносителя λ_{eff} ; q_v – эффективная плотность энерговыделения в теплоносителе.

В уравнениях (2)–(5) скорости и температуры теплоносителя определены как истинно-средние, а тепловой поток и компоненты тензора напряжений – как средние по объему.

Эффективная плотность энерговыделения в теплоносителе обусловлена теплоотдачей с поверхности тепловыделяющих элементов и равна

$$q_v \equiv \sum_{k=1}^{type} N_k \alpha_{v_k} (T_k - T_f), \quad (6)$$

где N_k – число твэлов k -го типа в единице объема активной зоны; T_k – средняя температура твэлов k -го типа; $\alpha_{v_k} = S_k / (V \cdot (S_k + 1/\alpha_k))$ – объемный коэффициент теплопередачи от твэлов k -го типа к теплоносителю; S_k – площадь поверхности твэла k -го типа; α_k – локальный коэффициент теплоотдачи от твэлов k -го типа к теплоносителю.

Уравнения сохранения энергии для твэлов в модели пористого тела имеют вид

$$c_k \frac{\partial(\epsilon_k \rho_k T_k)}{\partial \tau} = -\alpha_{v_k} (T_k - T_f) + \epsilon_k q_{v_k}, \quad (7)$$

где $(\rho c)_k$ среднее значение теплоемкости твэла k -го типа; $V_k = V_{fuel} + V_{clad}$ – объемы твэла, топлива и оболочки соответственно; $\epsilon_k = V_k/V$ – пористость по твэлам k -го типа; q_{v_k} – плотность энерговыделения в твэлах k -го типа, которая определяется в результате нейтронно-физического расчета.

Уравнения (7) получены путем осреднения по объему твэла V_k уравнения теплопроводности. Такое представление позволяет объединить уравнения для средних температур топлива и оболочки в одно. Для обратного преобразования средневзвешенной температуры T_k в средние температуры топлива или оболочки T_{kj} , необходимые для пересчета нейтронно-физических констант по их температурным зависимостям, используется соотношение

$$T_{kj} = T_f + \frac{R_{kj} + 1/\alpha_k}{R_k + 1/\alpha_k} (T_k - T_f), \quad (8)$$

где R_{kj} – термическое сопротивление между поверхностью и точкой со средней

температурой топлива или оболочки твэла k -го типа; R_k – термическое сопротивление между поверхностью и точкой со средней с весом ρc температурой твэла k -го типа.

Для определения термических сопротивлений R_{kj} для каждого контрольного объема решаются одномерные уравнения теплопроводности с граничными условиями третьего рода:

$$\left[(\rho c) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_v \right]_k. \quad (9)$$

Замыкающие соотношения модели теплогидравлики активной зоны

Система уравнений (2)–(5), моделирующая трехмерные процессы тепломассопереноса в активной зоне ВВЭР-1000 в приближении пористого тела, содержит коэффициенты эффективной теплопроводности λ_{eff} , эффективной вязкости μ_{eff} и коэффициент сопротивления потоку жидкости K . Применительно к активной зоне реактора типа ВВЭР, содержащей сборки стержневых твэлов без чехлов, когда существенно проявляются трехмерность полей скоростей и температур в зоне и анизотропия переноса тепла и импульса, были выполнены специальные исследования и определены замыкающие соотношения модели теплогидравлики.

Эффективная теплопроводность теплоносителя. Эффективный перенос тепла в движущемся теплоносителе определяется как суперпозиция тепловых потоков, обусловленных молекулярной и турбулентной теплопроводностью жидкости, отклонениями скоростей потока теплоносителя и теплопереносом через твэлы. Поток отклонения обусловлен мелкомасштабным (с масштабом, меньшим размеров объема осреднения V) движением жидкости, которое стало «невидимым» в результате локального осреднения по объему. Из-за отсутствия контакта между твэлами глобальный поток тепла в поперечном направлении отсутствует, но перетечки тепла через твэлы «от жидкости к жидкости» существуют и определяются неравномерностью в распределении температуры жидкости, обтекающей твэл. Каждой составляющей теплового потока можно поставить в соответствие коэффициент эффективной теплопроводности, при этом полная эффективная теплопроводность теплоносителя складывается из теплопроводностей, обусловленных различными механизмами переноса тепла:

$$\bar{\lambda} = \lambda^{мол} + \lambda^{тур} + \lambda^{отк} + \lambda^{тв}. \quad (10)$$

В силу существенной анизотропии среды все коэффициенты теплопроводности в (10) являются тензорными величинами. В зависимости от характера анизотропии составляющие коэффициента эффективной теплопроводности в (10) можно разбить на две группы. Первую группу составляют коэффициенты, обусловленные молекулярной теплопроводностью жидкости и теплопереносом через твэлы, вторую – коэффициенты, связанные с теплопереносом за счет турбулентной теплопроводности и за счет отклонения скоростей.

Главными осями анизотропии тензоров теплопроводности первой группы являются направления вдоль и поперек сборки твэлов в активной зоне. В качестве главных компонент тензора в первом приближении можно использовать эффективные коэффициенты теплопроводности в направлениях вдоль и поперек сборки твэлов $\lambda_{||}$ и λ_{\perp} .

