

СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ	<i>М.В. Кащеев</i> Моделирование стратификации компонент кориума при тяжелой аварии3
ФИЗИКА И ТЕХНИКА РЕАКТОРОВ	<i>В.М. Троянов, Ю.И. Лихачев, В.И. Фоломеев</i> Моделирование термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000.....14 <i>В.М. Троянов, Ю.И. Лихачев, В.И. Фоломеев</i> Расчетное моделирование термомеханического поведения активной зоны ВВЭР-1000 в авариях с потерей теплоносителя.....19 <i>В.М. Троянов, Ю.И. Лихачев, В.И. Фоломеев</i> Метод расчета сейсмического воздействия на активную зону ВВЭР-1000.....26 <i>Н.М. Каджури</i> Анализ аварии разгона быстрого реактора в приближении «мгновенного скачка».....34
ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОГИДРАВЛИКА	<i>В.Т. Буглаев, А.А. Анисин</i> Влияние геометрических параметров сфероидальных элементов рельефа и схемы их расположения на тепловую эффективность пластинчатой поверхности теплообмена.....39 <i>А.В. Безносков, С.С. Пинаев, М.А. Камнев, А.В. Назаров, П.В. Романов</i> Уменьшение МГД-сопротивления путем формирования электроизолирующих покрытий в контурах с жидкими металлами применительно к реактору ТОКАМАК.....50
ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ	<i>М.Н. Каткова, Я.И. Газиев, Г.И. Петренко, А.М. Полухина</i> Загрязнение стронцием-90 водных экосистем в западных районах Брян- ской области, пострадавших от Чернобыльской аварии.....53 <i>С.М. Рудая, О.В. Чистик, И.И. Матвеевко</i> Распределение ¹³⁷ Cs по «гранулометрическим» фракциям почв тридцатикилометровой зоны Чернобыльской АЭС.....59 <i>Г.И. Сидоров, В.М. Поплавский, А.А. Кричко, А.С. Малолетнев</i> Экологические аспекты массового производства моторных топлив из бурых углей и тяжелых нефтяных остатков методом гидрогенизации с применением ядерных технологий.....67 <i>Е.С. Фесенко, Б.И. Сынзыныс</i> Экологический риск. Сообщение 2. Оценка экспозиции при определении риска в агросфере.....77
ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ	<i>О.Г. Герасимчук, В.И. Орлов, В.Ф. Украинцев</i> Анализ характеристик топливных циклов повышенной длительности реакторов ВВЭР.....88 <i>О.Г. Герасимчук, В.И. Орлов, В.Ф. Украинцев</i> Анализ и прогнозирование экономических характеристик топливных циклов реакторов ВВЭР.....95

CONTENTS

SAFETY, RELIABILITY AND DIAGNOSTICS NPP	<i>M.V. Kachtchev</i> Modeling of Corium Components Stratification at Severe Accident.....3
REACTOR PHYSICS AND TECHNOLOGY	<i>V.M. Troyanov, Y.U. Likhachev, V.I. Folomeev</i> Simulation of Thermomechanical Behaviour of Fuel Assemblies in the WWER-1000 Reactor Core.....14 <i>V.M. Troyanov, Y.U. Likhachev, V.I. Folomeev</i> Computational Simulation of Thermomechanical Behaviour of the WWER-1000 Reactor Core under Loss-of-Coolant Accidents.....19 <i>V.M. Troyanov, Y.U. Likhachev, V.I. Folomeev</i> The Procedure for Calculating Seismic Impact on the WWER-1000 Reactor Core.....26 <i>N.M. Kadjuri</i> Analysis of Failure of a Fast Reactor Runaway in Approach of Zero Lifetime of Prompt Neutrons.....34
THERMAL PHYSICS AND HEATHYDRAULICS	<i>V.T. Buglaev, A.A. Anisin</i> Influence of Geometrical Parameters of Surface Spheriodical Elements and the Scheme of Their Arrangement on Heat Efficiency of Heat- Exchange Plate Surface.....39 <i>A.V. Beznosov, S.S. Pinaev, M.A. Kamnev, A.V. Nazarov, P.V. Romanov</i> Magnetohydrodynamic Resistance Reduction by Forming Oxide Electroinsulated Coatings on Channels with Heavy Liquid Metal Coolants of TOKAMAK Reactor.....50
ENVIROMENTAL ASPECTS OF POWER ENGINEERING	<i>M.N. Katkova, Ya.I. Gaziev, G.I. Petrenko, A.M. Polukhina</i> ⁹⁰ Sr Contamination of Water Ecosystems in Bryansk Regions Damaged after Chernobyl Accident.....53 <i>S.M. Rudaya, O.V. Chistik, I.I. Matveenko</i> Distribution of ¹³⁷ Cs on ""grain-size"" fractions in soils at the 30 km restricted zone around Chernobyl NPP.....59 <i>G.I. Sidorov, V.M. Poplavsky, A.A. Kritchko, A.S. Maloletnev</i> Ecological Aspects of Mass Production of Motor Fuels from Brown Coals and Heavy Petroleum Residuals by Hydrogenation with the Use of Nuclear Technologies.....67 <i>E.S. Fesenko, B.I. Synzynys</i> Ecological risk assessment. 2. Estimation of Exposition at Definition of Risk in Agrosphere.....77
FUEL CYCLE AND RADIOACTIVE WASTES MANAGEMENT	<i>O.G. Gerasimchuk, V.I. Orlov, V.F. Ukraintsev</i> The Analysis of the VVER reactor Characteristics for Prolonged Duration Fuel Cycles.....88 <i>O.G. Gerasimchuk, V.I. Orlov, V.F. Ukraintsev</i> The Analysis and Prediction of the VVER Reactors Fuel Cycle Economical Characteristics95

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРАТИФИКАЦИИ КОМПОНЕНТ КОРИУМА ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

М.В. Кащеев

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



Предложена замкнутая модель стратификации, получившая название гомогенно-диффузионной математической модели взаимодействия кориума с корпусом реактора. Разработана гетерогенная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора и выполнен анализ возможности ее применения для описания стратификации компонент кориума. В соответствии с результатами расчетов выявлена заметная стратификация смеси. Показано, что полная стратификация, принятая в ряде работ, невозможна. Допущение о полной стратификации является идеализацией, но его можно рассматривать как крайний, предельный случай.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка детального расчетного кода, предназначенного для анализа взаимодействия кориума с внутрикорпусными устройствами и корпусом реактора ВВЭР с учетом его особенностей, связана с решением целого ряда проблем фундаментального характера. В частности, до сих пор не решена проблема стратификации компонент расплава, которая является сложной научной проблемой. Ее решение необходимо для определения распределения энерговыделения и теплофизических свойств смеси по объему расплава, теплоотвода от расплава. Отметим, что термин «стратификация» имеет смысл расслоения, распределения концентрации компонент смеси по ее объему.

В ряде работ, например, [1,2], принимается полная стратификация компонент кориума. Предлагаемая работа посвящена созданию математической модели, описывающей стратификацию компонент кориума. В отличие от строго гомогенной постановки [3] в данной работе рассматривается гомогенная смесь компонент кориума, в которой учитывается диффузия компонент, т.е. гомогенная математическая модель дополняется рассмотрением переноса массы компонент смеси диффузией и конвекцией [4]. Отметим, что основной более легкой компонентой расплава является сталь.

Гетерогенные смеси в общем случае описываются многоскоростной моделью с учетом динамических эффектов из-за несовпадения скоростей фаз. В гетерогенных средах относительное движение фаз определяется не только процессами диффузионного характера, связанного со столкновением и хаотическим движением частиц включений, но и процессами взаимодействия фаз как макроскопических систем, причем они описываются с помощью сил межфазного взаимодействия. Соответственно в предлагаемой работе создана гетерогенная математическая модель и выполнен

анализ возможности ее применения для расчета взаимодействия кориума с корпусом реактора.

ГОМОГЕННО-ДИФFUЗИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Постановка задачи

Исходная система уравнений сохранения массы, импульса и энергии, записанная для смеси компонент кориума в двумерной цилиндрической системе координат, представлена ниже [5].

Уравнение неразрывности для смеси

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0. \quad (1)$$

Уравнения движения для смеси

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \cdot r \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{V} \right) \right] - \rho g, \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \cdot r \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{V} \right) \right] - \frac{\mu}{r} \left[2 \frac{v_r}{r} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{V} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right].$$

Распределение концентрации жидкой стали в кориуме описывается уравнением конвективной диффузии

$$\rho \left(\frac{\partial c}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial c}{\partial r} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho D_{rd} \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_{zd} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + q_{c1,st} + q_{c2,st}, \quad (3)$$

где $q_{c1,st}$, $q_{c2,st}$ - источники концентрации стали, обусловленные плавлением стенки корпуса и твердых включений стали.

Уравнение энергии для смеси

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho c_p v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \rho c_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho (c_{p2} - c_{p1}) \cdot \left\{ (T - 273) \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{rd} \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zd} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right] + D_{rd} \frac{\partial c}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + D_{zd} \frac{\partial c}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right\} + q_v, \quad (4)$$

где q_v учитывает остаточное тепловыделение и тепло химических реакций.

Для стенки корпуса записывается уравнение нестационарной теплопроводности

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (5)$$

В дальнейшем для величин, относящихся к области смеси, будем использовать индекс 1, а для величин, относящихся к стенке корпуса, - индекс 2.

Граничные условия

- нормальная компонента скорости на верхней поверхности смеси равна нулю

$$v_z = 0; \quad (6)$$

- для касательной компоненты скорости на верхней поверхности смеси имеем условие Марангони

$$\frac{\partial v_r}{\partial z} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial T_1}{\partial r}, \quad (7)$$

где коэффициент поверхностного натяжения равен

$$\sigma = \sigma_l [1 - b_\sigma (T_1 - T^l)]; \quad (8)$$

- на оси симметрии для скорости v_z выполняется условие симметрии, а скорость v_r равна нулю

$$\frac{\partial v_z}{\partial r} = 0, \quad (9)$$

$$v_r = 0;$$

- на твердых стенках, а также на поверхности фронта плавления накладывается условие прилипания

$$v_z = v_r = 0; \quad (10)$$

- на верхней поверхности смеси

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0; \quad (11)$$

- на твердых стенках

$$c = 0; \quad (12)$$

- теплоотдача от верхней поверхности смеси осуществляется излучением и естественной конвекцией пара

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \alpha_1 (T_1 - T_{out1}) + \varepsilon_{eff1} \sigma_{SB} (T_1^4 - T_{out1}^4); \quad (13)$$

- на наружной поверхности стенки корпуса также ставится граничное условие 3-го рода с учетом излучения

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_2 (T_2 - T_{out2}) + \varepsilon_{eff2} \sigma_{SB} (T_2^4 - T_{out2}^4); \quad (14)$$

- на фронте плавления задается температура плавления стали корпуса и записывается условие для определения положения фронта плавления в любой момент времени

$$T_1 = T_2 = T_{m2}; \quad (15)$$

$$\rho_2 L_{m2} \frac{\partial \xi}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad (16)$$

$$\rho_2 L_{m2} \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}; \quad (17)$$

- на оси симметрии выполняется условие симметрии для температуры

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0. \quad (18)$$

Начальные условия

$$\begin{aligned}
 v_z(0, r, z) &= v_{z0}; \\
 v_r(0, r, z) &= v_{r0}; \\
 p(0, r, z) &= p_0; \\
 c(0, r, z) &= c_0; \\
 T_1(0, r, z) &= T_{10}; \\
 T(0, r^*, z^*) &= T_{m2}; \\
 T_2(0, r, z) &= T_{20}.
 \end{aligned} \tag{19}$$

Замыкающие коэффициенты и функции

Источники концентрации жидкой стали в смеси от плавления стенки по смыслу

$$q_{c1,st} = \frac{\Delta m}{\Delta \tau \Delta V_{mix}} \tag{20}$$

приращение массы жидкой стали Δm за время $\Delta \tau$ в элементарном объеме.

$$q_{c1,st} = \frac{\rho_{st} 2\pi r \Delta \xi \Delta z}{\Delta \tau 2\pi r \Delta r \Delta z} = \frac{\rho_{st} \Delta \xi}{\Delta \tau \Delta r}, \tag{21}$$

где $\Delta \xi$ - приращение ξ за время $\Delta \tau$, ξ - поперечная координата точек фронта плавления, Δr имеет смысл пристенного («прифронтового») шага при конечно-разностной аппроксимации задачи.

Далее

$$q_{c1,st} = \lim_{\substack{\Delta \tau \rightarrow 0 \\ \Delta r \rightarrow 0}} \frac{\rho_{st} \Delta \xi}{\Delta \tau \Delta r} = \rho_{st} \cdot \lim_{\substack{\Delta \tau \rightarrow 0 \\ \Delta r \rightarrow 0}} \frac{\xi(r + \Delta r; \tau + \Delta \tau) - \xi(r, \tau)}{\Delta \tau \Delta r}. \tag{22}$$

Разложим функцию $\xi(r + \Delta r, \tau + \Delta \tau)$ в ряд Тейлора, ограничившись главными членами. Подставив разложение в (22) и проведя преобразования, получим

$$q_{c1,st} = \rho_{st} \frac{\partial^2 \xi(r, \tau)}{\partial r \partial \tau}. \tag{23}$$

В случае кривой стенки

$$q_{c1,st} = \rho_{st} \frac{\partial^2 \xi_N(z, r, \tau)}{\partial N \partial \tau}, \tag{24}$$

где N - нормаль.

Источники концентрации жидкой стали в смеси при плавлении твердых включений стали в жидком кориуме определяются следующим образом.

Рассмотрим ячейку диаметром d_c в которой содержится «крупинка» стали диаметром d_p и смесь объемом ΔV_{mix} с температурой t_{mix} . Выразим объем смеси ΔV_{mix} под-

веденное к «крупинке» стали тепло Q , величину $\Delta m = \frac{Q}{L}$ и воспользуемся соотношением (20). Для $q_{c2,st}$ получим

$$q_{c2,st} = \frac{6d_p^2 \alpha (t_{mix} - t_{m,st}) d_p^3}{L d_p^3 \left(1 - \left(\frac{d_p}{d_c} \right)^3 \right) d_c^3} = \frac{6\alpha (t_{mix} - t_{m,st})}{L d_p} \frac{\varepsilon_c}{1 - \varepsilon_c}, \tag{25}$$

где объемная доля твердой стали $\varepsilon_c = \left(\frac{d_p}{d_c}\right)^3$.

