

МЕТОД РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА БЕСЧЕХЛОВОЙ ТВС ВВЭР-1000 ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗКАХ

В.М.Троянов, Ю.И.Лихачев, В.И.Фоломеев

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



В статье изложены методы расчета термомеханики бесчехловых тепло-выделяющих сборок (ТВС) ВВЭР-1000, основанные на использовании балочно-стержневой модели изгиба кассеты. Представлены методы решения задач продольно-поперечного изгиба ТВС, моделируемой многосвязной стержневой системой и балкой. Методы решения нелинейных задач изгиба ТВС учитывают радиационные эффекты в материалах, трение и проскальзывание твэлов и направляющих каналов в дистанционирующих решетках, внешние силовые, весовые и гидравлические нагрузки для произвольных условий эксплуатации. Решение системы уравнений, описывающих продольно-поперечный изгиб бесчехловой ТВС, реализовано в расчетном коде ТЕРМОК.

ВВЕДЕНИЕ

Расчетное моделирование термомеханического поведения активной зоны ВВЭР-1000, методология которого изложена в [1], основано на использовании модели термомеханического поведения отдельно взятой бесчехловой ТВС. Настоящая статья посвящена описанию названной модели.

Балочно-стержневая модель изгиба бесчехловой кассеты использует балочный аналог ТВС при рассмотрении продольного изгиба и стержневое представление кассеты при решении задачи поперечного изгиба пучка твэлов и направляющих каналов (НК) в пролетах между дистанционирующими решетками (ДР).

Поперечный и продольный изгибы указанной ТВС происходят под действием осевой сжимающей силы N и поперечных сил взаимодействия P между контактирующими ТВС, приложенных к дистанционирующим решеткам.

При разработке балочно-стержневой модели деформирования бесчехловой кассеты ВВЭР-1000 были использованы подходы, положенные в основу балочной модели деформирования ТВС быстрого реактора, разработанной в ФЭИ [2].

Приведенные в настоящей статье уравнения и их решения относятся к одному шагу по времени в использованном методе пошагового расчета в рамках теории ползучести старения [1].

Работа выполнялась при содействии ОАО "ТВЭЛ".

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА ТВС

Бесчехловая тепловыделяющая сборка представляет собой пучок стержней (твэлов и НК), связанных между собой дистанционирующими решетками, расположенными с достаточно большим шагом. Изгиб стержней в пролетах между решетками в значительной мере зависит от сопротивления ячеек ДР повороту стержней относительно решетки.

При воздействии на ДР поперечных сил P_i от соседних ТВС имеет место поперечный изгиб стержней, продольная сила N также дает вклад в этот поперечный изгиб.

Если считать, что ячейки ДР полностью запрещают поворот стержней, то изгиб ТВС от поперечных сил определяется прогибами в отдельных пролетах между ДР несвязанных стержней (с собственными жесткостями стержней D), нагруженных соответствующими поперечными силами, с запрещенными поворотами на концах.

Собственные жесткости на изгиб оболочек твэлов и трубок НК определяются соотношениями

$$D_n^* = E_n^* \cdot J^*, \bar{D}_k = \bar{E}_k \cdot \bar{J}, \quad (1)$$

где E_n^* и \bar{E}_k - приведенные модули упругости материалов оболочек твэлов и трубок НК, определяемые согласно теории ползучести старения; $J^* = \frac{\pi}{64} d^{*4} (1 - \gamma^{*4})$

и $\bar{J} = \frac{\pi}{64} \bar{d}^4 (1 - \bar{\gamma}^4)$ - осевые моменты инерции оболочки твэла и трубки НК; d^* и \bar{d} - наружные диаметры твэла и трубки НК; γ^* и $\bar{\gamma}$ - отношения внутренних диаметров к наружным для оболочки твэла и трубки НК.

Для весьма мягких ячеек ДР вклад поперечного изгиба в формоизменение ТВС определяется изгибом несвязанных по всей длине стержней и может быть весьма большим.

В случае рассмотрения реальных жесткостей ячеек для определения формоизменения ТВС используются следующие предпосылки.

1. Приложенная к ДР в заданной плоскости XOZ внешняя сила P_i передается через ячейки на твэлы и НК. В этой плоскости на твэлы и НК в рассматриваемой ДР действуют различные силы P_{in}^* и \bar{P}_{ik} , сумма которых равна внешней силе:

$$P_i = \sum_{n=1}^{n_\Sigma} P_{in}^* + \sum_{k=1}^{k_\Sigma} \bar{P}_{ik}, \quad (2)$$

где $n_\Sigma = 312$ и $k_\Sigma = 19$ - числа твэлов и НК в ТВС включая центральную трубку.