Коэффициенты второй группы, которые учитывают турбулентный перенос и перенос скоростями отклонения ($\lambda^{дин} = \lambda^{тур} + \lambda^{отк}$) обладают более сложной структурой анизотропии:

$$\begin{aligned}\lambda_{zz} &= \lambda_{\parallel}^{\text{мол}} + \lambda_{\parallel}^{\text{тв}} + \lambda_{111}^{\text{дин}} U_z^2 + \lambda_{010}^{\text{дин}} (U_y^2 + U_x^2), \\ \lambda_{yy} &= \lambda_{\perp}^{\text{мол}} + \lambda_{\perp}^{\text{тв}} + \lambda_{100}^{\text{дин}} U_z^2 + \lambda_{000}^{\text{дин}} (U_y^2 + U_x^2), \\ \lambda_{xx} &= \lambda_{\perp}^{\text{мол}} + \lambda_{\perp}^{\text{тв}} + \lambda_{100}^{\text{дин}} U_z^2 + \lambda_{000}^{\text{дин}} (U_y^2 + U_x^2),\end{aligned}\quad (11)$$

где U_i – компоненты безразмерной скорости теплоносителя $U_i = u_i / \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$.

Соотношения (11) содержат четыре параметра, которые представляют собой «базовые» или «опорные» коэффициенты динамической теплопроводности, т.е. коэффициенты эффективной теплопроводности при определенных сочетаниях направлений векторов скорости потока и градиента температуры по отношению к оси сборки твэлов [2].

В практике расчетов теплового режима активных зон обычно пренебрегают теплопереносом по жидкости в направлении вдоль активной зоны за счет эффективной теплопроводности теплоносителя (λ_{zz}) по сравнению с конвективным переносом продольной скоростью. Такое упрощение допустимо, если число Пекле, построенное по эффективной продольной теплопроводности ($Pe = \rho c u_{zz} d_{\Gamma} / \lambda_{zz}$), достаточно велико ($Pe \geq 10$).

Поперечная теплопроводность теплоносителя с учетом $\lambda_{100}^{\text{отк}} = 0$ (по определению) имеет вид

$$\lambda_{xx} = \lambda_{yy} = \lambda_{\perp}^{\text{мол}} + \lambda_{\perp}^{\text{тв}} + \lambda_{100}^{\text{тип}} \cdot U_z^2 + (\lambda_{000}^{\text{тип}} + \lambda_{000}^{\text{отк}}) \cdot (U_x^2 + U_y^2). \quad (12)$$

Рекомендации для определения опорных коэффициентов, фигурирующих в соотношении (12), приводятся в работе [2].

Коэффициент объемного сопротивления. Сила сопротивления, действующая на жидкость со стороны твэлов (см. (3)), равна

$$\vec{F} = K \cdot \vec{u}, \quad (13)$$

где K – коэффициент объемного сопротивления. В работах по модели пористого тела [3, 4] для определения компонент силы сопротивления при обтекании сборки твэлов под произвольным углом рекомендованы соотношения

$$F_z = \rho \frac{\lambda_{\parallel}^{\text{тв}}}{2d_{\Gamma}} \bar{u} u_z, F_x = \rho \frac{\lambda_{\perp}^{\text{тв}}}{2d_{\Gamma}} \bar{u} u_x, F_y = \rho \frac{\lambda_{\perp}^{\text{тв}}}{2d_{\Gamma}} \bar{u} u_y, \quad (14)$$

где $\lambda_{\parallel}^{\text{тв}}$ и $\lambda_{\perp}^{\text{тв}}$ – коэффициенты гидравлического сопротивления при продольном и поперечном обтеканиях сборок. Формулы для их вычисления приводятся в [4].

Сопоставление (13) и (14) показывает, что коэффициент сопротивления K является тензором с компонентами вдоль главных осей:

$$k_{zz} = \rho \frac{\lambda_{\parallel}^{\text{тв}}}{2d_{\Gamma}} \bar{u}, k_{xx} = k_{yy} = \rho \frac{\lambda_{\perp}^{\text{тв}}}{2d_{\Gamma}} \bar{u}. \quad (15)$$

Эффективная вязкость теплоносителя. В качестве эффективной вязкости потока теплоносителя, обтекающего сборки твэлов, принимают коэффициент вязкости, ответственный за перенос осредненного осевого импульса в направлении поперек сборки, который можно рассчитать, зная коэффициент межканального обмена импульсом μ_{Γ} .

Используя для определения коэффициента межканального обмена импульсом μ_{Γ} рекомендации из [3], для эффективного коэффициента вязкости получено

$$\nu_{\text{eff}} / \nu = 0,0143 \sqrt{s/d - 1} \cdot \text{Re}^{0,8}. \quad (16)$$

Граничные условия на непроницаемой поверхности. Переход к модели пористого тела приводит также к неопределенности в условиях на границе пористого тела. Для средних скоростей традиционное условие прилипания на твердой поверхности, ограничивающей пористую среду, в общем случае не применимо. Спе-

циально проведенные исследования [5] показали, что на непроницаемой поверхности граничные условия имеют вид

$$u_n(n=0)=0, \quad \left(\frac{\partial u_z}{\partial n} + \frac{u_z}{l_z} \right)_{n=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial u_\tau}{\partial n} + \frac{u_\tau}{l_\tau} \right)_{n=0} = 0, \quad (17)$$