Введем число Нуссельта $Nu = \frac{\alpha d_p}{\lambda_{mix}}$. Выражение для $q_{c2,st}$ примет вид

$$q_{c2,st} = \frac{6Nu\lambda_{mix}(t_{mix} - t_{m,st})}{Ld_p^2} \frac{\varepsilon_c}{1 - \varepsilon_c}. \quad (26)$$

Неопределенными являются Nu, d_p, ε_c .

Если скорости смеси около «крупинки» стали малы (что выполняется), то $Nu=2$ [6].

Текущий размер (изменение во времени) «крупинки» определяется в результате решения задачи Стефана для шара методом Лейбензона. Для затвердевания шара она решена С.С. Ковнером [7]. При плавлении стали время расплавления («крупинки») находится как

$$\tau = \frac{L\rho_{st}(\eta - r_0)^2(2\eta + r_0)}{6\lambda_{mix}(t_{mix} - t_{m,st})r_0}, \quad (27)$$

где r_0 - радиус «крупинки».

Отсюда можно найти $\eta(\tau)$, воспользовавшись методом Вегстейна [8]. Текущая объемная доля стали равна

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 \left(\frac{\eta}{r_0}\right)^3, \quad (28)$$

где $\varepsilon_0 = \varepsilon_c(0)$.

Задав ε_0 и $d=2r_0$, можно получить источник концентрации жидкой стали в смеси при плавлении твердых включений стали в жидком корииуме:

$$q_{c2,st} = \frac{3Nu\lambda_{mix}(t_{mix} - t_{m,st})}{2L\eta^2} \frac{\varepsilon_c}{1 - \varepsilon_c}. \quad (29)$$

Поскольку ε_c пропорциональна η^3 , то $\lim_{\eta \rightarrow 0} q_{c2,st} = 0$.

Коэффициенты диффузии жидкой стали в смеси в задаче о стратификации жидкой стали в корииуме находятся как

$$\begin{aligned} D_{zd} &= 0,056|\nu_z|R_0 \text{Re}_z^{-\frac{1}{4}}; \\ D_{rd} &= 0,056|\nu_r|R_0 \text{Re}_r^{-\frac{1}{4}}, \end{aligned} \quad (30)$$

где

$$\text{Re}_z = \frac{|\nu_z|R_0}{\nu_{mix}}, \quad \text{Re}_r = \frac{|\nu_r|R_0}{\nu_{mix}}.$$

Распределения остаточного энерговыделения, плотности, теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и вязкости, обусловленные стратификацией, по радиусу

и высоте смеси выражаются формулами, полученными и приведенными в [9].

Область решения задачи-половина симметричного сечения цилиндра с эллиптическим дном.

Для решения задачи используется неявный метод решения уравнений Навье-Стокса в естественных переменных (метод В.К. Артемьева - Н.И. Булеева), разработанный в ГНЦ РФ-ФЭИ [10].

ГЕТЕРОГЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В общем случае проблема многофазного движения в рамках многоскоростной (многожидкостной) модели сводится к заданию условий совместного движения фаз и определению величин, описывающих внутрифазные и межфазные взаимодействия.

В условиях рассматриваемой задачи вследствие слабой нестационарности течения сила Бассэ [11] мала и ее можно не учитывать. Поскольку градиенты скорости несущей среды малы, то сила Магнуса [4] также мала. С учетом того, что плотности несущей среды и жидкости в капле близки, присоединенной массой можно пренебречь [12]. Какие-либо другие эффекты и силы, рассматриваемые в теории, в данном случае тем более заведомо малы или отсутствуют. Таким образом, путем анализа выявлены основные силы, действующие на каплю жидкости и требующие обязательного учета в гетерогенной модели стратификации.

Рассмотрим движение смеси, которое описывается системой уравнений (1-4), и относительное движение более легких компонент (например, жидкой стали). Далее приведем вывод соотношений для определения скоростей рассматриваемой компоненты. Будем рассматривать неподвижную систему координат, ось OZ которой направлена вертикально вверх. Используем 2 закон Ньютона для Δm_{st} . В дальнейшем под Δm_{st} будем понимать $\Delta m_{st} = \rho_{st} \Delta V_{st}$, где $\Delta V_{st} = 4/3\pi a^3$ - объем капли стали, имеющей форму шара с радиусом a . На основании 2 закона Ньютона

$$\Delta m_{st} \frac{dw_z}{d\tau} = \sum_i F_i, \quad (31)$$

где $\sum_i F_i$ - сумма всех сил, действующих на каплю.

В рассматриваемом случае

$$\sum_i F_i = F_A - F_g - F_\mu, \quad (32)$$

где F_A , F_g , F_μ являются силами Архимеда, тяжести и сопротивления соответственно.

Сила Архимеда выражается как

$$F_A = g \rho_{mix} \Delta V_{st}, \quad (33)$$

сила тяжести

$$F_g = g C \Delta V_{mix}, \quad (34)$$

а сила сопротивления

$$F_\mu = C_\mu \pi a^2 \frac{\rho_{st} w_{st}}{2} \frac{C}{\rho_{st}} \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right). \quad (35)$$

Отметим, что коэффициент сопротивления C_μ определяется в соответствии с [4] следующим образом:

$$C_{\mu} = \begin{cases} \frac{24}{Re_d}, & \text{если } Re_d < 10 \\ 48 \cdot \left(1 - \frac{2.2}{\sqrt{Re_d}}\right) \cdot \frac{1}{Re_d}, & \text{если } Re_d \geq 10, \end{cases} \quad (36)$$

где $Re_d = \frac{2a|w_z|}{v_m}$ - число Рейнольдса капли стали.

Подставляя выражения (34) (35) в уравнение 2 закона Ньютона, принимая во внимание (36) и учитывая, что

$$\frac{\Delta V_{st}}{\Delta V_{mix}} = \frac{C}{\rho_{st}},$$

получим

$$w_z \frac{dw_z}{dz} = g \left(\frac{\rho_{cor}}{\rho_{st}} - 1 \right) \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right) - \frac{3}{8} C_{\mu} \frac{w_z^2}{a} \frac{C}{\rho_{st}} \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right). \quad (37)$$

Перепишем (37) в безразмерном виде:

$$\frac{dW_z^2}{dZ} = \left(\frac{\rho_{cor}}{\rho_{st}} - 1 \right) \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right) - \frac{3}{4} C_{\mu} \frac{R_o W_z^2}{a} \times \frac{C}{\rho_{st}} \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right). \quad (38)$$

Уравнение (38) можно записать следующим образом:

$$\frac{dW_z^2}{dZ} + P_z(C)W_z^2 = Q_z(C), \quad (39)$$

где

$$P_z(C) = \frac{3}{4} C_{\mu} \frac{R_o}{a} \frac{C}{\rho_{st}} \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right), \quad Q_z(C) = \left(\frac{\rho_{cor}}{\rho_{st}} - 1 \right) \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right).$$

Уравнение (39) представляет собой линейное дифференциальное уравнение первого порядка относительно W_z^2 . Его решение с учетом того, что $W_z(Z_0)=0$, имеет вид

$$W_z = \sqrt{e^{-\int_{Z_0}^Z P_z dZ'} \left[\int_{Z_0}^Z Q_z e^{\int_{Z_0}^{Z'} P_z dZ'} dZ' \right]}. \quad (40)$$

Абсолютная скорость V_z находится как

$$V_z = W_z + V_{z,mix}. \quad (41)$$

Для определения скорости V_r используем уравнение неразрывности

$$\frac{\partial C}{\partial H_0} + \frac{\partial(CV_z)}{\partial Z} + \frac{\partial(CV_r)}{\partial R} + \frac{CV_r}{R} = 0. \quad (42)$$

Представим (42) в виде

$$\frac{\partial(CV_r)}{\partial R} + P(R)(CV_r) = Q(R,Z), \quad (43)$$

где

$$P(R) = \frac{1}{R}, \quad Q(R, Z) = -\frac{\partial(CV_z)}{\partial Z} - \frac{\partial C}{\partial \theta_0}.$$

Уравнение (43) аналогично уравнению (39). Его решение

$$V_r = \frac{1}{CR} \int_0^R Q_R R dR. \tag{44}$$

Таким образом, скорости V_z , V_r более легкой компоненты определяются по формулам (40), (41) и (44).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изложенная выше гетерогенная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора реализована в виде кода PPRKRS [13] (программа прогнозирования разрушения корпуса реактора с учетом стратификации компонент кориума), разработанного на базе кода ВРКР [5].

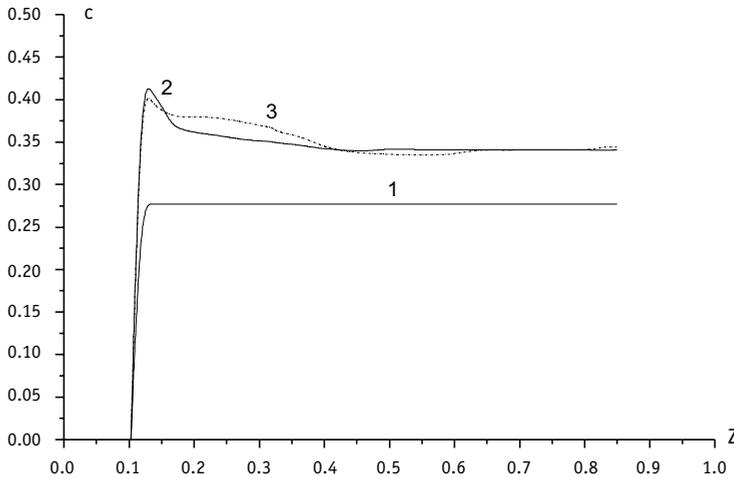


Рис.1. Распределение концентрации по координате Z при R=0,27 в различные моменты времени: 1 - $\tau = 0$; 2 - $\tau = 600$ с; 3 - $\tau = 1200$ с

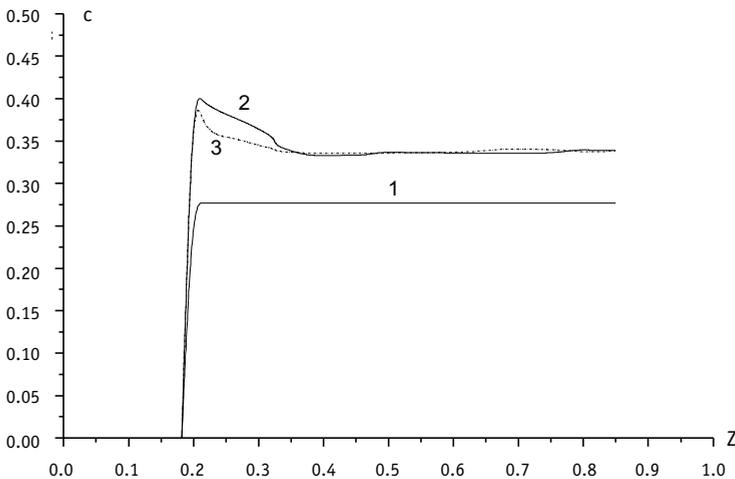


Рис. 2. Распределение концентрации по координате Z при R=0,58 в различные моменты времени: 1 - $\tau = 0$; 2 - $\tau = 600$ с; 3 - $\tau = 1200$ с

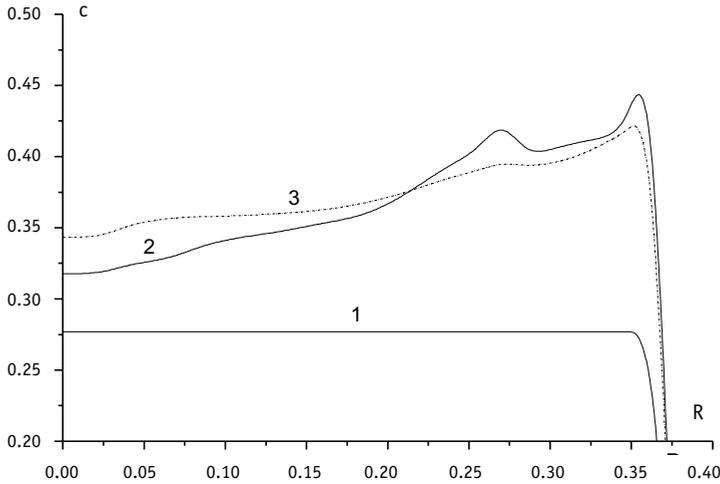


Рис. 3. Распределение концентрации по координате R при $Z=0,18$ в различные моменты времени: 1 - $\tau = 0$; 2 - $\tau = 600$ с; 3 - $\tau = 1200$ с

На рис.1, 2 представлено распределение концентрации жидкой стали по координате Z при $R=0,27$ (рис. 1) и $R=0,58$ (рис. 2) в различные моменты времени. Расчет выполнен для реактора ВВЭР-1000. Из рис.1, 2 следует, что наиболее резкое изменение концентрации имеет место вблизи стенки корпуса, где концентрация изменяется от нуля до максимального значения, которое уменьшается с ростом R и возрастанием времени.

На рис. 3, 4 показано распределение концентрации жидкой стали по координате R при $Z=0,18$ (рис. 3) и $Z=0,85$ (рис. 4, зеркало смеси) в различные моменты времени. При $Z=0,18$ концентрация заметно изменяется с координатой R .

Начальное резкое изменение концентрации во времени обусловлено плавлением включений твердой стали в смеси. После расплавления включений твердой стали прирост концентрации, обусловленный плавлением стенки корпуса, заметен у стенки и незначителен в ядре смеси вследствие конвекции и диффузии.

В целом в соответствии с результатами расчетов наблюдается заметная стратификация смеси. Поскольку согласно формулам [9] q_v свойства смеси зависят от концентрации, то наблюдаемая заметная стратификация окажет существенное влияние

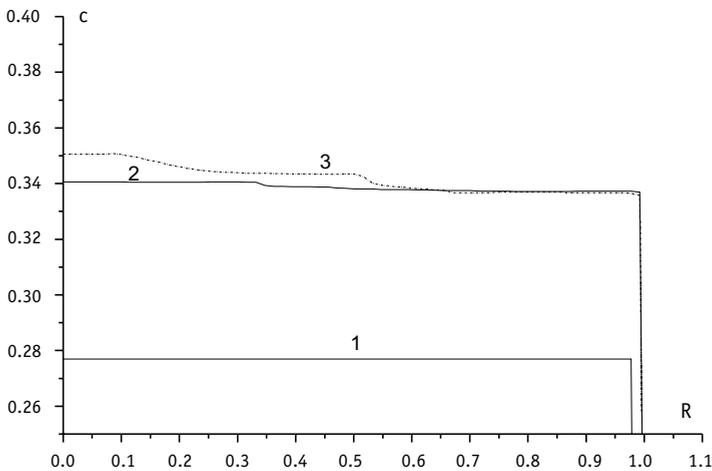


Рис. 4. Распределение концентрации по координате R при $Z=0,85$ в различные моменты времени: 1 - $\tau = 0$; 2 - $\tau = 600$ с; 3 - $\tau = 1200$ с

на температурное поле в смеси и стенке корпуса и, в конечном счете, на проплавление корпуса реактора.