2. Твэлы и НК нагружены осевыми силами от ячеек ДР, равными силам трения в этих ячейках:

$$T_{in}^* = F^* (\sigma_{Zn(i+\delta)}^* - \sigma_{Zn(i-\delta)}^*), \quad (3)$$

$$\bar{T}_{ik} = \bar{F} (\bar{\sigma}_{Zk(i+\delta)} - \bar{\sigma}_{Zk(i-\delta)}), \quad (4)$$

где $F^* = \frac{\pi}{4} d^{*2} (1 - \gamma^{*2})$, $\bar{F} = \frac{\pi}{4} \bar{d}^2 (1 - \bar{\gamma}^2)$ - площади поперечных сечений оболочки твэла

и трубки НК; $\sigma_{Zn(i+\delta)}^*$, $\sigma_{Zn(i-\delta)}^*$ и $\bar{\sigma}_{Zk(i+\delta)}$, $\bar{\sigma}_{Zk(i-\delta)}$ - осевые напряжения в твэлах и НК за и перед i -ой ДР. Здесь δ - малая окрестность i -ой точки. Эти напряжения берутся из задачи продольного изгиба ТВС (см. ниже).

Твэлы и НК нагружены также осевыми весовыми нагрузками q^* , \bar{q} и гидравлическими силами трения q_r^* и \bar{q}_r так, что на их i -ый пролет действуют осевые нагруз-

ки:

$(q_0^* - q_{0r}^*)(Z_i^0 - Z_{i-1}^0)$ - на твэл,

$(\bar{q}_0 - \bar{q}_{0r})(Z_i^0 - Z_{i-1}^0)$ - на НК.

Здесь q_0^* и \bar{q}_0 - вес единицы длины твэла и трубки НК, q_{0r}^* и \bar{q}_{0r} - приходящаяся на единицу длины твэла и НК гидравлическая сила.

3. Нагруженные силами P_{in}^* , T_{in}^* , q^* , q_r^* твэлы и силами \bar{P}_{ik} , \bar{T}_{ik} , \bar{q} , \bar{q}_r направляющие каналы изгибаются как свободные стержни (с жесткостями оболочек твэлов и трубок НК), но их свободному изгибу противодействуют ДР, в ячейках которых они могут поворачиваться, лишь преодолевая определенное сопротивление в виде реактивных моментов M_{in}^* и \bar{M}_{ik} .

4. Твэлы и НК в одной ДР могут иметь различные углы поворота относительно решетки ($\theta_{in}^* - \theta_i^p$) и ($\bar{\theta}_{ik} - \theta_i^p$), но у них должны быть одинаковые прогибы вместе с решеткой. Сама ДР при этом может поворачиваться на угол θ_i^p как целая конструкция за счет продольных деформаций твэлов и НК, обусловленных продольным изгибом ТВС с жесткостью сечения связанных стержней (см. ниже).

5. Твэлы и НК, поворачиваясь в ячейках относительно ДР, встречают сопротивление реактивными моментами, пропорциональными углам поворота

$$\begin{aligned} M_{in}^* &= C_{in}^*(\theta_{in}^* - \theta_i^p), \\ \bar{M}_{ik} &= \bar{C}_{ik}(\bar{\theta}_{ik} - \theta_i^p), \end{aligned} \quad (5)$$

где C_{in}^* и \bar{C}_{ik} - жесткости "на поворот" ячеек твэлов и НК дистанционирующих решеток.

6. Твэлы и НК нагружают ячейки ДР моментами, равными реактивным моментам M_{in}^* и \bar{M}_{ik} и направленными им навстречу. В результате дистанционирующая решетка в целом нагружается реактивным моментом, равным

$$M_{im}^p = -\sum_{n=1}^{n_s} M_{in}^* - \sum_{k=1}^{k_s} \bar{M}_{ik}. \quad (6)$$

7. Кроме реактивных моментов твэлы и НК нагружают решетки реактивными силами, равными силам трения T_{in}^* , \bar{T}_{ik} и направленными навстречу осевым силам, приложенным к стержням (рис.1 и 2). Указанные реактивные силы обуславливают действие дополнительных реактивных моментов на решетках

$$M_{iT}^p = (U_i + V_i + U_{0i}) \left(\sum_{n=1}^{n_s} T_{in}^* + \sum_{k=1}^{k_s} \bar{T}_{ik} \right),$$

где V_i - прогиб i -ой ДР в продольном изгибе ТВС (см. ниже); U_{0i} - начальные прогибы ДР.