где \vec{n} – внешняя нормаль к ограничивающей поверхности; u_n – нормальная к стенке компонента скорости; u_z – компонента скорости вдоль оси сборки; u_τ – касательная к стенке и нормальная к оси «z» компонента скорости, l_z и l_τ – длины скольжения. Для определения l_z получено

$$\frac{s/\sqrt{3}}{l_z} = \left[\left(\frac{d_{\Gamma\infty}}{d_{\Gamma 1}} \right)^{10/7} - 1 \right] \cdot \left(1 + \frac{2P}{1 + \sqrt{1 + 4P}} + \frac{P}{\Omega_1} \right), \quad (18)$$

где $\Omega_1 = \omega_1/\omega_\infty$; $\omega_1, d_{\Gamma 1}, \omega_\infty, d_{\Gamma\infty}$ – площади и гидравлические диаметры пристенной и внутренних ячеек соответственно; $P = (0,028 + 0,24(s/d-1))\text{Re}^{0,15}$, $s/d = 1,0-1,5$.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА

Алгоритм численного решения уравнений теплогидравлики

Для решения системы нестационарных трехмерных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами и сложными обратными связями (2)–(5) для вязкой, сжимаемой жидкости был использован метод маркеров и ячеек [6], в котором вместо уравнения сохранения массы (2) решается уравнение Пуассона для давления. Причем дискретный аналог уравнения Пуассона является линейной комбинацией дискретных аналогов исходных уравнений движения в частных производных. Дискретный аналог, построенный непосредственно из уравнения Пуассона в частных производных, в общем случае не согласуется с дискретными аналогами исходных уравнений движения.

Возможность использования метода маркеров и ячеек основывается на специальном выборе разбиений расчетной области, смещенных друг относительно друга. В данной работе метод распространен на контрольные объемы, имеющие форму правильных шестиугольников. Это позволяет при моделировании активной зоны

(АЗ) рассматривать в качестве элементов разбиения поперечного сечения отдельные ТВС.

Продольное сечение разбиения расчетной области на смещенные контрольные объемы (к.о.) представлено на рис. 1, поперечное сечение и 13-точечный шаблон для описания переноса импульса в поперечном сечении показаны на рис. 2. Новый подход к описанию переноса импульса в поперечном сечении позволил сократить вдвое по сравнению с обычно используемым [6] количество поперечных проекций скорости.

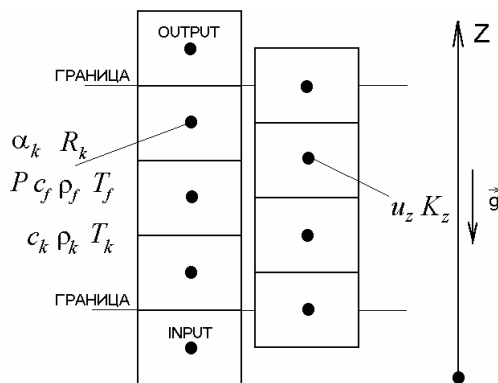


Рис. 1. Продольное разбиение расчетной области на смещенные контрольные объемы

Описание конвективного переноса импульса в поперечном направлении по схеме против потока (на примере седьмого к.о. рис. 2) происходит следующим образом: сначала определяются нормальные составляющие вектора скорости на гранях с учетом выбранных направлений:

$$\begin{aligned} a: u_{\perp a} &= \frac{1}{3}(u_3 + u_5 + u_9), \\ b: u_{\perp b} &= \frac{1}{3}(u_4 + u_8 + u_{10}), \\ c: u_{\perp c} &= \frac{1}{3}(u_4 + u_6 + u_{10}), \\ d: u_{\perp d} &= \frac{1}{3}(u_5 + u_9 + u_{11}). \end{aligned} \quad (19)$$

Если нормальная составляющая вектора скорости направлена из к.о., то потеря импульса пропорциональна произведению

$$a: u_1 u_{\perp a}, \quad b: u_1 u_{\perp b}, \quad c: u_1 u_{\perp c}, \quad d: u_1 u_{\perp d}, \quad (20)$$

в противном случае, приобретение импульса пропорционально произведению

$$a: \frac{1}{2}(u_7 + u_1) u_{\perp a}, \quad b: \frac{1}{2}(u_7 + u_{12}) u_{\perp b}, \quad c: \frac{1}{2}(u_7 + u_2) u_{\perp c}, \quad d: \frac{1}{2}(u_7 + u_{13}) u_{\perp d}. \quad (21)$$

Дискретный аналог системы (2)–(5) строится методом интегрирования по контрольному объему. Используя теорему Гаусса-Остроградского, дискретный аналог уравнения (2) на контрольных объемах ρ_f запишем следующим образом:

$$\varepsilon_f \frac{\rho_f^{\tau+\Delta\tau} - \rho_f^{\tau}}{\Delta\tau} + \frac{1}{V_z} \left[\sum_{l=1}^8 (\rho_f \vec{u}, (\varepsilon_f \vec{S})_l) \right]^{\tau+\Delta\tau} = 0, \quad (22)$$