Выполнены расчеты относительной скорости W и поля концентраций жидкой стали при различных радиусах жидкой капли в различные моменты времени. Проведенные расчеты показали, что относительная скорость легкой фазы для приемлемых размеров частицы незначительна по сравнению со скоростью смеси. Изменения от размера частицы заметны, а во времени являются слабыми.

Следовательно, для расчета взаимодействия кориума с корпусом реактора можно использовать гомогенно-диффузионную модель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана гомогенно-диффузионная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора при тяжелой аварии.

2. Результаты расчета показали заметную стратификацию смеси, что повлияет на температурное состояние смеси и корпуса реактора.

3. Разработана гетерогенная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора.

4. Проведенные расчеты показали, что относительная скорость легкой фазы для приемлемых размеров частицы незначительна по сравнению со скоростью смеси. Следовательно, для расчета взаимодействия кориума с корпусом реактора можно использовать гомогенно-диффузионную модель.

5. В данной работе показано, что полная стратификация, принятая в ряде работ, невозможна. Допущение о полной стратификации является идеализацией, но его можно рассматривать как крайний, предельный случай.

Обозначения:

a - радиус, м; b_σ - параметр; C - концентрация, кг/м³; c - относительная концентрация, $c = C/\rho$; C_μ - коэффициент сопротивления; c_p - изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); c_{p1} - изобарная теплоемкость кориума, Дж/(кг·К); c_{p2} - изобарная теплоемкость стали, Дж/(кг·К); D - коэффициент диффузии, м²/с; d - диаметр, м; F - сила, Н; g - ускорение свободного падения, м/с²; Ho - число гомохронности; L - теплота плавления, Дж/кг; m - масса, кг; N - нормаль; p - давление, Па; q_v - плотность объемного тепловыделения, Вт/м³; R - безразмерная поперечная координата; R_o - внутренний радиус цилиндрической части корпуса, м; r - поперечная координата, м; радиус, м; T - температура, К; T^L - температура ликвидуса, К; V - безразмерная абсолютная скорость; объем, м³; V_z, V_r - безразмерные продольная и поперечная компоненты абсолютной скорости; v - скорость, м/с; $|v|$ - модуль скорости, м/с; v_z, v_r - продольная и поперечная компоненты скорости, м/с; W - безразмерная относительная скорость; W_z - безразмерная продольная компонента относительной скорости; w - относительная скорость, м/с; w_z - продольная компонента относительной скорости, м/с; Z - безразмерная продольная координата; z - продольная координата, м; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); ε_{eff} - приведенная степень черноты; ε - пористость; η - продольная координата точек фронта плавления, м и координата точек фронта плавления «крупинки», м; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); μ - коэффициент динамической вязкости, Па·с; ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с; ξ - поперечная координата точек фронта плавления, м; ρ - плотность, кг/м³; σ - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; σ_L - коэффициент поверхностного натяжения при температуре ликвидуса, Н/м; τ - время, с.

Индексы: A - Архимеда; Λ - ячейка; cor - кориум; d - размерный; m - плавление; eff - эффективный; mix - смесь; out - внешний; SB - Стефана-Больцмана; st - сталь; o - начальный.

Литература

1. *Kumäläinen O., Tuomisto H., Theofanous T.G.* In-vessel retention of corium at the Loviisa plant // Nuclear Engineering and Design. - 1997. - V. 169. - № 1-3. - P.109-130.
2. *Грановский В.С. и др.* Удержание расплава кориума в корпусе ВВЭР при тяжелой аварии с разрушением активной зоны // Труды международной конференции "Теплофизика-95". Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР (г. Обнинск, 21-24 ноября 1995 г.) Т. 3. - Обнинск. - С. 191-200.
3. *Кащеев М.В., Муранов Ю.В.* Математическое моделирование теплообменных процессов при взаимодействии кориума с корпусом реактора: Препринт ФЭИ-2367. - Обнинск, 1994. - 28 с.
4. *Низматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Т. 1. - М.: Наука, 1987.
5. *Долгов В.В., Кащеев М.В., Муранов Ю.В.* Моделирование теплового разрушения корпуса реактора при тяжелой аварии на АЭС с реакторами типа ВВЭР // ТВТ. - 1996. - Т. 34. - №5. - С.770-779.
6. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. - М.: Атомиздат, 1979.
7. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967.
8. *Wegstein J.H.* Accelerating convergence of iterative processes. Comm. Assoc. Comput. Mach. - 1958. - V. 1. - № 6, 9.
9. *Кащеев М.В.* Гомогенно-диффузионная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора: Препринт ФЭИ-2779. - Обнинск, 1999. - 18 с.
10. *Артемьев В.К.* Вариант неявного метода для решения системы уравнений Навье-Стокса в естественных переменных: Препринт ФЭИ-1962. - Обнинск, 1989. - 22 с.
11. *Bosset A.B.* On the motion of a sphere in a viscous liquid // Phil. Trans. Roy. Soc. London. - 1888. - V. 179A. - P. 43-63.
12. *Субботин В.И. и др.* Решение задач реакторной теплофизики на ЭВМ. - М.: Атомиздат, 1979.
13. *Кащеев М.В.* Аннотация программы PPRKRS // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2001. - № 2 - С.84-88.

Поступила в редакцию 16.05.2002

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ТВС В СОСТАВЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000*

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

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



Представлено описание процедуры выполнения расчетов термомеханического поведения топливных кассет в составе активной зоны ВВЭР-1000. Исходными данными для расчетов служат измерения кривизны ТВС в составе активной зоны, выполняемые во время очередной перегрузки топлива, а также результаты нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов. Обсуждаются приближения, используемые для получения полноты необходимых исходных данных, и интерпретация расчетных результатов. Приводятся характерные результаты расчетов термомеханики активной зоны, отражающие искривления ансамбля ТВС в составе активной зоны с учетом взаимодействия кассет между собой при их деформировании под действием эксплуатационных нагрузок.

Деформирование ТВС в составе активной зоны в нормальных условиях эксплуатации обуславливается следующими нагружающими факторами:

- весовая и гидравлическая распределенная осевая нагрузка;
- осевая сжимающая сила, приложенная к головке ТВС от пружинного блока;
- контактные поперечные силы взаимодействия соседних ТВС при нарушениях идеальной геометрии собственно кассет и посадочных мест во внутрикорпусных устройствах реактора;
 - неоднородные поля температур в объеме ТВС, вызывающие деформирование кассет;
 - неоднородные поля энерговыделения в твэлах топливной сборки, вызывающие их деформирование и как следствие – деформирование ТВС;
 - неоднородные поля нейтронного потока, вызывающие неоднородный радиационный рост циркониевых сплавов, неоднородную релаксацию упругих натягов в конструкции ТВС, терморadiационную ползучесть конструкционных материалов в составе ТВС;
 - термомеханические нагрузки в конструкции кассеты при разогреве-расхолаживании реактора.

Методические основы расчета термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000 под действием перечисленных нагрузок изложены в [1,2].

В качестве исходной информации для расчета термомеханики очередной кампании используются результаты измерений кривизны ТВС после предшествующей пе-

© **В.М.Троянов, Ю.И.Лихачев, В.И.Фоломеев, 2002**

* Работа выполнялась при содействии ОАО "ТВЭЛ".

регрузки топлива или результаты расчетного моделирования термомеханики предшествующей кампании и перегрузки. Наличие данных об измерениях кривизны ТВС в процессе перегрузки повышает точность расчетного прогноза.

В 1990-х гг. измерения кривизны ТВС во время перегрузок на различных блоках проводились регулярно [3], однако никогда не выполнялись измерения по всему объему активной зоны.

Типичный объем измерений приводится на рис. 1 [4]. Этих данных оказывается достаточно, чтобы обнаружить, во-первых, характерную величину искривлений ТВС (в данном случае – 10 мм в начале кампании), и, во-вторых, характерные направления векторов прогиба – преимущественно с образованием вихря вокруг центра активной зоны.

На рис. 2 приводятся типичные формы искривления кассет в начале и конце топливной кампании [4].

Для выполнения термомеханических расчетов активной зоны выполняется процедура дополнения недостающих данных по деформациям кассет. Используется гипотеза сдвиговой 60-градусной симметрии, согласно которой необмеренным кассетам приписываются такие же формы, как и обмеренным, с соответствующим изменением направления вектора прогиба.

Эта процедура приводит обычно к нарушению условий совместности деформации ТВС в составе активной зоны. Для устранения этого противоречия выполняется расчет термомеханики активной зоны по коду РАНДЕВУ-3 [1], исправляющий формы ТВС. Следствием этой операции является появление контактных сил взаимодействия между

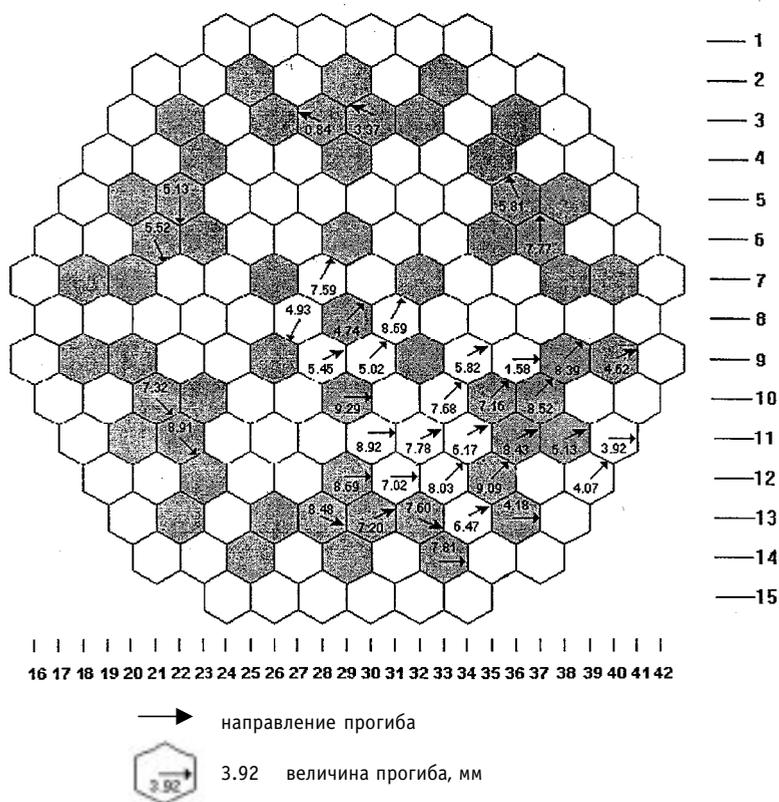


Рис. 1. Векторы прогиба ТВС в центральном сечении активной зоны. Начало 10-й топливной кампании, блок №1 Запорожской АЭС. В темных ТВС расположены кластерные поглощающие стержни

кассетами, учитываемых далее при расчете кампании.

Процедура проведения расчетов предусматривает следующее:

- расчет нагружения ТВС осевыми силами при нагружении пружинных блоков плитой БЗТ;
- расчет полей нейтронов, повреждающих доз, энерговыделения и температур в начале топливного цикла ($t = 0$);
- расчет деформаций ТВС при выходе реактора на мощность;
- расчет изменений нейтронных и тепловых полей за определенный интервал времени (Δt);
- расчет изменений усилий взаимодействия и деформаций ТВС в течение указанного шага по времени (Δt);
- выполнение процедуры пошагового расчета кампании с учетом дополнительного формоизменения ТВС, вызываемого циклическими переходными процессами;
- по завершении кампании проводится расчет изменения сил взаимодействия и деформаций ТВС при расхолаживании реактора и затем – снятии осевых усилий поджатия ТВС плитой БЗТ.

Результаты расчетов термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны представляются в виде картограмм поперечных сечений активной зоны с изображением вектора смещения центральной оси ТВС и в виде проекций продольных осей ТВС на вертикальную плоскость, проходящую через ось активной зоны. Для анализа влияния водных зазоров между кассетами на локальные изменения энерговыделе-

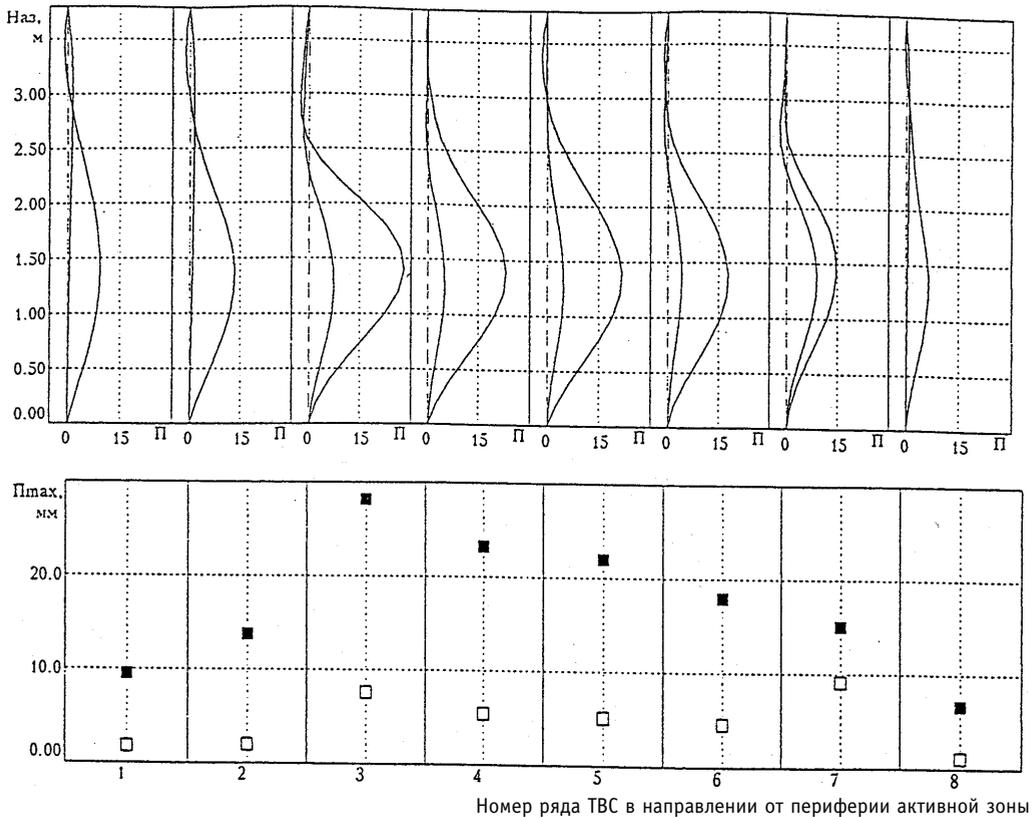


Рис.2. Формы искривлений направляющих каналов ТВС и значения максимальных изгибов в начале и конце 10-й топливной кампании. Блок №3 Ровенской АЭС

ния в твэлах представляется информация о величинах зазоров между кассетами.