В результате на каждую решетку действует суммарный реактивный момент

$$M_i^p = M_{im}^p + M_{iT}^p. \quad (7)$$

Эти моменты, действующие в заданной плоскости на всех ДР, обуславливают деформирование балки ТВС по схеме продольного (чистого) изгиба (см. ниже).

Согласно изложенным выше предпосылкам для определения формоизменения твэлов и НК от приложения поперечных сил и сил трения в случае реальных жесткостей ячеек должны быть решены задачи изгиба многопролетных неразрезных балок с жесткостями отдельных стержней D_{in}^* и \bar{D}_{ik} , которые в сечениях ДР нагружены си-

где

$$C_n^* = \frac{1}{L_0} \left[\sum_{i=1}^m P_{in}^* (L - Z_i^0) + \sum_{i=1}^m M_{in}^* + \sum_{i=1}^m T_{in}^* (U_i + V_i + U_{0i}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} (\bar{q}^* - \bar{q}_{0r}) \sum_{i=1}^m (Z_i^0 - Z_{i-1}^0) (U_i + V_i + U_{0i} + U_{i-1} + V_{i-1} + U_{0(i-1)}) \right]$$

- реакция на левой опоре для случая шарнирно закрепленных концов твэла, L_0 - длина твэльной балки; K_n^* - обусловленная анизотропным радиационным ростом материала оболочки кривизна твэла, определяемая по разности плотности потока нейтронов на противоположных сторонах твэла.

Таким же образом может быть учтено искривление твэлов, вызванное неоднородными по поперечному сечению осевыми удлиннениями оболочки от взаимодействия с таблетками топливного сердечника при теплосменах и от неоднородного распределения температуры по периметру оболочки твэла.

Для пролетов балки НК (рис.2) дифференциальное уравнение изогнутой оси в плоскости XOZ имеет следующий вид:

$$\bar{D}_k \frac{d^2 \bar{U}_k}{dZ_0^2} = -\bar{C}_k Z_0 + \sum_{i=1}^j \bar{P}_{ik} (Z_0 - Z_i^0) + \sum_{i=1}^j \bar{M}_{ik} - \\ - \sum_{i=1}^j \bar{T}_{ik} (\bar{U}_k - U_i) - (\bar{q}_0 - \bar{q}_{0r}) \sum_{i=1}^j (Z_i^0 - Z_{i-1}^0) \left(\bar{U}_k - \frac{U_i + U_{i-1}}{2} \right) - \\ - N_0 \bar{U}_k - \sum_{i=1}^j \bar{T}_{ik} (\bar{V}_n - V_i + U_0 - U_{0i}) - (\bar{q}_0 - \bar{q}_{0r}) \sum_{i=1}^j (Z_i^0 - Z_{i-1}^0) \times \\ \times \left(\bar{V}_n + U_0 - \frac{V_i + V_{i-1}}{2} - \frac{U_{0i} + U_{0(i-1)}}{2} \right) - N_0 (\bar{V}_k + U_0) - \bar{K}_k \bar{D}_k, \quad (10)$$

где

$$\bar{C}_k = \frac{1}{L_0} \left[\sum_{i=1}^m \bar{P}_{ik} (L - Z_i^0) + \sum_{i=1}^m \bar{M}_{ik} + \sum_{i=1}^m \bar{T}_{ik} (U_i + V_i + U_{0i}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} (\bar{q}_0 - \bar{q}_{0r}) \sum_{i=1}^m (Z_i^0 - Z_{i-1}^0) (U_i + V_i + U_{0i} + U_{i-1} + V_{i-1} + U_{0(i-1)}) \right]$$

- реакция на левой опоре для случая шарнирно закрепленных концов НК; L_0 - длина

балки НК; $N_0 = \frac{N}{k_\Sigma}$ - осевая нагрузка на каждый НК от пружинного блока; \bar{K}_k - кривизна НК, определяемая по разности плотности потока нейтронов и температуры на противоположных сторонах трубки НК.

Отметим, что в моментах от продольных сил учитываются общие прогибы стержней от поперечного изгиба U , продольного изгиба ТВС V , а также начальные прогибы ТВС U_0 .