соответственно, и дискретный аналог уравнения (3) на контрольных объемах для u_z и u_{xy}

$$\begin{aligned} \varepsilon_f \frac{(\rho_f u_z)^{\tau+\Delta\tau} - (\rho_f u_z)^{\tau}}{\Delta\tau} = \\ = \left[\frac{1}{V_z} \left(- \sum_{l=1}^8 \rho_f \vec{u} u_z (\varepsilon_f \vec{S})_l \Big|_{\vec{n}_l} + \sum_{l=1}^6 \mu_{eff} \text{grad} u_z S_l \Big|_{\vec{n}_l} \right) - K_z \rho_f |\vec{u}| u_z - \varepsilon_f \frac{\Delta P}{\Delta z} - \varepsilon_f \rho g \right]^{\tau+\Delta\tau}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\varepsilon_f \frac{(\rho_f u_{xy})^{\tau+\Delta\tau} - (\rho_f u_{xy})^{\tau}}{\Delta\tau} = \left[- \frac{1}{V_{xy}} \sum_{l=1}^6 \rho_f \vec{u} u_{xy} (\varepsilon_f \vec{S})_l \Big|_{\vec{n}_l} - K_{xy} \rho_f |\vec{u}| u_{xy} - \varepsilon_f \frac{\Delta P}{\Delta_{xy}} \right]^{\tau+\Delta\tau}, \quad (24)$$

где \vec{n} – внешняя нормаль к грани к.о.; S_l – площадь l -ой грани к.о.; $\Delta\tau$ – временной шаг; u_{xy} , u_z – поперечные и продольные проекции скорости соответственно; V_{xy} , V_z – объемы к.о. для поперечных и продольных проекций скорости соответственно.

Затем путем линейной комбинации (20)–(24) получаем уравнение Пуассона для давления

$$\nabla^2 p^{\tau+\Delta\tau} = \Omega, \quad (25)$$

где Ω – источник уравнения Пуассона.

Граничное условие (условие Неймана) для давления получается в результате проецирования уравнений нестационарного движения на нормаль к границе. В

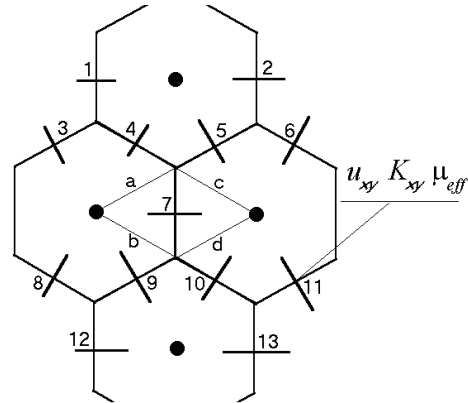


Рис. 2. Поперечное разбиение расчетной области на смещенные контрольные объемы и тринадцатиточечный шаблон для описания переноса импульса в поперечном сечении

результате реализуются все возможные типы нестационарных граничных условий для скорости и давления, когда задаются давление во всех к.о. на входе и выходе АЗ, давление в одних к.о. и скорости в других к.о. на входе и выходе АЗ, скорости во всех к.о. на входе и выходе АЗ. В одном и том же к.о. на границе АЗ скорость и давление одновременно не задаются.

Дискретный аналог уравнения сохранения энергии теплоносителя (4) имеет вид

$$c_f \varepsilon_f \frac{(\rho_f T_f)^{\tau+\Delta\tau} - (\rho_f T_f)^\tau}{\Delta\tau} = \left[\frac{1}{V_z} \left(- \sum_{l=1}^8 c_f \rho_f \bar{u} T_f (\varepsilon_f S)_l \Big|_{\bar{n}_l} + \sum_{l=1}^6 \lambda_f \text{grad} T_f S_l \Big|_{\bar{n}_l} \right) + q_v \right]^{\tau+\Delta\tau} \quad (26)$$

при следующих условиях на границе АЗ:

- если поток теплоносителя направлен во внутрь АЗ, то его температура определяется из условия перемешивания в нижнем или верхнем коллекторе АЗ;
- если поток теплоносителя направлен наружу АЗ, то его температура равна температуре в к.о. на границе.

Система линейных уравнений (23)–(26) решается методом прогонки по направлениям итерационно и совместно с дискретными аналогами уравнений уровня «ячейка-твэл».

Для решения конечно-разностных одномерных уравнений теплопроводности уровня «ячейка-твэл» также применяется метод прогонки. При этом используется неравномерное разбиение твэла по радиусу на кольцевые слои с одинаковой площадью поперечного сечения и учитывается наличие контактного термического сопротивления между топливом и оболочкой.

Описание программного модуля ТРЕТОН

Программный код ТРЕТОН предназначен для теплогидравлического расчета переходных пространственно-распределенных процессов в активной зоне ВВЭР с бесчехловыми ТВС. В нем реализованы алгоритмы многоуровневого решения уравнений теплообмена и гидродинамики, предусмотрена процедура согласованного расчета совместно с нейтроно-физическими уравнениями.

Определение искомых давлений, скоростей и температур теплоносителя и температур твэлов в программе осуществляется в цикле по времени как при моделировании переходных процессов, так и при расчете стационарных режимов. В последнем случае шаг по времени играет роль коэффициента, регулирующего скорость сходимости итераций к стационарному распределению.