Типичная картина формоизменения кассет в начале и в конце топливного цикла представлена на рис. 3. В процессе проведения расчетов с целью верификации расчетных методов неоднократно проводилось сравнение расчетных результатов с экспериментальными, полученными при измерениях кривизны ТВС в процессе перегрузки. В результате этих сравнений было установлено следующее:

- при проведении практических расчетов не представляется возможным учесть индивидуальные особенности отдельных кассет (например, сборочные натяги в твэльных ячейках дистанционирующих решеток, геометрические несовершенства кассет, жесткость пружинного блока), а также геометрические несовершенства посадочных мест внутрикорпусных устройств реактора, поэтому прогноз формоизменения отдельных кассет может быть сделан с довольно большой погрешностью;

- удается получить довольно хорошее статистическое совпадение расчетных результатов искривлений кассет и межкассетных зазоров с экспериментальными результатами.

Это статистическое совпадение хорошо иллюстрируется с помощью гистограмм распределения прогибов ТВС для отдельных сечений активной зоны.

На рис. 4 представлены гистограмма прогибов ТВС в активной зоне в плоскости поперечного сечения, а так же гистограмма межкассетных зазоров.

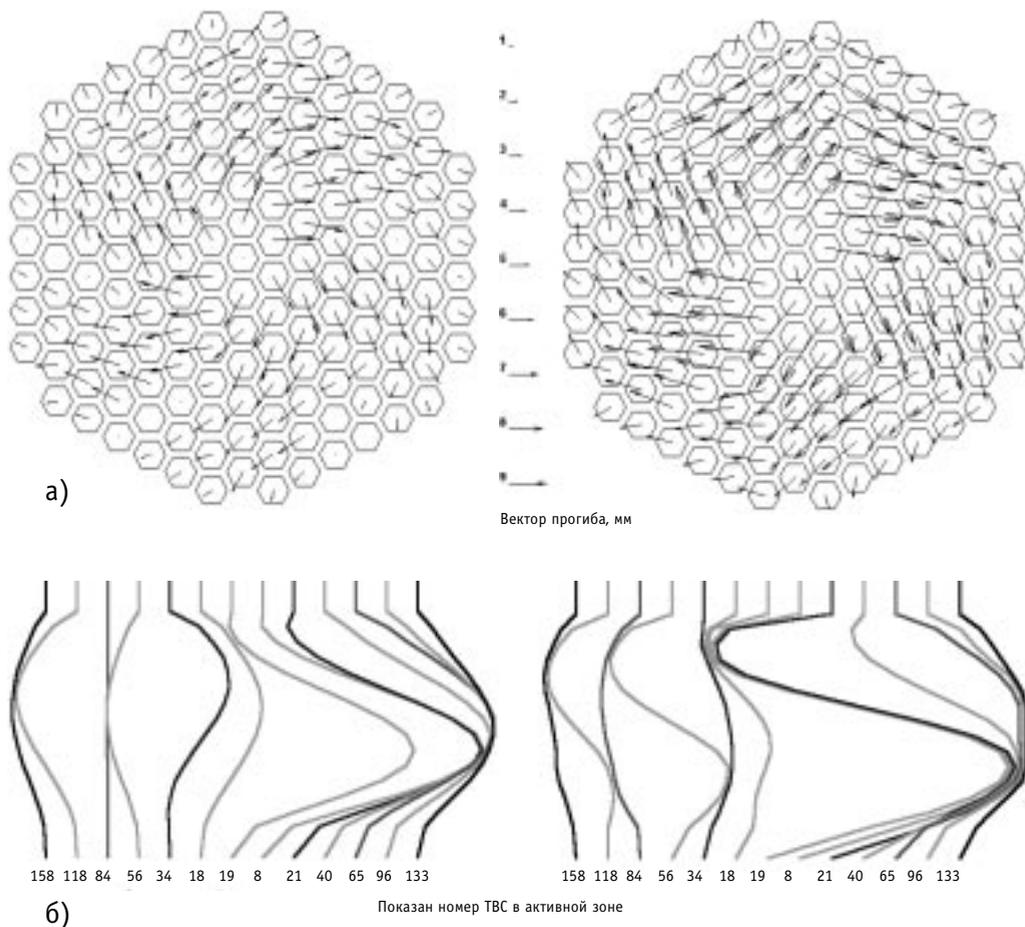


Рис. 3. Типичная картина формоизменения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000 в начале топливной кампании (слева) и в конце (справа) в плоскости поперечного сечения (а) и продольного (б)

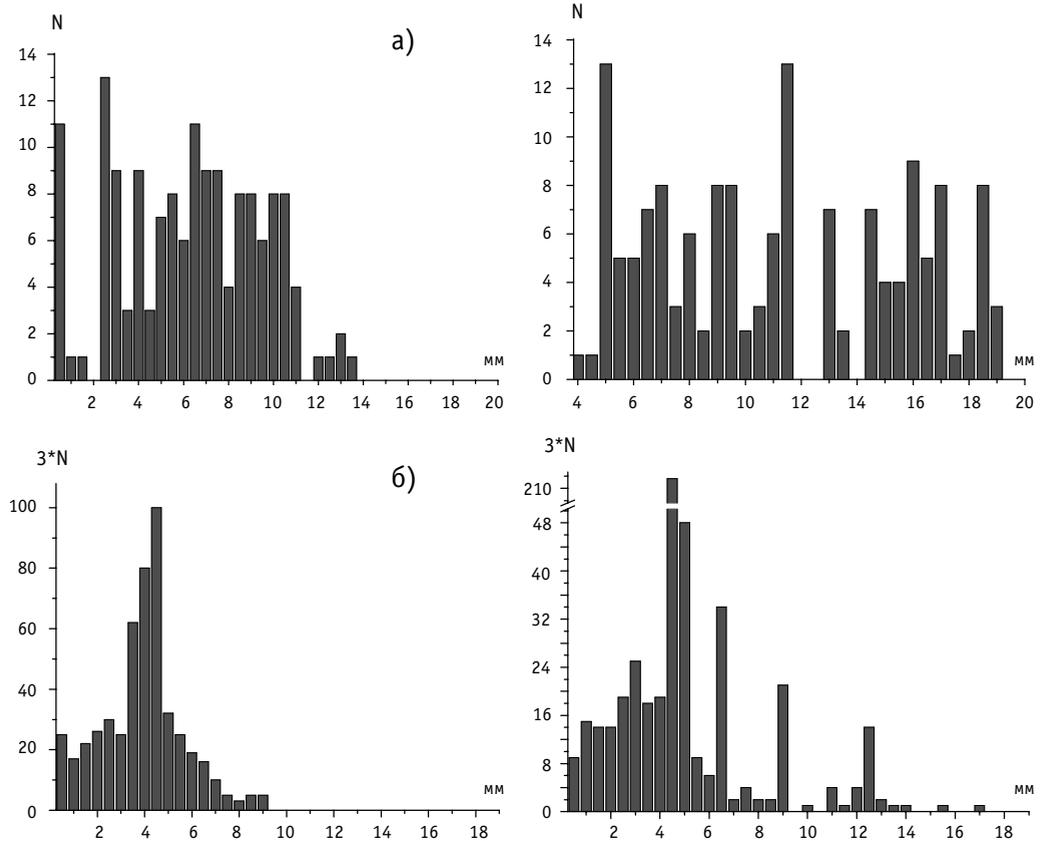


Рис. 4. Гистограммы прогибов ТВС в активной зоне (а) и межкассетных зазоров (б) в начале топливной кампании (слева) и в конце (справа)

Практика показывает, что именно такие статистические результаты наиболее правильно характеризуют термомеханическое состояние активной зоны. Эти результаты позволяют выполнить сравнительную оценку состояния различных активных зон, оценить эффективность внедрения тех или иных мероприятий по совершенствованию конструкции ТВС, совершенствованию топливных циклов, применению различных схем перегрузок. Статистические данные по межкассетным зазорам позволяют выполнить оценку безопасности активной зоны при эксплуатации с позиций обеспечения приемлемых величин неравномерностей энерговыделения.

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. – С. 33-43.
2. Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И. Метод расчета продольно-поперечного изгиба бесчехловой ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатационных нагрузках//Известия вузов. Ядерная энергетика. - № 2. – С. 44-53.
3. Schmelev V. Results and Analysis of Bow Measurements at NPP. PWR and WWER fuel assembly bow. Workshop in Rez, February 1998.
4. Afanasyev A.A., Ignatenko I. The Summary Experience of the Ukrainian Reactor Core (WWER-1000) Operation with Fuel Assembly Bow. PWR and WWER fuel assembly bow. Workshop in Rez, February 1998.

Поступила в редакцию 25.05.2002

УДК 621.039.54

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000 В АВАРИЯХ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ*

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

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



Рассмотрены методические вопросы и элементы теории расчета термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000 в аварийных ситуациях, сопровождающихся повышением температур в конструкциях. Анализируются ситуации, в которых под действием приложенных внешних нагрузок (нагружение через пружинный блок, а также силовое взаимодействие ТВС между собой) реализуется упруговязкопластическое деформирование конструкции, провоцируемое разупрочнением материалов при высоких температурах и ускоренной термической ползучестью.

Особенностью данной задачи является неизотермический характер нагружения, что требует применения специальных расчетных методов.

Деформирование ТВС рассматривается в ансамбле, составляющем активную зону, с учетом взаимодействия кассет между собой [1-3].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА РАСЧЕТА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000 В АВАРИЯХ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Исходными предпосылками являются следующие обстоятельства:

- ряд рассматриваемых проектных аварий так же, как и запроектные аварии, сопровождаются значительным повышением температуры оболочек твэлов и элементов несущего каркаса ТВС (направляющие каналы, дистанционирующие решетки) вплоть до температур, превышающих 1000°C;

- в процессе развития аварии каждая из ТВС в активной зоне испытывает нагружение осевой силой от пружинного блока, поперечными силами от взаимодействия кассет между собой и, в отдельных случаях, поперечное нагружение от перепада давления, вызванного аварийной ситуацией в одной из петель;

- значительное повышение температуры сопровождается существенным изменением механических свойств материалов, а именно - снижением мгновенных пределов текучести и ростом скоростей термической ползучести;

- в особенности значительно высокотемпературное разупрочнение и ускорение ползучести проявляются для циркониевых сплавов, в том числе сплавов Э-110 и

© В.М.Троянов, Ю.И.Лихачев, В.И.Фоломеев, 2002

* Работа выполнялась при содействии ОАО "ТВЭЛ".

Э-635, что вызывает опасение потери несущей способности циркониевого каркаса ТВС, которая может приводить к потере устойчивости при осевом нагружении, что, в свою очередь, может приводить к значительным формоизменениям кассет в аварийной ситуации;

- масштаб формоизменений теряющих устойчивость кассет может быть очень большим в случае, если активная зона содержит достаточно большое количество таких ТВС; это связано с возможностью однонаправленной поперечной деформации кассет, когда искривленные кассеты вкладываются одна в другую;

- последствием значительных формоизменений кассет в аварийной ситуации может быть нарушение условий теплосъема и отвода тепла от разогретых конструкций активной зоны, а также возникновение трудностей в разборке деформированной активной зоны при ликвидации последствий аварии. Трудности в разборке зоны могут усугубляться охрупчиванием циркониевых труб НК из-за взаимодействия их с водяным паром. При этом не исключен отрыв головок ТВС при разборке.

Проводимый в рамках настоящей работы анализ позволяет определить ожидаемые масштабы деформирования активной зоны.

В рамках разработки методики и алгоритмов расчета для указанной задачи были рассмотрены различные теоретические подходы и установлены основные физические зависимости, определяющие кинетику напряженно-деформированного состояния ТВС при неизотермическом вязкопластическом течении в аварийной ситуации.

Проанализированы виды испытаний физико-механических свойств, необходимых для расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния ТВС в аварийной ситуации.

Рассмотрено применение двух различных подходов:

- исследование формоизменения тепловыделяющих сборок в аварийной ситуации на базе теории неизотермического вязкопластического течения;
- решение задачи о деформациях ТВС с использованием изохронных кривых деформирования.

Для быстропротекающих аварийных ситуаций, когда общую неупругую деформацию затруднительно разделить на вязкую и “мгновенную” пластическую, решение задачи целесообразно проводить на базе теории ползучести старения с использованием изохронных кривых вязкоупругопластического деформирования.

Математические модели и алгоритмы определения формоизменения ТВС на основе теории ползучести старения, изложенные в [2], были реализованы в виде расчетной программы ТЕРЕМОК-А. Программа ТЕРЕМОК-А представляет собой модифицированную версию программы ТЕРЕМОК, позволяющую производить расчеты поведения отдельно взятой кассеты ВВЭР-1000 с учетом ее реального состояния к моменту аварии, определяемого радиационными эффектами в конструкционных материалах (радиационный рост и ползучесть), расслаблением натягов в ячейках ДР, искривлениями кассет в процессе работы, действующими на кассеты нагрузками.

В процессе аварии в дополнение к вышеназванным факторам в расчетной программе учитывается термическая ползучесть и пластическое деформирование конструкции, являющиеся определяющими факторами для деформирования ТВС в условиях резкого повышения температур в аварийной ситуации.

Расчетная программа ТЕРЕМОК-А в виде самостоятельного модуля входит в состав расчетного комплекса РАНДЕВУ-А подобно тому, как это реализовано в комплексе РАНДЕВУ-3 [1].

Комплекс РАНДЕВУ-А позволяет производить расчет усилий взаимодействия и деформаций ансамбля тепловыделяющих сборок активной зоны ВВЭР-1000 в любых проектных авариях. Необходимой входной информацией проведения расчетов явля-

ется кинетика температур оболочек твэлов, НК и ДР в различных сечениях по высоте для всего процесса аварии.