Прогибы балок, определяемые из уравнений (9) и (10), должны удовлетворять для случая шарнирного закрепления концов следующим граничным условиям:

$$U_n^* = 0, \bar{U}_k = 0 \text{ при } Z_0 = 0 \text{ и } Z_0 = L_0. \quad (11)$$

Уравнения (2)-(11) записываются для двух плоскостей XOZ и YOZ . Полученная система уравнений содержит $\sim 10^4$ неизвестных поперечных сил для одной ТВС.

Решение таких систем уравнений связано с большими трудностями, а численное решение требует для проведения расчетов мощных ЭВМ. При расчетах деформаций ансамбля ТВС, составляющих активную зону реактора (163 ТВС), использование описанных выше систем для расчетов деформаций отдельных ТВС представляется проблематичным.

С целью упрощения в задаче поперечного изгиба могут учитываться не все твэлы и НК по отдельности, а определенные группы твэлов и НК, представляющих всю совокупность стержней в ТВС. В этих группах стержней все нагрузки и свойства усредняются. Число неизвестных при этом может быть существенно сокращено (на один или два порядка). В пределе все стержни ТВС могут быть сведены в две группы: группа твэлов и группа НК с усредненными нагрузками и свойствами. В этом случае для одной ТВС с 15 ДР число неизвестных поперечных сил сокращается до 60.

Наряду с шарнирным закреплением концов стержней были рассмотрены другие, реализующиеся на практике варианты закрепления: два конца стержней защемлены; один конец защемлен, а другой закреплен шарнирно или свободен от закрепления (например, для твэлов).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА ТВС

В задаче продольного изгиба тепловыделяющая сборка представляется балкой с соответствующим образом закрепленными концами шестигранного поперечного сечения с приведенной жесткостью, неоднородной по длине ТВС и меняющейся в процессе эксплуатации (рис. 3). Головка ТВС и ее хвостовик аппроксимируются дополнительными пролетами указанной балки с соответствующими жесткостями.

Рассматриваются различные типы закрепления концов балки (шарнирное опирание с ограниченным углом поворота, жесткая заделка и шарнирное опирание с восстанавливающим моментом трения), соответствующие условиям реальных посадок головки и хвостовика ТВС в посадочных гнездах блока защитных труб и опорных труб.

Для балки принимается справедливой гипотеза плоских сечений, что следует из малых значений деформации достаточно жестких на сдвиг дистанционирующих решеток.

В модели продольного изгиба ТВС учитываются следующие факторы:

- удлинение твэлов и НК от радиационного роста, храповых механизмов, ползучести и температурных расширений;
- расслабление начальных натягов в твэльных ячейках вследствие релаксации напряжений в пружинных элементах ДР и осаживание твэльных оболочек избыточным внешним давлением, а также изменение начальных натягов в ячейках НК, вызванное релаксацией напряжений;
- возможность проскальзывания твэлов и НК в решетках, если силы проталкивания превышают силы трения в ячейках ДР, при этом жесткость балки изменяется в соответствии с изменением областей проскальзывания.

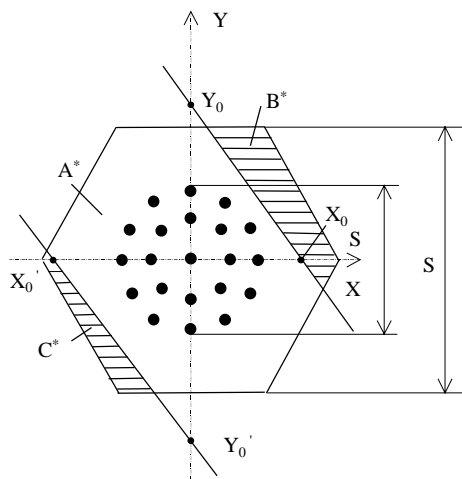


Рис.3. Расположение зон проскальзывания твэлов в сечении балки, представляющей ТВС

Поскольку для балки-имитатора принята

гипотеза плоских сечений, то области проскальзывания в поперечном сечении балки разделяются прямыми линиями (см. схему на рис. 3).

Эти линии делят сечение на три зоны:

- зона A^* , где проскальзывания твэлов нет;
- зона B^* , где твэлы проскальзывают в одном направлении;
- зона C^* , где твэлы проскальзывают в обратном направлении.

Аналогичные линии определяют зону \bar{A} - без проскальзывания НК, зону \bar{B} - проскальзывания НК в одном направлении и зону \bar{C} - проскальзывания НК в обратном направлении.