На каждом временном шаге в программе сначала определяются поля скоростей и давления теплоносителя, которые затем используются при расчете температур твэлов и теплоносителя. Процесс согласования полей температур контролируется путем проверки выполнения ряда локальных и интегральных тепловых балансов в активной зоне: для каждой ТВС в каждой расчетной точке по высоте проверяется совпадение выделенной энергии с энергией, переданной с поверхности в теплоноситель; определяется дисбаланс между полным энерговыделением в активной зоне и энергией, отводимой теплоносителем из активной зоны; в каждой расчетной точке разбиения активной зоны проверяется выполнение стационарного дискретного аналога уравнения сохранения энергии для теплоносителя. При расчете стационарных режимов выполнение баланса определяет момент завершения итераций, а в переходных режимах величины дисбалансов могут рассматриваться как индикаторы степени нестационарности процесса.

ТЕСТИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ПРОГРАММЫ «ТРЕТОН»

Для тестирования теплогидравлического модуля ТРЕТОН было выполнено сопоставление расчетных данных с результатами аналитического решения модельной задачи теплообмена в активной зоне с учетом естественной конвекции [7]. Помимо этого проведено сравнение результатов серии расчетов полей температур и скоростей теплоносителя в активной зоне ВВЭР1000 для номинального режима работы с независимыми расчетами по аттестованной программе NOSTRA [8].

Теплообмен в активной зоне с учетом естественной конвекции

Для проверки точности учета эффектов естественной конвекции в программном комплексе ТРЕТОН была решена задача определения поля скорости, создаваемого силами плавучести, при движении теплоносителя через цилиндрическое анизотропное пористое тело, в котором действуют источники тепловыделения, изменяющиеся по радиусу по параболическому закону.

Постановка задачи. В активной зоне высотой l , радиусом r_0 действуют неравномерно распределенные по r источники тепловыделения $q_v(r)$. На вход в активную зону поступает теплоноситель с температурой $t_{ж}$. Давление жидкости во входном и выходном коллекторах поддерживаются постоянными. Поля скоростей и температур принимаются стационарными и осесимметричными. Необходимо оценить возмущения, вносимые в поля скорости и температуры, обусловленные действием сил плавучести при зависимости плотности теплоносителя от температуры. Остальные физические параметры жидкости полагаются постоянными.

Возмущение поля скорости. Используя рекомендации и результаты работы [7], было получено выражение для компонент отклонений скорости

$$M_r = (k_r - 1)16L \sum_{k=1,3,5..} \left(\frac{I_1(\pi k R)}{I_1(\pi k R_0)} - \frac{R}{R_0} \right) \frac{\sin(\pi k Z)}{(\pi k)^3}, \quad (27)$$

$$M_z = \frac{1}{2} + (k_r - 1) \left[\frac{1}{2} - 2L^2 R^2 Z - 2L \sum_{k=1,3,5..} \left(\frac{4}{(\pi k)^2} \left(\frac{4}{(\pi k)^2} + R^2 \right) - \frac{8R_0}{(\pi k)^3} \frac{I_0(\pi k R)}{I_1(\pi k R_0)} \right) \cos(\pi k Z) \right], \quad (28)$$

где k_r – коэффициент неравномерности тепловыделения по радиусу; $Z=z/l$, $R=r/l$, $L=l/r_0$, $R_0=1/L$.

При равномерном распределении тепловыделения по радиусу ($k_r = 1$) получаем $M_r = 0$ и $M_z = 0.5$, т.е. неравномерность скоростей по радиусу отсутствует, а за счет сил плавучести увеличилась скорость через активную зону на величину $\bar{m}_z = \wp_0 / (2kl)$, где $\wp_0 = \beta \Delta t_0 \rho_{ж} g l$, Δt_0 – средний подогрев теплоносителя в активной зоне, β определяется из соотношения $\rho = \rho_{ж}[1 - \beta(t - t_{ж})]$, $kl = (p_{вх} - p_{вых} - \rho_{ж} g l) / m_{z0}$, $p_{вх}$ – давление на входе в АЗ, $p_{вых}$ – давление на выходе из АЗ, m_{z0} – средний массовый расход по АЗ.

Величина $\wp_0 / (kl)$, является масштабом, определяющим степень воздействия естественной конвекции на поле скоростей в активной зоне.

Сопоставление аналитического и численного решений. Результаты расчетов распределения скорости приведены на рис. 3 и 4. Были проведены расчеты при больших (продольная скорость теплоносителя ~ 2 м/с) и малых расходах (продольная скорость теплоносителя ~ 0.6 м/с) для анализа учета вклада сил плавучести в суммарный расход.

За счет действия сил плавучести, которые максимальны в области максимальных подогревов, т.е. по центру активной зоны, происходит перераспределение