Проведены демонстрационные расчеты термомеханического поведения ТВС-2 в составе активной зоны ВВЭР-1000 в максимальной проектной аварии с разрывом Ду 850.

Получены результаты развития вязкопластического деформирования ТВС-2 в составе активной зоны в процессе аварии.

ОПИСАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АВАРИЙНОГО ПРОЦЕССА

Развитие процесса деформирования ТВС в активной зоне при максимальной проектной аварии (МПА) в значительной мере определяется стартовым состоянием активной зоны, предшествующим аварии.

Исходное термомеханическое состояние активной зоны перед аварией характеризуется искривлениями тепловыделяющих сборок, усилиями взаимодействия между ними, расслаблением усилий зажимов твэлов и НК в ячейках ДР, изменением осевых сил поджатия каскет пружинными блоками. Это состояние должно быть получено из рассмотрения термомеханики активной зоны в нормальных условиях эксплуатации. Для этого необходимо выполнить комплекс расчетов, включающих в себя определение нейтронных и температурных полей для заданного состава загрузки активной зоны, определение прогибов и сил взаимодействия каскет в составе зоны. Расчеты необходимо выполнять по состоянию на заданный момент времени начала аварийной ситуации с учетом режимных факторов. Авария может произойти на любой стадии топливного цикла (в начале цикла, в конце и в промежутке). Поскольку весь опыт расчетных исследований термомеханического поведения зон свидетельствует, что деформации ТВС развиваются в течение топливного цикла, достигая максимальных значений в конце каждого цикла, наиболее консервативными будут оценки последствий аварии, происходящей в конце топливного цикла.

При проведении трехмерных расчетов термомеханического поведения ТВС в активной зоне рассматривается полный объем активной зоны – 163 ТВС.

Температурные условия для оболочек твэлов и направляющих каналов в ТВС активной зоны ВВЭР-1000 в аварийной ситуации представляются в качестве исходных данных. Для проведения демонстрационных расчетов термомеханического поведения ТВС в активной зоне рассмотрена проектная авария с разрывом

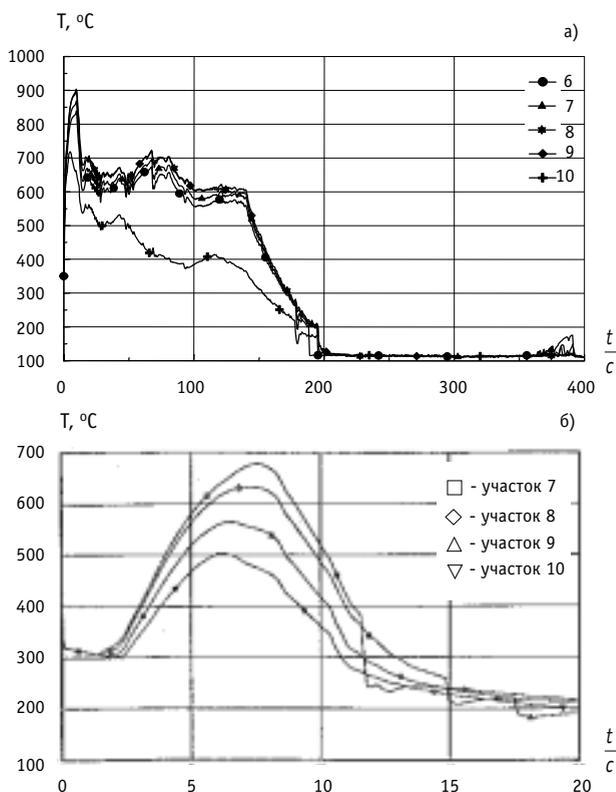


Рис. 1. Температура оболочек твэлов (а) и НК (б) на различных участках по высоте ТВС (участки обозначены номерами, отсчет снизу)

трубопровода Ду 850.

Характерные изменения температуры оболочек твэлов и направляющих каналов в указанной аварийной ситуации для наиболее теплонапряженных ТВС приведены на рис. 1.

КОММЕНТАРИИ К РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

В процессе аварии и повышения температур в активной зоне основной активной нагрузкой для ТВС будут являться осевые силы от пружинных блоков и весовые нагрузки.

Поперечные силы, действующие на ТВС, являются силами контактного взаимодействия кассет между собой и вызваны, в основном, изгибами от продольных сил. Они не являются активными нагрузками и их уровень не высок, поскольку податливость материалов резко возрастает при высоких температурах. Не ожидается дополнительных искривлений кассет от температурных неоднородностей по сечению ТВС, от неоднородных удлиненных твэлов и НК от радиационных эффектов и термомеханических хруповиков.

Вследствие этого основной вклад в прогибы кассет при высокотемпературном нагружении дает продольный изгиб, вызываемый осевой силой. Вклад поперечного изгиба в искривления ТВС ожидается небольшим из-за малости поперечных сил. Поэтому в настоящем рассмотрении вклад поперечного изгиба в деформирование кассет учитывается приближенно следующим образом. Ведется расчет в упругом приближении с выполнением принципа суперпозиции при вычислении псевдоупругих деформаций от продольного и поперечного изгибов в твэлах и НК до появления псевдопластических деформаций в стержнях от продольного изгиба, после чего в зонах появления пластических деформаций от продольного изгиба сопротивлением стержней поперечному изгибу пренебрегаем (для получения пессимистических оценок). Это достигается путем уменьшения числа работающих стержней при определении собственной изгибной жесткости твэлов и НК в задаче поперечного изгиба [2].

Собственная изгибная жесткость твэлов, которые располагаются в области псевдоупругих деформаций, определяется теперь из следующей зависимости:

$$D_u^* = E^* J^* n_\Sigma^* \frac{F(A)}{F}, \quad (1)$$

где J^* - осевой момент инерции оболочки твэла; $n_\Sigma^* = 312$ - число твэлов в сечении ТВС; $F(A)$ - площадь псевдоупругой области A [2]; F - общая площадь сечения ТВС.

Усредненный по рассматриваемому сечению балки приведенный модуль псевдоупругости $E^*(\Delta t_j)$ материала оболочек твэлов для j -го шага счета Δt_j находится из соотношения

$$E^*(\Delta t_j) = \frac{E_y(T_j)}{1 + \frac{E_y(T_j)}{E(T_j, t_j)} - \frac{E_y(T_j)}{E(T_{j-1}, t_{j-1})}}, \quad (2)$$

где $E_y(T_j)$, $E(T_j, t_j)$ - упругий модуль и модуль псевдоупругости для конца j -го шага; $E(T_{j-1}, t_{j-1})$ - псевдоупругий модуль в начале j -го шага.

Аналогичным образом определяются собственная изгибная жесткость НК.

При расчете продольно-поперечного изгиба балки используются модели продольного изгиба, а также методология расчета поперечного изгиба и алгоритмы взаимосвязанного расчета продольного и поперечного изгибов, изложенные [2].

В настоящей работе была разработана теоретическая модель термомеханическо-

го поведения кассет ВВЭР-1000 в условиях монотонно изменяющихся температур и силовых нагрузок. Модель рассматривает вязкопластическое деформирование каждой из кассет в активной зоне с развитием зон пластического деформирования по объему ТВС и с одновременным учетом проскальзывания твэлов и НК в ячейках ДР, расслабляющихся вследствие релаксационных процессов и формоизменений элементов конструкции.

При рассмотрении кратковременного нагружения активной зоны в аварийной ситуации, когда разделить неупругую деформацию на пластическую часть и на деформацию ползучести не представляется возможным, необходимы изохронные кривые деформирования $\sigma = f(\epsilon, t, T)$, которые могут быть получены из кратковременных испытаний при определенных температурах (в нужном интервале температур) и заданных временах нагружения (согласованных с длительностью аварийной ситуации). Такие наборы изохронных кривых должны быть известны для ряда значений температуры в интервале $T_{раб} \div T_{max}$, где $T_{раб}$ - рабочая температура материала (оболочки твэла, трубок НК и дистанционирующих решеток), а T_{max} - наибольшая температура материала в аварийной ситуации.

Для инженерных расчетов изохронные кривые могут быть аппроксимированы зависимостями

- 1) материала с линейным упрочнением (штрихпунктирная линия на рис. 2) или
- 2) идеально упругопластического материала (пунктирная линия на рис. 2).

Для стадии псевдоупругого деформирования ОА-деформации прямо пропорциональны напряжениям:

$$\epsilon = \frac{1}{E} \sigma. \tag{3}$$

Для стадии псевдопластического деформирования АВ-деформации и напряжения связаны следующей зависимостью:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_k} - \epsilon_{om}, \tag{4}$$

где $\epsilon_{om} = \sigma_m \left(\frac{1}{E_k} - \frac{1}{E} \right)$.

Здесь $E(T, t)$; $E_k(T, t)$; $\sigma_m(T, t)$ - модуль псевдоупругости, модуль псевдопластичности и предел псевдотекучести материала для заданных температуры T и временного интервала t . Указанные зависимости могут быть заданы аналитически или в виде таблиц. В процессе расчетов величины для нужных значений T и t находятся линейной интерполяцией по специально разработанной процедуре.

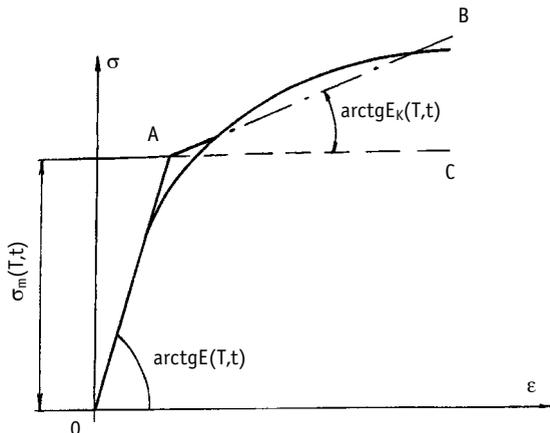


Рис. 2. Схема аппроксимации диаграммы деформирования

КРАТКОВРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ТВС ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Необходимые для проведения расчетов термомеханики в аварийной ситуации изохронные кривые деформирования сплава Э-110 для интервала температур 450 ÷ 1200°C и времен нагружения до 300 секунд были построены по результатам кратковременных испытаний на растяжение с различными скоростями деформирования и кратковременных испытаний на ползучесть.

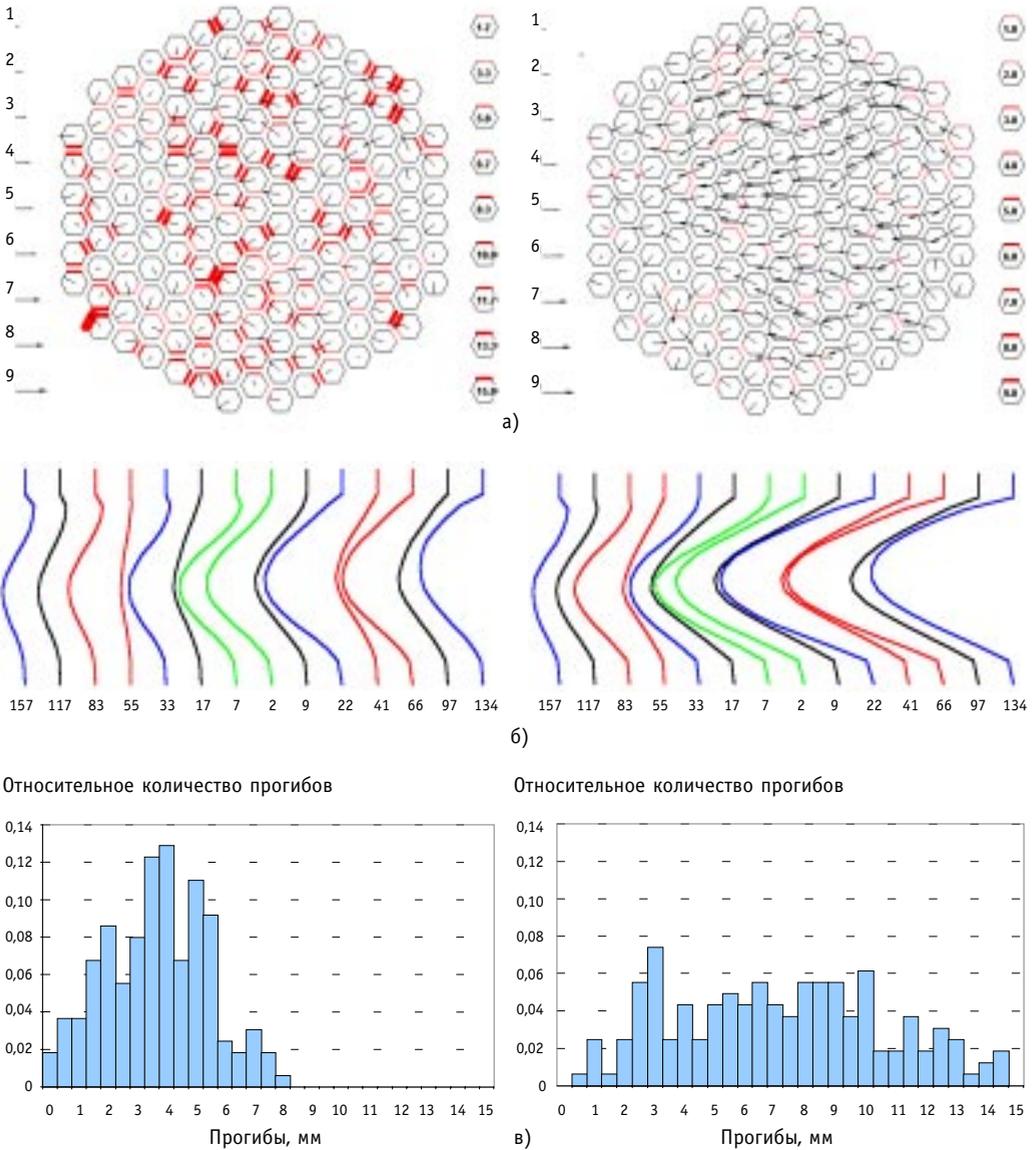


Рис.3. Результаты расчетного моделирования термомеханического поведения активной зоны в процессе аварии с разрывом трубопровода Ду 850: а) векторы смещений центров ТВС относительно проектных положений и усилия для 7-й ДР в конце топливного цикла для начала аварии и после аварии; б) проекции изогнутых осей в конце топливного цикла для начала аварии и после аварии; в) гистограмма прогибов кассет на уровне 7-й ДР в конце топливного цикла для начала аварии и после аварии

Согласно работе [4] влияние облучения на кратковременные механические свойства имеет место при температурах испытания, меньших 500°C. При температуре испытания выше 500°C условные пределы текучести облученного и необлученного материалов практически совпадают. Поэтому применение данных, полученных по результатам испытаний необлученных образцов, для исследования термомеханического поведения облученных ТВС в аварийной ситуации при температурах, превышающих 500°C, вполне правомерно.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

Результаты демонстрационных расчетов термомеханического поведения активной зоны ВВЭР-1000 в аварии с разрывом трубопровода Ду 850, имеющей в своем составе загрузку так называемых ТВС-2 с жестким каркасом, приведены на рис. 3.