Звездой или чертой сверху обозначены компоненты, относящиеся соответственно к твэлам или НК.

Согласно гипотезе плоских сечений напряжения в твэлах при отсутствии проскальзывания определяются зависимостью

$$\sigma^* = E^*(K_x - K_x^*)y + E^*(K_y - K_y^*)x + E^*(\varepsilon_0 - \varepsilon_0^*); \quad (12)$$

в зонах проскальзывания напряжения равны

$$\sigma^* = \sum_{i=1}^j \sigma_{T,i}^* \text{sign}(\sigma^*) - p_u K. \quad (13)$$

Напряжения в НК при отсутствии проскальзывания определяются из зависимости

$$\bar{\sigma} = \bar{E}(K_x - \bar{K}_x)y + \bar{E}(K_y - \bar{K}_y)x + \bar{E}(\varepsilon_0 - \bar{\varepsilon}_0), \quad (14)$$

а в зонах проскальзывания напряжения в НК равны

$$\bar{\sigma} = \sum_{i=1}^j \bar{\sigma}_{T,i} \text{sign}(\bar{\sigma}) - \frac{N_0}{\bar{F}} - p. \quad (15)$$

Здесь обозначено $\sigma_{T,i}^* = \frac{T_0^*}{F^*}$; $\bar{\sigma}_{T,i} = \frac{\bar{T}_0}{\bar{F}}$; T_0^* и \bar{T}_0 - максимальные значения усилий трения в твэльных ячейках и ячейках НК, определяемые по усилиям поджатия стержней в ячейках.

На данном этапе предполагается, что усилия T_0^* и \bar{T}_0 однородны для данной ДР (используется усредненное значение); p - давление теплоносителя; p_u - избыточное

внешнее давление на оболочку твэла; $K = \frac{F_0}{F^*}$, F_0 , F^* и \bar{F} - площади поперечных сечений твэла, оболочки твэла и трубки НК. K_x и K_y - кривизны оси балки-ТВС в плоскостях YOZ и XOZ, а X и Y - координаты расположения центров твэлов и трубок НК в поперечном сечении ТВС; ε_0 - осевое удлинение в центре тяжести сечения.

Коэффициенты $K_{x,y}^*$, $\bar{K}_{x,y}$, ε_0^* и $\bar{\varepsilon}_0$ учитывают свободные удлинения твэлов и НК от температурных расширений, радиационного роста и хрупких механизмов.

Приведенные модули упругости [2] определяются зависимостями

$$E^* = \frac{E_T^*}{1 + E_T^* A^* t}, \quad \bar{E} = \frac{\bar{E}_T}{1 + \bar{E}_T \bar{A} t}, \quad (16)$$

где E_T^* и \bar{E}_T - модули упругости материалов оболочек твэлов и трубок НК при рабочей температуре; t - время облучения.

Коэффициенты A^* и \bar{A} характеризуют внутриреакторную ползучесть циркониевых сплавов, используемых для оболочек твэлов и трубок НК:

$$\xi_{\varphi}^c = A\sigma = A_{\varphi} \exp\left(-\frac{Q}{T}\right) \varphi \sigma,$$

где A_{φ} , Q - константы радиационной ползучести материалов, T - температура (К), φ - плотность потока нейтронов с энергией ($E > 0,1$ МэВ).

Условия равновесия для поперечных сечений балки-ТВС дают

$$M_x = N_q \sum_{i=1}^j (V_{yi} + U_{yi} + U_{y0i}) - M_x^n = \sum_{TB} \sigma_z^* F^* y + \sum_{HK} \bar{\sigma}_z \bar{F} y; \quad (17)$$

$$M_y = N_q \sum_{i=1}^j (V_{xi} + U_{xi} + U_{x0i}) - M_y^n = \sum_{TB} \sigma_z^* F^* x + \sum_{HK} \bar{\sigma}_z \bar{F} x; \quad (18)$$

$$N_z = -N + N_q \cdot j - (q - q_r)Z - pF_0 n_{\Sigma} = \sum_{TB} \sigma_z^* F^* + \sum_{HK} \bar{\sigma}_z \bar{F}, \quad (19)$$

где M_x , M_y , N_z - изгибающие моменты и продольная сила в данном сечении балки; M_x^n и M_y^n - изгибающие моменты от приложенных к ДР моментов, определяемых в задаче поперечного изгиба ТВС (см. выше); N_q - гидравлическая сила, действующая на одну решетку; $q = q^* + \bar{q}$ - усредненный вес единицы длины ТВС; $q_r = q_r^* + \bar{q}_r$ - усредненная по длине гидравлическая сила трения, приходящаяся на единицу длины ТВС; $N = N_0 k_{\Sigma}$ - общая осевая сила от пружинного блока ТВС.