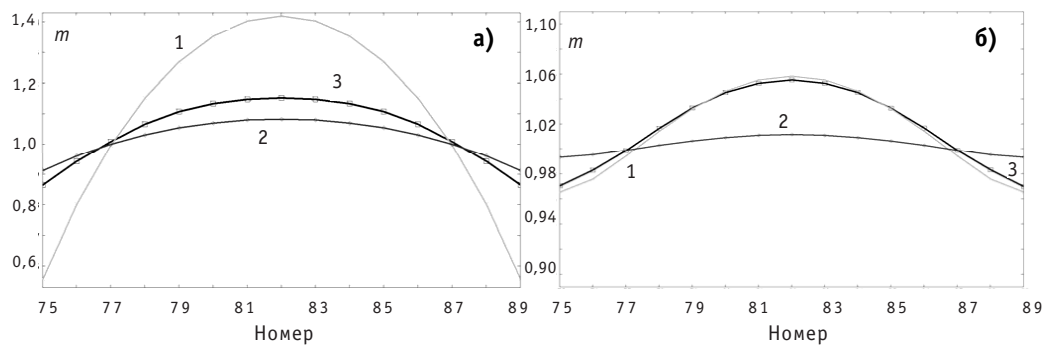


Рис. 3. Распределение безразмерных массовых скоростей теплоносителя по радиусу на входе (а) и выходе (б) из активной зоны: 1 – максимальная оценка по аналитической модели; 2 – минимальная оценка по аналитической модели; 3 – расчет по программе ТРЕТОН

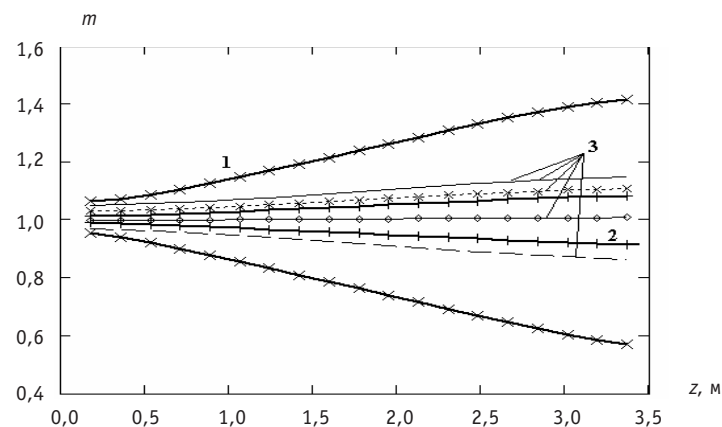


Рис. 4. Распределение безразмерных массовых скоростей теплоносителя по высоте активной зоны: 1 – максимальная оценка по аналитической модели; 2 – минимальная оценка по аналитической модели; 3 – расчет по программе ТРЕТОН

расходов теплоносителя. В центре скорость увеличивается, а на периферии активной зоны уменьшается. Причем действие сил плавучести сказывается по всему объему активной зоны, так что и на входе устанавливается некоторая неравномерность скорости, но существенно меньшая, чем на выходе. Необходимо отметить существенно больший вклад сил плавучести в суммарный расход в случае малых расходов. В качестве примера на рис. 3 представлено распределение скоростей по радиусу активной зоны для случая малых расходов.

Сопоставление распределения скорости теплоносителя по радиусу, рассчитанного с помощью программы ТРЕТОН (кривые 3 на рис. 3), с результатами аналитических расчетов для предельных случаев, соответствующих заниженному (кривая 1) и завышенному (кривая 2) значениям сопротивления перетечек, показывает, что рассчитанное по ТРЕТОН распределение занимает промежуточное положение между предельными теоретическими оценками. Тот же вывод следует из анализа рис. 4, на котором показано развитие неравномерности скорости по высоте активной зоны на различных расстояниях от центра активной зоны.

В целом можно заключить, что программный комплекс ТРЕТОН корректно учитывает действие силы плавучести при выполнении теплогидравлических расчетов.

Номинальный режим работы ВВЭР-1000

С целью комплексного тестирования разработанного программного модуля ТРЕТОН было проведено сравнение результатов расчетов полей температур и скоростей теплоносителя в активной зоне ВВЭР-1000 с данными независимого расчета по аттестованной программе NOSTRA.

В расчетах моделировался стационарный режим работы реактора на номинальной мощности. Было выбрано распределение энерговыделения по сечению активной зоны, обеспечивающее малые неравномерности расходов по ТВС и, соответственно, незначительные поперечные перетечки теплоносителя в активной зоне. Это обеспечило возможность корректного сравнения результатов расчета теплогидравлики в активной зоне по трехмерной модели пористого тела и по канальной методике, реализованной в программе NOSTRA.

Результаты расчета распределения подогрева теплоносителя и его расхода на выходе из каждой ТВС соответственно показаны на рис. 5 и 6.

Изменение температур теплоносителя и поверхности оболочки твэла по высоте одной из ТВС показано на рис. 7, а на рис. 8 представлено распределение температуры по радиусу твэла в области максимальной по активной зоне температуры топлива.

Получено хорошее совпадение результатов расчетов по обеим программам. Максимальные отклонения подогревов и расходов теплоносителя в ТВС, получен-

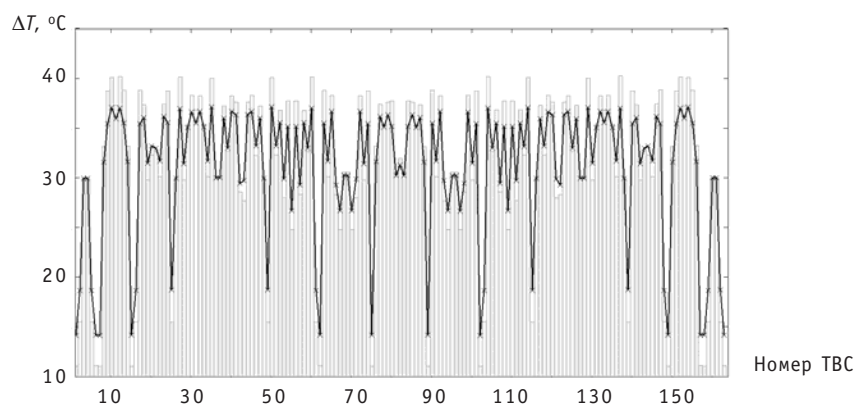


Рис. 5. Изменение подогрева теплоносителя по отдельным ТВС: — модель пористого тела (ТРЕТОН); гистограмма — поканальная методика (NOSTRA)