На рис. 3, а в горизонтальной плоскости, проходящей через центр активной зоны, показаны картограммы векторов смещений центров ТВС относительно проектных положений до (слева) и после (справа) аварии. Масштабы смещения (мм) кассет обозначены на рисунке шкалой масштабов. Контактные усилия между гранями ДР обозначены жирными линиями, шкала масштабов (кгс) которых также приведена на рисунках.

На рис. 3, б приведены проекции на вертикальную плоскость изогнутых осей ТВС в одном из рядов до и после аварии.

На рис. 3, в приведены гистограммы прогибов ТВС в том же поперечном сечении активной зоны до и после аварии.

Обращает на себя внимание тот факт, что в рассмотренных условиях протекания аварии деформирование ТВС-2 в составе зоны не носит катастрофического характера, несмотря на высокое пиковое значение температур твэлов (более 900°C) и направляющих каналов (до 700°C).

Причиной этого в целом положительного результата является то, что высокие температуры в НК при аварии действуют кратковременно (до 10 секунд) и, кроме того, создается благоприятное высотное распределение температур в активной зоне: как в нижней, так и в верхней части ТВС температуры в кассете оказываются существенно меньше, чем в центральной ее части. В этих условиях релаксация упругих натягов и деформирование элементов конструкции ТВС в верхней и нижней частях ТВС оказываются существенно меньшими, чем в центре. Концы ТВС “держат” конструкцию от изгиба, который резко возрос бы, если бы температура верхней части ТВС увеличилась.

В рассмотренном случае потери устойчивости кассет ТВС-2 под действием приложенных к ним нагрузок не происходит, а накопление деформаций ползучести каркаса ТВС оказывается ограниченным.

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. - С.33-43.
2. Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И. Метод расчета продольно-поперечного изгиба бесчехловой ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатационных нагрузках//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. - №2. - С. 44-53.
3. Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И. Моделирование термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. - №3. - С.14-18.
4. Кобылянский Г.П., Новоселов А.Е. Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе. Справочные материалы. - Димитровград, 1996.

Поступила в редакцию 25.05.2002

МЕТОД РАСЧЕТА НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000*

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

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



Рассмотрен метод и результаты модельного расчета деформирования активной зоны ВВЭР-1000 при горизонтальном сейсмическом воздействии. Приведены основные положения расчета, основанные на применении линейно-спектрального метода. Трехмерный расчет деформирования ансамбля ТВС в активной зоне выполняется с помощью кода РАНДЕВУ-С.

ВВЕДЕНИЕ

При сейсмическом воздействии на АЭС наиболее опасным для активной зоны является горизонтальное направление ударного нагружения. Поэтому именно оно рассматривается в статье.

При горизонтальном сейсмическом воздействии на активную зону происходит совместная деформация ансамбля кассет в пределах зазоров между ДР отдельных ТВС и между ДР периферийных ТВС и выгородкой. Под действием сейсмической нагрузки ТВС изгибаются в определенном направлении и собираются возле выгородки, максимально нагружая крайнюю к выгородке кассету. Сжимающие ТВС усилия могут вызвать недопустимые деформации дистанционирующих решеток, твэлов или НК. Поэтому необходимо определить возможные усилия, сжимающие ТВС при сейсмическом воздействии на активную зону при различных интенсивностях землетрясения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Расчет ансамбля ТВС, составляющих активную зону, на сейсмическое воздействие может быть проведен линейно-спектральным методом или методом динамического анализа [1, 2].

При использовании метода динамического анализа для проведения расчетов должны быть известны акселерограммы движения опорных конструкций реактора, которые задают внешнее сейсмическое воздействие. При выполнении проектных работ активной зоны серийных АЭС (В-320) такие акселерограммы отсутствуют.

Для проведения расчетов на горизонтальное сейсмическое воздействие линейно-спектральным методом необходимо знать обобщенные спектры ответа горизонтальных колебаний при определенной величине относительного демпфирования и заданной балльности сейсмичности площадки АЭС. Такие обобщенные спектры ответа, рекомендованные для оборудования и трубопроводов в составе унифицированных АЭС с ВВЭР-1000, приведены в «Нормах расчета на прочность...» [3]. Поэтому расчет на

© В.М.Троянов, Ю.И.Лихачев, В.И.Фоломеев, 2002

* Работа выполнялась при содействии ОАО "ТВЭЛ".

сейсмическое воздействие ТВС активных зон ВВЭР-1000 проводится линейно-спектральным методом, согласно «Нормам...» [3].

Для определения сейсмических нагрузок в направлении, перпендикулярном оси ТВС (при горизонтальном сейсмическом воздействии на активную зону), необходимо определить собственные частоты и формы колебаний кассеты в соответствующем направлении. Указанные параметры колебаний кассеты находятся из модального анализа, в котором решаются уравнения линейных систем

$$[K]\{X_j\} = \omega_j^2 [M]\{X_j\} \quad (1)$$

где $[K]$ и $[M]$ – матрицы жесткостей и масс, $\{X_j\}$ – вектор форм колебаний для моды j , ω_j – собственная окружная частота моды j .

Для бесчехловой кассеты ВВЭР-100, представляющей собой сложную многосвязную стержневую систему, указанная задача решается с помощью конечно-элементных кодов, например, “UZOR” (разработан в РНЦ «КИ» [4]), “ANSYS” (США) и др. При проведении модального анализа кассеты граничные условия на ее концах должны имитировать штатные закрепления головки и хвостовика ТВС. Необходимо также учитывать присоединенную массу теплоносителя.

Согласно линейно-спектральному методу сейсмическая нагрузка, соответствующая j -й форме собственных колебаний системы, определяется по формуле

$$S_{ij} = m_{ij} \ddot{\Phi}_j \Phi_j X_{ij}, \quad (2)$$

где $\ddot{\Phi}_j$ - ускорение, определяемое по спектру ответа горизонтальных колебаний (см. рис. П.9.1 из “Норм...” [3]) для собственной круговой частоты $\omega_j = 2\pi f_j$;

$$\Phi_j = \frac{\sum_{i=1}^N m_{ij} X_{ij}}{\sum_{i=1}^N m_{ij} X_{ij}^2} \quad (3)$$

- постоянная j -й формы колебаний; $\{X_{ij}\} = \{X_{1j} \dots X_{ij} \dots X_{Nj}\}$ – j -й собственный вектор, соответствующий собственной частоте ω_j ; j -ой формы колебаний, определяемый согласно формам собственных колебаний ТВС, полученным из модального анализа; m_{ij} - масса i -го элемента системы; N – число элементов в системе (число участков, на которые разделяется ТВС при рассмотрении одной кассеты, $N \approx 30$).

При определении сейсмических нагрузок в расчете следует учитывать только “ S ” низших форм колебаний, собственная частота которых f не превышает наибольшую частоту f_{max} , для которой заданы спектры ответа ($f_{max} = 25$ Гц, согласно “Нормам... [3]).

Внутренние усилия в K -ых элементах расчетной модели ТВС определяют от действия статически приложенных сейсмических нагрузок S_{ij} отдельно и суммируют для каждой j -ой формы колебаний по формуле

$$N_K = \sqrt{\sum_{j=1}^S N_{Kj}^2}, \quad (4)$$

где S – номер максимальной частоты, N_K - расчетное усилие в K -ом рассматриваемом сечении; N_{Kj} - усилие в K -м сечении для j -й формы колебаний.

Относительные перемещения расчетной модели ТВС для j -ой формы колебаний определяют по следующей зависимости:

$$V_{ij} = \frac{1}{\omega_j^2} \ddot{\phi}_j \cdot \Phi_j \cdot X_{ij}. \quad (5)$$

Расчетное значение результирующего перемещения i -го элемента ТВС определяется по формуле

$$V_i = \sqrt{\sum_{j=1}^S V_{ij}^2}. \quad (6)$$

При этом должно выполняться следующее условие:

$$\frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{\omega_k} > 0,1. \quad (7)$$

Если условие (7) не выполняется, то результирующее перемещение ТВС находят как

$$V_i = \sqrt{\sum_{j=1}^S V_{ij}^2 + \sum_{r=1}^P \left\{ \sum_{m=1}^{nr} |V_{mr}| \right\}^2}, \quad (8)$$

где P – количество групп собственных частот, для которых выполняется условие

$$\frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{\omega_k} < 0,1. \quad (9)$$

Для проведения расчетов сейсмических нагрузок, действующих на ТВС при землетрясениях, разработан специальный блок к программе “ТЕРЕМОК” [5]. Новая версия программы названа “ТЕРЕМОК-С”. Она внедрена в расчетный код “РАНДЕВУ-С”, позволяющий рассчитывать усилия и деформации ансамбля ТВС в активной зоне при

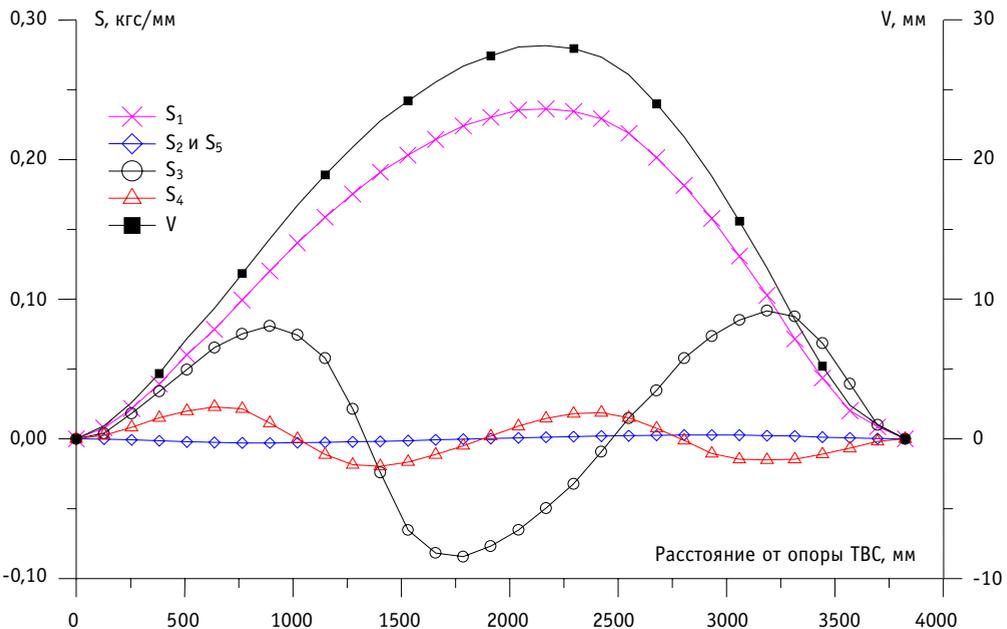


Рис.1. Распределение по длине ТВС-2 сейсмических нагрузок и результирующие перемещения кассеты для интенсивности землетрясения $\ddot{\phi} = g$ (8-балльное землетрясение)

сейсмическом воздействии, разработанный на основе кода "РАНДЕВУ-3" [6].

На рис. 1 показаны результаты проведенных по программе "ТЕРМОК-С" расчетов сейсмических нагрузок для пяти форм колебаний и результирующего перемещения кассеты, имеющей собственные частоты $f_1 = 3,383$ Гц, $f_2 = 7,505$ Гц, $f_3 = 11,643$ Гц, $f_4 = 17,025$ Гц и $f_5 = 22,602$ Гц, определенные по коду "UZOR" [4] в РНЦ "КИ".

В расчетах получены значения $\Phi_1 = 1,291$; $\Phi_2 = -0,016$; $\Phi_3 = 0,501$; $\Phi_4 = 0,126$; $\Phi_5 = -0,01$.

Поскольку для различных реальных реакторных установок будут различные кривые обобщенных спектров ответа горизонтальных колебаний, то реальные значения ускорений, соответствующие согласно спектрам ответа различным собственным частотам $f_1 \div f_5$ в обобщенном для ряда реакторов расчете, определить не представляется возможным.

Поэтому для расчетных оценок принят консервативный подход, состоящий в том, что для всех частот $f_1 \div f_5$ берется одинаковое приведенное ускорение $\ddot{\phi}$, равное максимальному значению ускорения согласно спектру отклика для этих частот.

На рис. 1 даны сейсмические нагрузки и перемещения кассеты для интенсивности землетрясения с приведенным ускорением $\ddot{\phi} = g$ (8-балльное землетрясение).

Как видно из рис. 1, основной вклад в сейсмическую нагрузку дает первая форма, вклады второй и пятой форм ничтожно малы, а третья и четвертая формы дают постепенно затухающие вклады.

Для проведения расчетов при заданной балльности землетрясения площадки АЭС можно использовать зависимости обобщенных спектров ответа горизонтальных колебаний, рекомендованных в "Нормах..." [3] для оборудования в составе унифицированных АЭС с ВВЭР-1000.

Для сейсмичности площадки 8 баллов и отметки расположения реактора 0 м из рис. П.9.1 и табл. П.9.1 "Норм..." [3] имеем значение приведенного ускорения $\ddot{\phi} \approx g = 9,81$ м/с².

ДЕФОРМИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Для оценки горизонтального сейсмического воздействия на активную зону ВВЭР-1000 с ТВС-2, имеющей жесткий каркас НК и ДР, рассматриваются последствия действия землетрясения в конце кампании для установившегося 4-годового топливно-го цикла.

Деформации ансамбля ТВС, составляющих активную зону реактора, под действием сейсмического нагружения с учетом начального стартового состояния активной зоны рассчитывались с помощью версии кода "РАНДЕВУ-С".

Учитывались искривления кассет, силы взаимодействия между ними и их состояния в момент, предшествующий землетрясению.