Дискретное суммирование напряжений в правых частях уравнений (17)-(19) существенно осложняет решение задачи, поэтому применяется процедура "размазывания" сечений оболочек твэлов по площадям твэльных ячеек. Сечение ТВС представляется заполненным некоторой непрерывной (твэльной) средой с условным приведенным модулем

$$E_{\text{я}}^* = E^* \frac{F^*}{F_{\text{я}}^*},$$

где $F_{\text{я}}^* = \frac{\sqrt{3}}{2} S_{\text{я}}^2$ - площадь ячейки одного твэла для треугольной упаковки твэлов в ТВС, $S_{\text{я}}$ - расстояние между центрами твэлов.

Аналогичная процедура "размазывания" проводится для сечений трубок НК с использованием эквивалентного приведенного модуля "размазанной" среды НК

$$E_{\text{я}} = E \frac{2F}{\sqrt{3}d_{\text{нк}}^2}, \text{ где } d_{\text{нк}} - \text{усредненное расстояние между центрами рядом стоящих НК.}$$

$$\text{Площадь ячейки одного НК } F_{\text{я}} = \frac{\sqrt{3}}{2} d_{\text{нк}}^2.$$

Используя зависимости для напряжений (12)-(15) и применяя процедуру "размазывания" сечений твэлов и НК, уравнения равновесия (17)-(19) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} M_x = & E_{\text{я}}^* (K_x - K_x^*) J_x(A) + E_{\text{я}}^* (K_y - K_y^*) J_{xy}(A) + \\ & + E_{\text{я}}^* (\varepsilon_0 - \varepsilon_0^*) S_x(A) + \frac{F^*}{F_{\text{я}}} [S_x(B) - S_x(C)] \left(\sum_{i=1}^j \sigma_{T,i}^* - pK \right) + \end{aligned}$$

$$+E_3(K_x - \bar{K}_x)J_x(\bar{A}) + E_3(K_y - \bar{K}_y)J_{xy}(\bar{A}) + \\ +E_3(\varepsilon_0 - \bar{\varepsilon}_0)S_x(\bar{A}) + \frac{F}{F_j} [S_x(\bar{B}) - S_x(\bar{C})] \left(\sum_{i=1}^j \bar{\sigma}_{T,i} - N_{HK}/F - p \right); \quad (20)$$

$$M_y = E_j^*(K_x - K_x^*)J_{xy}(A) + E_j^*(K_y - K_y^*)J_y(A) + \\ +E_j^*(\varepsilon_0 - \varepsilon_0^*)S_y(A) + \frac{F^*}{F_j} [S_y(B) - S_y(C)] \left(\sum_{i=1}^j \sigma_{T,i}^* - pK \right) + \\ +E_3(K_x - \bar{K}_x)J_{xy}(\bar{A}) + E_3(K_y - \bar{K}_y)J_y(\bar{A}) + \\ +E_3(\varepsilon_0 - \bar{\varepsilon}_0)S_y(\bar{A}) + \frac{\bar{F}}{\bar{F}_j} [S_y(\bar{B}) - S_y(\bar{C})] \left(\sum_{i=1}^j \bar{\sigma}_{T,i} - N_{HK}/\bar{F} - p \right); \quad (21)$$

$$N_z = E_j^*(K_x - K_x^*)S_x(A) + E_j^*(K_y - K_y^*)S_y(A) + \\ +E_j^*(\varepsilon_0 - \varepsilon_0^*)F(A) + \frac{F^*}{F_j} [F(B) - F(C)] \left(\sum_{i=1}^j \sigma_{T,i}^* - pK \right) + \\ +E_3(K_x - \bar{K}_x)S_x(\bar{A}) + E_3(K_y - \bar{K}_y)S_y(\bar{A}) + \\ +E_3(\varepsilon_0 - \bar{\varepsilon}_0)F(\bar{A}) + \frac{\bar{F}}{\bar{F}_j} [F(\bar{B}) - F(\bar{C})] \left(\sum_{i=1}^j \bar{\sigma}_{T,i} - N_{HK}/\bar{F} - p \right). \quad (22)$$

Здесь $J_x(A)$, $J_y(A)$, $J_{xy}(A)$, $S_x(A)$, $S_y(A)$, $F(A)$, $J_x(\bar{A})$, $J_y(\bar{A})$ и др. - моменты инерции, статические моменты и площади зон А, В, С для твэлов и зон \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} для НК.