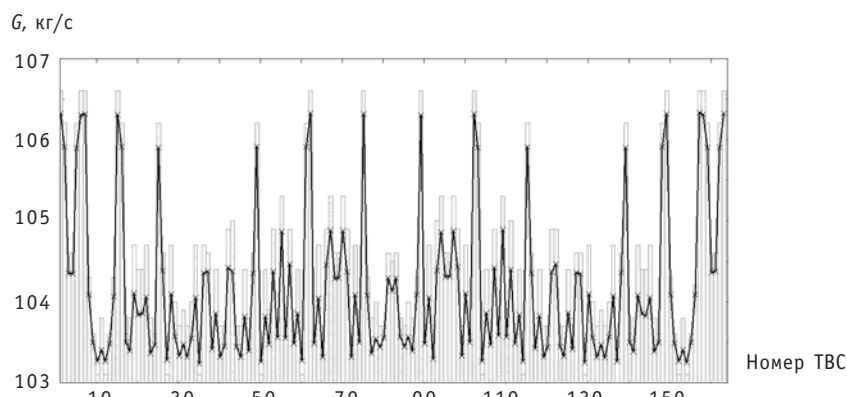


Рис. 6. Изменение расхода теплоносителя по отдельным ТВС: — модель пористого тела (ТРЕТОН); гистограмма — поканальная методика (NOSTRA)

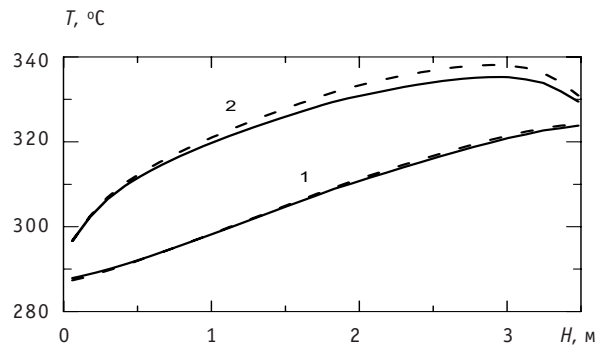


Рис. 7. Изменение температур теплоносителя (1) и поверхности оболочки ТВЭЛ (2) по высоте ТВС:
 — модель пористого тела (ТРЕТОН); — — — — — поканальная методика (NOSTRA)

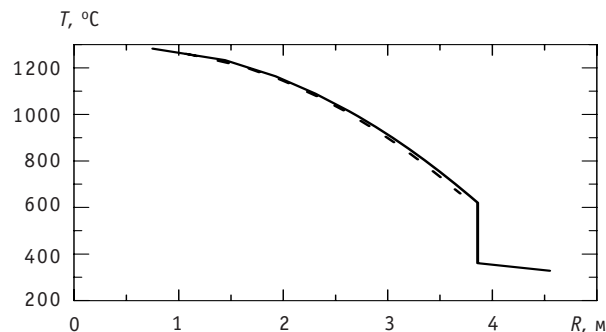


Рис. 8. Распределение температуры по радиусу ТВЭЛ в области максимальной температуры топлива:
 — модель пористого тела (ТРЕТОН); — — — — — поканальная методика (NOSTRA)

ные по трехмерной программе ТРЕТОН, от результатов расчета по программе NOSTRA составляют около 2.5°C и 0.7 кг/с соответственно. При этом разброс расходов и подогревов по каналам, рассчитанных по программе ТРЕТОН, ниже, чем в расчетах по программе NOSTRA, т.к. в программе ТРЕТОН трехмерные процессы переноса и межкассетный тепломассоперенос учитываются во всей активной зоне, а не только во входном и выходном коллекторах, как в программе NOSTRA.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы проведено усовершенствование математической модели и программного комплекса ТРЕТОН для описания нестационарных трехмерных тепловых и гидродинамических процессов в активных зонах реакторов с безчехловыми ТВС.

Выполнено тестирование теплогидравлического модуля ТРЕТОН: проведено сопоставление результатов расчетов с аналитическим решением модельной задачи теплообмена в активной зоне с учетом естественной конвекции, а также сравнение результатов серии расчетов полей температур и скоростей теплоносителя для номинального режима работы активной зоны ВВЭР-1000 с независимыми расчетами по аттестованной программе NOSTRA.

Разработанный программный комплекс ТРЕТОН может быть использован для моделирования трехмерных тепловых и гидродинамических процессов в активной зоне ВВЭР-1000 в различных режимах ее работы как на пониженной, так и повышенной мощности. С его помощью возможно исследование эффектов трехмерного тепломассопереноса в активной зоне, обусловленного особенностями конст-

рукции активной зоны, а также разрабатываемыми в настоящее время новыми решениями по модернизации конструкции ТВС, в которых используются перемешивающие решетки (ПР), предназначенные для перемешивания и интенсификации теплоносителя в пределах активной зоны.