Рассматривалось сейсмическое деформирование кассет активной зоны для двух направлений ударов:

- по оси ОХ, когда сейсмические нагрузки действуют по линии с угла на угол кассеты;

- по оси ОУ, когда сейсмические нагрузки направлены по линии, перпендикулярной граням кассет.

Были проведены расчеты деформирования ансамбля кассет реактора ВВЭР-1000 под действием сейсмических нагружений различной интенсивности для ряда значений приведенных ускорений $\ddot{\phi} = 0,25g; 0,5g; 0,75g; g; 1,25g; 1,5g; 1,6g; 1,75g$ и $2,0g$.

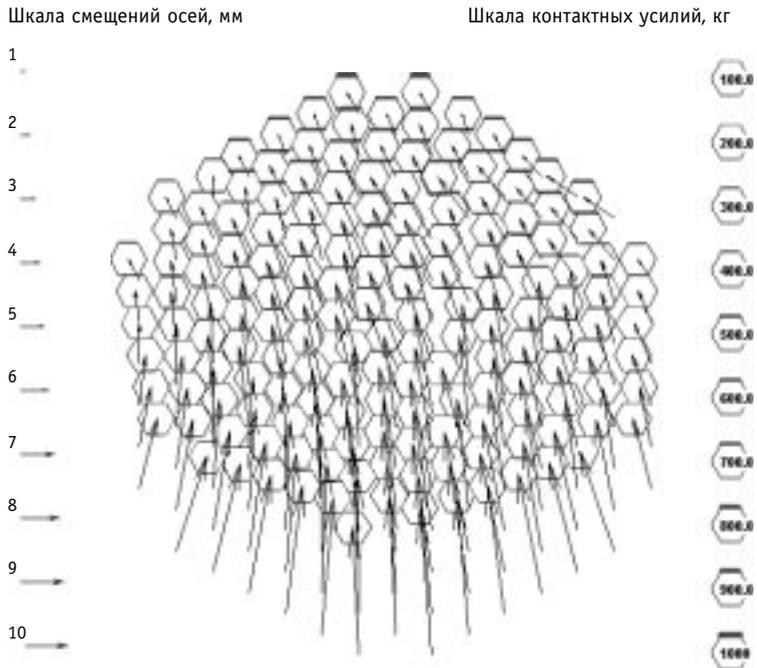


Рис.2. Расчетная картограмма смещения кассет, векторы смещений центров ТВС относительно проектных положений, усилия взаимодействия и зазоры между гранями ДР кассет на уровне 7 ДР. Для ускорения $\dot{\phi}_x = g$



Рис.3. Расчетная картограмма смещения кассет, векторы смещений центров ТВС относительно проектных положений, усилия взаимодействия и зазоры между гранями ДР кассет на уровне 7 ДР. Для ускорения $\dot{\phi}_y = g$

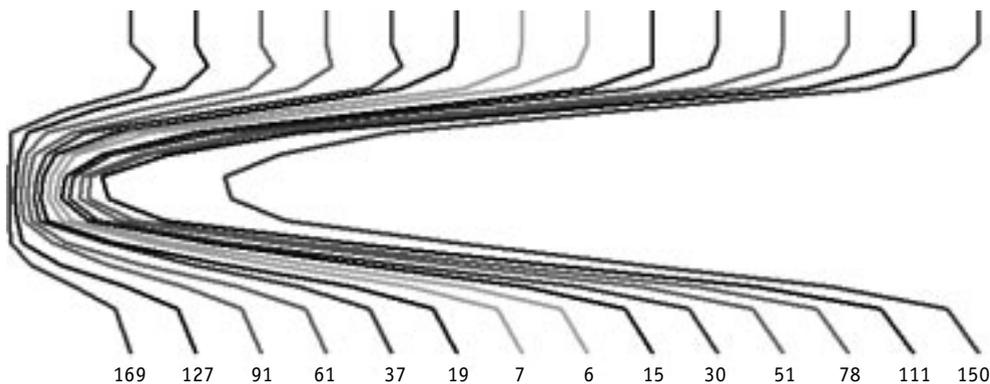


Рис. 4. Проекция изогнутых осей. Для ускорения $\ddot{\varphi} = g$

На рис. 2-4 приведены результаты расчетов для приведенного ускорения при сейсмическом воздействии, равного $\ddot{\varphi} = g$. Расчетные картограммы смещений кассет, векторы смещений центров ТВС относительно проектных положений, усилия взаимодействия и зазоры между гранями ДР-кассет в центральном по высоте активной зоны сечении для двух направлений ударов приведены на рис. 2, 3.

Проекция изогнутых осей кассет на вертикальную плоскость, проходящую через проектные положения центров ТВС с обозначенными номерами, для направления удара по оси ОУ даны на рис. 4. Масштабы прогибов осей ТВС и зазоров между гранями ДР определяются расстоянием между верхними концами осей, равным 2,8 мм в горячем состоянии.

Из сравнения результатов расчетов поведения ТВС активной зоны при горизонтальном сейсмическом воздействии с различными значениями приведенных ускорений $\ddot{\varphi} = 0,25g \div 2,0g$ можно сделать следующие заключения.

Для больших значений $\ddot{\varphi}$ ($1,0g \div 2,0g$) картограммы смещений кассет и проекция изогнутых осей аналогичны приведенным на рис. 2-4, но нагрузки на ТВС существенно возрастают с ростом $\ddot{\varphi}$.

Из рассмотрения рис. 2-4 видно, что при значениях приведенных ускорений $\ddot{\varphi} > g$ кассеты при сейсмическом воздействии собираются в плотную упаковку, давя друг на друга и на часть выгородки, на которую направлен удар.

Прилегающие к ударяемой части выгородки ТВС выполаживаются вдоль выгородки; при этом они оказываются наиболее нагруженными сжимающими усилиями.

Для приведенных ускорений $\ddot{\varphi} < g$ кассеты при сейсмическом воздействии не полностью собираются в плотную упаковку, часть из них остается висеть. Только ряды крайних к выгородке кассет выбирают зазоры между гранями ДР и выгородкой и ударяют по выгородке.

Из рис. 2 и 3 также видно, что характер деформирования ансамбля кассет при сейсмическом воздействии в направлениях осей ОХ и ОУ различен. При нагружении вдоль оси ОХ кассеты ансамбля как бы "встают в распор" и в большей степени нагружают две "боковые" (верхнюю и нижнюю) стороны выгородки, нежели "заднюю" сторону выгородки, на которую направлен удар. Поэтому наибольшие сжимающие нагрузки испытывают ТВС, прижатые к "боковым" сторонам выгородки, а не к "задней" стороне.

При нагружении вдоль оси ОУ кассеты ансамбля нагружают, в основном, "заднюю" сторону выгородки, и наибольшие сжимающие нагрузки испытывают ТВС, прижатые к этой стороне.

Таблица 1

Значения сжимающих усилий (Н) на гранях ТВС при сейсмическом воздействии в направлении от угла к углу кассеты

$\ddot{\varphi}$ /g	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,60	1,75	2,00
ДР №4	0	0	0	0	173	244	456	1042
ДР №5	12	467	1437	3057	5181	6130	7526	10019
ДР №6	336	1894	3899	6205	7613	8429	9276	9736
ДР №7	448	1031	2759	4825	6584	7337	8350	9307
ДР №8	189	826	1812	3046	4935	5680	6825	8710
ДР №9	0	0	92	395	814	983	1328	2036

Таблица 2

Значения сжимающих усилий (Н) на гранях ТВС-2 при сейсмическом воздействии в направлении от грани к грани кассеты

$\ddot{\varphi}$ /g	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,60	1,75	2,00
ДР №4	0	0	0	183	417	588	840	1426
ДР №5	44	801	2462	4460	7043	8103	9827	12904
ДР №6	1194	3139	5941	8691	10422	10946	11868	12905
ДР №7	1655	2781	4770	7517	9744	10599	11713	13497
ДР №8	310	1521	3097	5140	7450	8461	9938	12449
ДР №9	0	0	223	616	1199	1496	2018	3086

Максимальные значения сжимающих грани ДР ТВС усилий на уровнях 4-й, 5-й, 6-й, 7-й, 8-й, 9-й ДР для сейсмического нагружения вдоль осей ОХ и ОУ при различных значениях приведенных ускорений $\ddot{\varphi}$ даны в табл. 1, 2.

ДР №6 и №7 расположены вблизи от среднего сечения по высоте активной зоны.

Указанные значения сжимающих ДР усилий могут быть использованы для проектного обоснования прочности ТВС при сейсмическом нагружении с заданными значениями приведенных ускорений $\ddot{\varphi}$, соответствующими максимальному расчетному и проектному землетрясениям конкретного блока АЭС.

Для обоснования целостности конструкции ТВС при таком нагружении необходимо провести испытания моделей ТВС на смятие при воздействии максимальной поперечной нагрузки, полученной из расчетного прогнозирования.

В процессе динамического сейсмического воздействия на активную зону на первом этапе происходит однонаправленное деформирование ТВС, вызывающее одностороннее нагружение выгородки в направлении сейсмического удара, и возникновение сжимающих сил взаимодействия между кассетами. Характерная длительность этого этапа сейсмического воздействия 0,1 секунды.

Затем на последующих этапах нагружения происходит упругая отдача продеформированных и прижатых к выгородке кассет, которые получают обратное движение с возникновением затухающих осцилляций. При этом искривления кассет на первом этапе сейсмического нагружения максимальны по величине. В последующих осцилляциях искривления уменьшаются за счет диссипации энергии, вызываемой силами трения внутри кассет и кассет между собой, а также сопротивлением среды (теплоносителя).

Литература

1. *Бирбаер А.Н., Шульман С.Г.* Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. *Бирбаер А.Н.* Расчет конструкций на сейсмичность. – С.-Пб.: Наука, 1998.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭГ-7-002-86. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. *Киселев А.С., Киселев А.С., Даничев В.В.* аннотация программы “UZOR”//Вант. Сер. Физика ядерных реакторов. – 1999. - Вып. 1. - С. 109-113.
5. *Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И.* Метод расчета продольно-поперечного изгиба бесчехловой ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатационных нагрузках//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. - № 2. – С. 44-53.
6. *Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И.* Общая постановка исследований термомеханического поведения активной зоны ВВЭР-1000//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. - № 2. – С. 33-43.

Поступила в редакцию 25.05.2002

АНАЛИЗ АВАРИИ РАЗГОНА БЫСТРОГО РЕАКТОРА В ПРИБЛИЖЕНИИ «МГНОВЕННОГО СКАЧКА»

Н. М. Каджури

Московский физико-технический институт, г. Москва



В приближении «мгновенного скачка» проведены оценки предельного ввода реактивности ρ_m ведущего к разрушению топлива.

ВВЕДЕНИЕ

Ввод реактивности $\rho(t)$ в быстрый реактор с малым временем жизни нейтронов и с мгновенно реагирующей на температуру топлива T отрицательной обратной связью $- (T)$ приводит к серии вспышек мощности. Выполненные в [1] расчеты показывают, что для теплопроводного и термостойкого топлива (например, нитридного) с большим запасом ΔT_m до температуры его разрушения при скорости ввода реактивности $\dot{\rho}$ в десятки \$/сек. рост температуры во вспышке оказывается небольшим, $\Delta T \ll \Delta T_m$. В этом случае возможно описание аварийного процесса усредненной по вспышкам мощностью $p(t)$, что соответствует «приближению нулевого времени жизни нейтронов ($\tau = 0$)», подобному «приближению мгновенного скачка» (2). Использование такого приближения позволяет упростить громоздкий численный расчет реактивностных аварий в быстром реакторе, значительно увеличив шаг по временной оси.

Ниже анализируются простейшие аналитические решения уравнений одноотечечной кинетики в этом приближении (для упрощения теплоемкость топлива $C(T)$ и $\frac{d\rho_f}{dT}$ принимаются постоянными).

Оценки по простым моделям остаются необходимой частью анализа нейтронных процессов в реакторах как для выработки физических представлений об их закономерностях, так и для построения рациональных способов численных расчетов.

Рассмотренные простейшие примеры демонстрируют особенности приближения « $\tau = 0$ », требующие учета при построении расчетных схем: скачки мощности при изменении $\dot{\rho}$, возникновение нефизических отрицательных решений при $\dot{\rho} < 0$.

Нашей задачей является также оценка предельного ввода реактивности ρ_m , ведущего к разрушению топлива, в зависимости от $\beta_{эф}$ и ρ_f . Эта практически важная для безопасности реактора величина зависит также от времени аварийного процесса по сравнению с временами температурной релаксации топлива θ_c и распада источников запаздывающих нейтронов $\frac{1}{\lambda}$. Поэтому наряду с быстрым адиабатическим разгоном ниже рассмотрены и случаи медленного ввода реактивности, когда прибли-

жение « $\tau=0$ » заведомо приемлемо.

ПРИБЛИЖЕНИЕ НУЛЕВОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕЙТРОНОВ

Быстрый разгон реактора при вводе реактивности с высокой скоростью $\dot{\rho} \left(\frac{\rho\theta}{\beta_{эф}} \gg 1 \right)$ имеет адиабатический характер и при $\tau = 0$ в «одноточечном» приближении описывается уравнением для удельной мощности $p(t)$ (вт/гр)

$$\beta_{эф} p(t) - \rho(t) \cdot p(t) + \frac{\rho_0}{\theta_c \rho_0} \cdot p(t) \cdot \int_0^t (p(t') - p_0) \cdot dt' = \beta_{эф} p_0, \quad (1)$$

где p_0 - исходная мощность; $\rho_0 = \frac{d\rho_f}{dt} \cdot \Delta T_0$ - температурный эффект по топливу при мощности $p = p_0$; $\Delta T_0 = \frac{p_0 \theta_c}{C}$ - превышение средней температуры топлива над температурой теплоносителя при $p = p_0$.

Разделив (1) на $p(t)$ и дифференцируя по t , получим уравнение

$$\frac{\beta_{эф} p_0}{p^2(t)} \frac{dp(t)}{dt} = \dot{\rho}(t) - \frac{\rho_0}{\theta p_0} (p(t) - p_0), \quad p(0) = p_0. \quad (2)$$

Рассмотрим сначала предельный случай $\beta_{эф} \rightarrow 0$ с решением

$$p(t) = p_0 \left(1 + \frac{\theta \dot{\rho}(t)}{\rho_0} \right), \quad (3)$$

дающим скачкообразный рост мощности при вводе реактивности со скоростью $\dot{\rho}$. При снижении $\dot{\rho}$ мощность $p(t)$ падает вплоть до отрицательных значений при $\dot{\rho} < 0$. Возникновение физически неверного отрицательного решения связано с нарушением условия применимости приближения « $\tau = 0$ »

$$\frac{\tau dp}{p dt} \ll 1$$

при приближении $p(t)$ к нулю. Учет в уравнении нейтронной кинетики члена $\tau \frac{dp}{dt}$, опущенного в (1), привел бы к быстрому экспоненциальному обращению в ноль $p(t)$ без перехода в отрицательную область. Исправление этого дефекта приближения « $\tau = 0$ » состоит поэтому в замене на ноль отрицательных величин $p(t)$.