Указанные геометрические характеристики выражаются через величины отрезков на осях $X_0, Y_0, X'_0, Y'_0, \bar{X}_0, \bar{Y}_0, \bar{X}'_0, \bar{Y}'_0$ линий границ проскальзывания (рис. 3), которые зависят от величин K_x, K_y и ε_0 . Из системы уравнений (20) - (22) могут быть определены величины K_x, K_y и ε_0 для различных сечений по длине ТВС.

По кривизнам в сечениях могут быть определены прогибы балки (ТВС) из решения дифференциальных уравнений

$$\frac{d^2 V_x}{dz^2} = -K_y(z); \quad \frac{d^2 V_y}{dz^2} = -K_x(z). \quad (23)$$

При этом для различных вариантов закрепления концов балки должны быть выполнены соответствующие граничные условия на концах балки.

Для рассмотренных выше уравнений исходными данными являются жесткости на поворот твэльных ячеек и ячеек НК, а также максимальные значения сил трения в ДР на твэлах и каналах. Эти характеристики существенно изменяются в процессе эксплуатации и определяются из расчета деформаций дистанционирующих решеток.

Максимальные значения сил трения в твэльных ячейках с тремя линиями контакта и ячейках НК с шестью линиями контакта определяются для v -ого временного шага по следующим зависимостям:

$$T_v^* = 3f^* p_v^* \ell, \quad \bar{T}_v = 6\bar{f} \cdot \bar{p}_v \ell, \quad (24)$$

где ℓ - высота решетки, f^* и \bar{f} - коэффициенты трения для твэлов и НК.

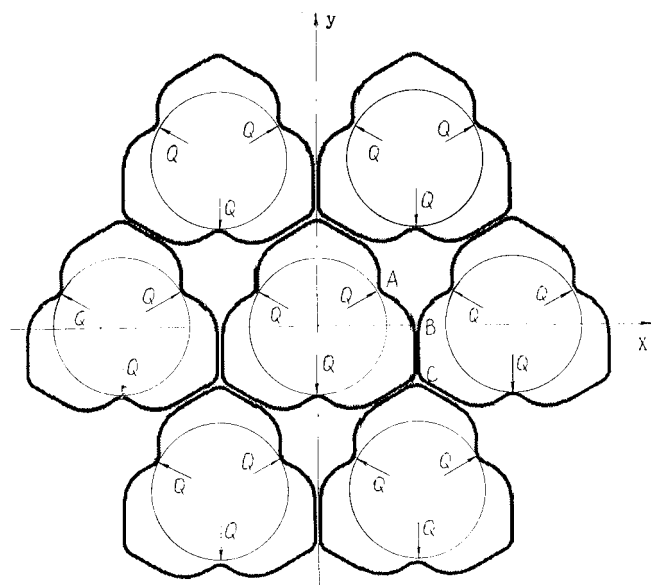


Рис. 4. Схема нагружения твэльных ячеек ДР после сборки. Нагрузка на линии контакта твэла с ячейкой ДР $Q = pl$

$$p_v^* = \left(\frac{p_{(v-1)}^*}{E_v^r} + G^* R \Delta \epsilon_0 \right) E_v^r$$

- усилие поджатия на одной из трех линий контакта твэла с ячейкой ДР для временного шага $\Delta t = t_v - t_{v-1}$, определенное согласно теории ползучести старения; E_v^r и E_v^r - исходный и приведенный модули упругости материала ДР для временного шага Δt ; $R \Delta \epsilon_0$ - изменение радиуса оболочки твэла за время Δt ; G^* - относительная поперечная жесткость твэльной ячейки, определяемая из решения трехмерной задачи деформирования моде-

ли ДР, состоящей из 7 смежных твэльных ячеек (см. схему на рис. 4) с помощью конечно-элементной программы ANSYS.

Аналогично определяется усилие поджатия на линии контакта НК с ячейкой ДР в случае использования каркаса с закреплением НК в ДР на трении. В варианте исполнения ТВС с жестким каркасом, у которого НК соединены с ДР точечной сваркой (так называемая ТВС-2), в зависимости (24) принимается $\bar{T}_v \rightarrow \infty$.