Работа проводится в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Литература

1. Корсун А.С. Эффективная теплопроводность пористых структур, составленных из пучков стержней или труб//Тепломассообмен ММФ_4/Труды IV Минского международного форума. – Минск, 2000. – Т. 10. – С. 242-250
2. Корсун А.С., Меринов И.Г., Харитонов В.С. Эффективная теплопроводность теплоносителя, омывающего стержневую сборку.//Труды IV Российской национальной конференции по теплообмену: В 8 томах. Т. 7. Радиационный и сложный теплообмен. Теплопроводность, теплоизоляция. – М. Издательский дом МЭИ, 2006. – С. 235-238.
3. Субботин В.С. и др. Решение задач реакторной теплофизики на ЭВМ. – М.: Атомиздат, 1979.
4. Митенков Ф.М., Головкин В.Ф., Ушаков П.А., Юрьев Ю.С. Проектирование теплообменных аппаратов АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. – М.: Мир, 1990.
7. Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г. Аналитическое решение для поля скоростей движения жидкости при совместном действии вынужденной и свободной конвекции в анизотропной пористой структуре/Труды РНКТ-4. Т. 6. – М.: Изд. МЭИ, 2006. – С. 83-86.
8. Аттестационный паспорт программного средства NOSTRA, НТЦ ГАН РФ, 2003.

Поступила в редакцию 11.12.2008

measurement data accordance was less than 10% under the short cooling times (< 100 days).

УДК 621.534.23

Modeling of Three-Dimensional Thermo-Hydraulic Processes in VVER-1000 Reactor's Core with Program Complex TRETON \N.N. Davidenko, A.S. Korsun, Y.A. Maslov, I.G. Merinov, V.S. Kharitonov, B.E. Shumsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 13 pages, 8 illustrations. – References, 8 titles.

The improvement of porous body model for the description of heat-hydraulic processes in VVER-1000 reactors core with non-cover fuel assemblies has been done. Program complex TRETON for 3D-modelling non-stationary thermal and hydrodynamic processes has been created. Heat-hydraulic module TRETON has been tested by comparison of calculation results to the analytical decision of model heat transfer problem. Comparison of calculation results coolant temperature and speed for a nominal operating mode VVER-1000 reactors core with independent calculations under certified program NOSTRA has been spent.

УДК 621.039.517.5

Superposition Method in Modeling of Temperature Field in Heat Exchange Devices by Means of Tracer Concentration Field \V.N. Delnov, Y.D. Levchenko, S.F. Shepelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 6 illustrations. – References, 7 titles.

The tracer is locally injected in turn into each characteristic area at the inlet of the flow part of the test section, while at the outlet the responses – tracer concentrations – are measured in the flow of working fluid. The local flow rate of tracer is proportional to the flux of thermal energy through the characteristic area. The sum of measured concentrations from each local tracer injection is proportional to local temperature at the outlet from the flow part of the test section. The application of response superposition method enables one to increase the accuracy in modeling the temperature field and simplify the design of test section for studying mixing processes in a heat exchange device.

УДК 621.039.564

Correlation Flowmeter for Measuring Low Coolant Velocities \B.V. Kebabdz, A.N. Opanasenko, V.A. Shurupov, M.S. Timchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 10 pages, 3 tables, 9 illustrations. – References, 2 titles.

When modeling the heat emergency removing system of fast reactor on water test rig, the natural circulation velocity is evaluated by the thermocorrelation method. The calibration of the measuring channel for internal and external gap of model subassembly is carried out on a small test facility with forced circulation. The frequency range of signal processing is defined and correction factors for true flowrate calculation are obtained. The design improvement of model subassembly is proposed, in order to eliminate the swirl effect.

УДК 621.039.52.034.3: 532.546

Hydrodynamics and Heat Exchange Features of the Pebble Bed in Radial Coolant Flow \V.A. Klimova, V.M. Pahaluyev, S.Ye. Sheklein; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 4 illustrations. – References, 5 titles.

Regarded are the peculiarities of the radial flow in the pebble bed. The investigation shows that the spherical elements heat emission intensity is defined by the surface vortex generation as well as by gas flux laminarization connected with its accelerated flow. A rather simple formula for Nu number as a function of Re number in a range of $5 \cdot 10^2 - 10^4$ for the spherical elements diameter 7, 15 and 22 mm considering the geometrical parameter influence on the heat exchange is received.

УДК 681.51:621.039.534.6

Automatic Control System of Oxygen Thermodynamic Activity for Lead Bismuth Eutectic Coolant \P.N. Martynov, R.Sh. Askhadyllin, A.A. Simakov, V.S. Lanskix, M.E. Chernov, R.P. Sadovnichiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 6 titles.

This article is devoted to develop of the oxygen thermodynamic activity automatic control system for circulating facilities with lead and lead-bismuth coolant. The basic preconditions for creation of the automatic control system and problem state of studying the oxygen rules with reference to the «SVBR-75/100» Reactor Installation are analyzed. For the first time, with reference to conditions of the «SVBR-75/100» Reactor Installation the opportunity of use of the oxygen thermodynamic activity automatic control system by a solid-