Функции жесткости на поворот твэлов C^* и направляющих каналов \bar{C} при искривлении ТВС определяются из решения трехмерных задач деформирования отдельных ячеек, нагруженных по линиям контакта или сварным точкам, с учетом взаимодействия их с двумя соседними рядами ячеек ДР (модель включает в себя 19 для C^* или 18 для \bar{C} ячеек). При этом используется конечно-элементный код ANSYS и учитываются особенности взаимодействия ячеек, связанных между собой точечной сваркой (рис. 4).

Численное решение представленных выше систем уравнений было реализовано с использованием приема построения их в конечных разностях и специальных алгоритмов сжатия матриц в расчетном коде ТЕРМОК.

Литература

1. Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И. Общая постановка исследований термомеханического поведения активной зоны ВВЭР-1000 // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2002. - № 2.
2. Забудько Л.М., Лихачев Ю.И., Прошкин А.А. Работоспособность ТВС быстрых реакторов. - М.: Энергоатомиздат, 1988.

Поступила в редакцию 25.05.2002

reactor core. Background for developing a correspondent methodology related with occurred bowing and deformation of fuel assemblies (FA) under operation, jamming of the rod cluster control assemblies (RCCA), and generation of enhanced inter-FA gaps impacting on local energy release in fuel, is under consideration. Schematization of WWER-1000 FA and reactor core design is outlined and implemented for developing the procedure for calculation of thermomechanical behaviour of the FA integrated into WWER-1000 reactor core. The description presents computational models, which are implemented for validation of thermomechanical behaviour of the WWER-1000 reactor cores and development of recommendations for the design improvement.

УДК 621.039.54

Calculation Method on the Longitudinal and Transversal Bowing of WWER-1000 Core Subassemblies under Operation \V.M. Troyanov, Y.U. Likhachev, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 10 pages, 4 illustrations. - References, 2 titles.

The paper reviews calculation method on the longitudinal and transversal bowing of WWER-1000 core subassemblies under operation. The method is based on the beam-pivot modelling of the sub-assembly (FA) bowing. FA is simulated by the multi-tied pivot system. Calculation method of non-linear FA bowing takes into account irradiation effects for structure materials, friction and slipping of fuel rods within spacer grids, external forces, weight acting, hydraulic forces etc. The solution of non-linear equation system is realized by the computer code "TEREMOK".

УДК 629.76:629.78

Application of Nuclear Photon Engines for Deep-space Exploration \A.V. Gulevich, A.V. Zrodnikov, Eu.A. Ivanov, O.F. Kukharchuk, D.V. Evtodiev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 1 table, 3 illustrations. - References, 11 titles.

Conception of using the nuclear photon rocket engines for deep space exploration is proposed. Some analytical estimations have been made to illustrate the possibility to travel to 100 – 10000 AU using a small thrust photon engine. Concepts of high temperature nuclear reactors for the nuclear photon engines are also discussed.

УДК 502.3 (470.333)

Implementation of Neural Networks for Assessment of Surface Density Contamination with ^{90}Sr (For Territory of Bryansk Region as an Example) \R. Parkin, M. Kanevsky, E. Saveleva, I. Pichugina, B. Yatsalo; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 7 pages, 2 tables, 5 illustrations. - References, 10 titles.

The joint spatial analysis of surface density contamination of Bryansk region with radionuclides ^{90}Sr and ^{137}Cs is considered. Fallouts of these radionuclides as a result of the Chernobyl accident are correlated, that allows investigating their joint spatial structure and improving quality of spatial interpolation. The application of artificial neural network (Multilayer Perceptron) for an estimation of surface density contamination with ^{90}Sr is described. As a result of implementation of this approach the detailed maps of contamination with ^{90}Sr and ^{137}Cs for Bryansk region were created that is used in geoinformation decision support system for rehabilitation of radioactive contaminated territories.

УДК 574.4:502.3

Ecological Risk. 1. The Origin of Risk in Agrosphere and Natural Ecosystems under Pollution of the Environment \E.S. Fesenko, B.I. Synzynys; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 11 pages. - References, 21 titles.

The most fundamental problems for contaminated land risk assessment relate to bioavailability of contaminants relative to the study of bioavailability and toxicity criteria. Approach to risk assessment normally consist of three general components. Monitoring of biomarkers, bioconcentration, indicator species, changes in community structure. These indicators are seldom used in current risk