Из (3) рост температуры топлива при вводе реактивности ρ составит

$$\Delta T = \frac{1}{c} \cdot \int_0^t (p(t) - p_0) dT = \frac{p_0 \theta}{c \rho_0} \rho(t) = \Delta T_0 \cdot \frac{\rho(t)}{\rho_0}.$$

При $\beta_{эф} > 0$ и линейном вводе реактивности $\rho(t) = \dot{\rho} t$, подставив в (2)

$$p(t) = p_m (1 - v(t)),$$

где $p_m = p_0 \cdot \left(1 + \frac{\theta \cdot \dot{\rho}}{\rho_0} \right)$ - асимптотическое значение мощности при больших t , получим для $v(t)$ уравнение

$$\frac{p_m}{p_0} \cdot \frac{d\rho}{\beta} = -\frac{dv}{v(1-v)^2} \left(v(0) = 1 - \frac{p_0}{p_m} \right) \tag{4}$$

с решением

$$\frac{\rho(t)}{\beta} = 1 + \frac{p_0}{p_m} \cdot \ln\left(\frac{p_m}{p_0} - 1\right) - \frac{p_0}{p_m} \cdot \left(\frac{1}{1-v(t)} + \ln\left(\frac{v(t)}{1-v(t)}\right) \right),$$

изображаемым кривой на рис. 1.

По сравнению с $\beta=0$ рост мощности от p_0 до p_m растягивается на время $t \sim \frac{\beta}{\dot{\rho}}$, за которое вводится реактивность $\rho \sim \beta$.

Умножая (4) на $v(t)$ и интегрируя по ρ от нуля до ρ_m , получим

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_0} = \frac{\rho_m - \beta}{\rho_0} + \frac{\beta}{\theta \cdot (1-v(t)) \cdot \dot{\rho}}; \tag{5}$$

при $\rho_m \ll \beta$ $\frac{\Delta T_m}{\Delta T_0} \cong \frac{\rho_m}{\rho_0}$ мало, при $\rho = \beta$ $\frac{\Delta T_m}{\Delta T_0} = \frac{\beta}{\theta \cdot 0.782 \cdot \dot{\rho}}$ остается малым и растет до опасных пределов лишь при $\rho > \beta$.

Если взять за ΔT_m предельный рост температуры топлива, за которым наступает его разрушение в результате фазовых превращений и фрагментации, то предельная реактивность, не ведущая к разрушению,

$$\rho_m = \beta_{эфф} + \rho_0 \cdot \frac{\Delta T_m}{\Delta T_0} = \beta_{эфф} + \frac{d\rho_f}{dT} \cdot \Delta T_m. \tag{6}$$

Для термостойких и теплопроводных топлив $\frac{\Delta T_m}{\Delta T_0}$ велико, и безопасные для аварий быстрого разгона пределы ввода реактивности ρ_m могут существенно превысить величину β в зависимости от обратной связи $\frac{d\rho_f}{dT}$ и температурного запаса до разрушения топлива ΔT_m , т.е. от его термостойкости и теплопроводности.

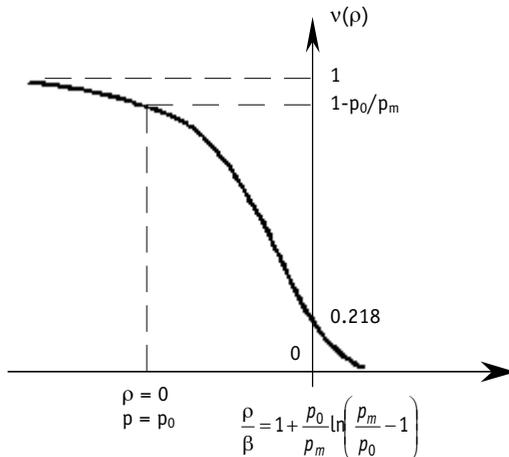


Рис. 1

Пределы быстрого ввода реактивности, не ведущего к разрушению топлива, могут поэтому быть расширены достаточно далеко за $\beta_{эфф}$. Разумеется, более определенная формулировка критерия безопасности реактора в отношении экстремальных аварий с быстрым вводом реактивности требует более детального исследования.

БОЛЕЕ МЕДЛЕННЫЕ АВАРИИ С ВВОДОМ РЕАКТИВНОСТИ

А. При $\dot{\rho} \leq 1\$/с$ $\frac{\rho \cdot \dot{\theta}_c}{\beta} \leq 1$ существенным становится вынос тепла из топлива с разогревом оболочек твэлов и теплоносителя, выносящего тепло из реактора. Между ними устанавливается распределение температур, растущих с $\rho(t)$. Величина обратной связи, учитывающей влияние всех этих компонентов, определяется мощностным эффектом реактивности $\rho_f(\rho) = \rho_0 \cdot \frac{\rho(t)}{p_0}$, ρ_0 - мощностной эффект реактора на исходной мощности p_0 .

В приближении $\tau = 0$ уравнение одноточечной кинетики реактора на мгновенных нейтронах

$$\beta \rho(t) - \rho(t) p(t) + \rho_0 \frac{p(t) - p_0}{p_0} p(t) = \beta p_0 \tag{7}$$

имеет решение

$$\rho(\rho) = \frac{2 \cdot p_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{\rho}{\beta} - \frac{\rho_0}{\beta}\right)^2 + 4 \cdot \frac{\rho_0}{\beta}} + 1 - \frac{\rho}{\beta} - \frac{\rho_0}{\beta}} \tag{8}$$

Зависимость $\frac{\rho(\rho/\beta)}{p_0} = \frac{\Delta T(\rho)}{\Delta T_0} + 1$ при различных $\frac{\rho_0}{\beta}$ приведена на рис. 2.

В. При $\dot{\rho} < 0.1\$/с$ кинетика реактора определяется запаздывающими нейтронами

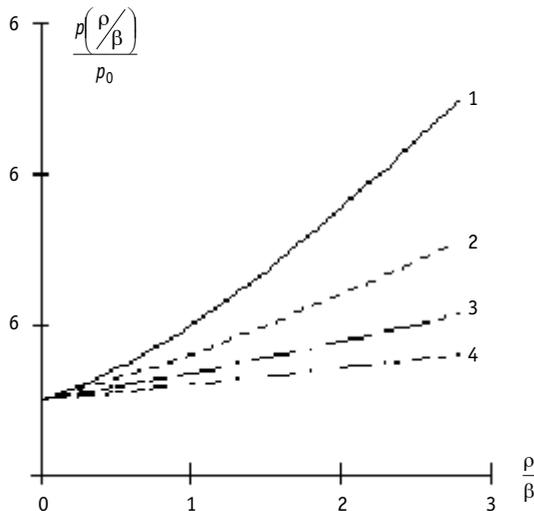


Рис.2. Зависимость $\frac{\rho(\rho/\beta)}{p_0} = \frac{\Delta T(\rho)}{\Delta T_0} + 1$ при различных $\frac{\rho_0}{\beta}$ (1-0.5, 2-1, 3-2, 4-4: $\frac{\rho_0}{\beta}$)

со средней постоянной распада $\lambda \sim 0.1 \text{c}^{-1}$, $\frac{\dot{\rho}}{\lambda \beta} \leq 1$. Среднее время жизни нейтронного поколения значительно увеличивается по сравнению с τ , но остается небольшим, $\frac{\beta}{\lambda} < 0,1 \text{c}$, поэтому в уравнении кинетики

$$\frac{\beta}{\lambda} \cdot \frac{dp(t)}{dt} = \rho p(t) - \rho_0 \frac{p - p_0}{p_0} p(t) \quad (9)$$

левая часть для малых ρ невелика и обуславливает лишь небольшое запаздывание в развитии разгона, вызываемого вводом реактивности $\rho(t)$. Пренебрегая производной, получим

$$p(t) = p_0 \left(1 + \frac{\rho(t)}{\rho_0} \right),$$

так что $\frac{\Delta T(\rho)}{\Delta T_0} = \frac{\rho(t)}{\rho_0}$.

При медленном вводе допустимая реактивность определяется величиной мощностного эффекта ρ_0 и пределами кратковременного (десятки секунд) повышения температуры теплоносителя (кипение), оболочек твэлов (плавление) и топлива (разрушение).

При ρ_0 масштаба и больших запасах до критических температур пределы аварийного ввода реактивности без разрушения топлива и других экстремальных последствий могут быть также расширены за пределы $\rho = \beta_{эфф}$ и для медленных процессов.

Литература

1. Каджури Н.М. Аварии разгона быстрого реактора. Простейшие Модели и закономерности// Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2000. - №2. - С. 72-78.
2. Hetrick David L. Dynamics of Nuclear Reactors, chapter 3, The University of Chicago press, 1971.

Поступила в редакцию 12.04.2002

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СФЕРОИДАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛЬЕФА И СХЕМЫ ИХ РАСПОЛОЖЕНИЯ НА ТЕПЛОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАСТИНЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА

В.Т. Буглаев, А.А. Анисин

Брянский государственный технический университет, г. Брянск



Приводятся результаты экспериментальных исследований теплоаэродинамических характеристик опытных вариантов профильной пластинчатой поверхности теплообмена с различной геометрией проходных сечений смежных каналов и оценивается их тепловая эффективность.

Интенсификация процессов конвективного теплообмена, направленная на улучшение работы существующих и создание перспективных экономичных и надежных теплообменных аппаратов, является важной задачей технического развития в условиях стремительно нарастающего дефицита энергетических ресурсов.

Одним из направлений в производстве компактных и эффективных теплообменников является использование высокотехнологичных пластинчатых поверхностей теплообмена с различными оптимальными геометрическими формой и параметрами элементов рельефа, обеспечивающими высокий уровень теплоотдачи в каналах со сложной конфигурацией. Положительным технологическим резервом пластины с профильной поверхностью является также возможность ее применения при изготовлении круглых сварных труб с рациональным типом и формой пристенных интенсификаторов. Поэтому поиск и исследование поверхностей с эффективной геометрической формой рельефа и нестандартными компоновочными решениями в конструкции теплообменных аппаратов представляют научный и практический интерес.

Одной из ряда заслуживающих внимания эффективных профильных поверхностей является пластинчатая поверхность теплообмена с шахматной и коридорной схемами расположения двухсторонних сфероидальных элементов. Поверхность имеет высокие теплогидродинамические характеристики и отличается технологичностью и многовариантностью компоновки пластин в матрице теплообменного аппарата, а также возможностью трансформации в трубчатую поверхность с шероховатостью в виде сфероидальных выступов и впадин со значительным интенсифицирующим тепловым эффектом [1-4]. Из анализа работ по исследованию поверхности с указанным типом рельефа выявлено предпочтение использования компоновок пластин с контактирующими вершинами сфероидальных элементов (рис. 1), что объясняется положительными конструктивными особенностями теплообменника с нагруженным корпусом и

высокими тепловыми показателями поверхности сетчато-поточного типа [1, 2]. Актуальность вопросов более глубокого и подробного исследования ее характеристик и возможностей широкого практического использования в теплообменных устройствах различного назначения приобретает большую значимость в связи с пристальным вниманием к применению с целью интенсификации теплообмена в пристенной области с максимальным поперечным градиентом температуры интенсификаторов различного конструктивного исполнения и формы: цилиндрических, сферических, призматических выступов и выемок с различным расположением относительно направления потока. Активный интерес, судя по количеству публикаций, был проявлен к исследованиям особенностей интенсификации теплообмена с помощью сферических выемок (углублений) на гладкой поверхности, продемонстрировавшим высокую энергетическую эффективность поверхности теплообмена и перспективу возможного использования различных вариантов такого рельефа [5]. Вместе с тем следует отметить, что теплофизические свойства и «чистота» теплоносителей, геометрические параметры с жесткими допусками и особенностями технологии профилирования поверхности со сферическими выемками с наиболее рациональной относительной глубиной $h/d \leq 0,1 \dots 0,2$, область использования и условия эксплуатации, обслуживание и режимный диапазон чисел Re , обеспечивающий проявление теплового эффекта, а также необходимость дальнейших исследований и уточнения зависимостей для расчета теплоотдачи и гидродинамического сопротивления в каналах с системой сферических выемок накладывают определенные существенные ограничения их широкого применения. Очевидно и то, что опытная пластинчатая поверхность теплообмена с двухсторонними сфероидальными выступами и впадинами с эффективными результатами испытаний ее теплогидродинамических характеристик, положившая начало представительному ряду публикаций по интенсификации теплообмена в плоских щелевых каналах с помощью сферических выемок (углублений, лунок), является, по существу, аналогом указанных интенсифицирующих теплообмен элементов рельефа поверхности [6].

Сложная геометрия проходных сечений каналов различных компоновок пластинчатой поверхности с двухсторонними сфероидальными элементами синтезирует в структуре отрывного потока особенности продольного течения в канале (внутренняя задача) и внешнего поперечного обтекания элементов рельефа, формирующие существенно трехмерный характер движения теплоносителя. Положительным качеством поверхности с шахматной схемой расположения выступов и впадин при равновеликой штамповке является также наличие по обеим сторонам пластины неизменной по потоку величины проходного поперечного сечения, что уменьшает склонность к загрязнению поверхности теплообмена и улучшает условия «самообдувки» в каналах смежных теплоносителей при различной ориентации элементов рельефа относительно направления движения потока [2]. При этом определенным недостатком теплообменных аппаратов с указанной компоновкой является одинаковая величина проходных сечений каналов для разных по физическим свойствам и рабочим параметрам теплоносителей по обеим сторонам профильного листа (рис. 1, I-III а). Особенно остро этот недостаток проявляется в теплообменниках с большими расходами и разной плотностью газообразных теплоносителей в условиях массогабаритных ограничений, предъявляемых к аппаратам энергетических установок, когда не всегда удается обеспечить рациональные соотношения расходов и скоростей для смежных теплоносителей за счет различных схем включения и комбинирования каналов рабочих сред без ухудшения массовых и объемных характеристик теплообменных аппаратов [7]. Возможность реализации компоновок теплообменной поверхности с разными проходными сечениями для теплоносителей, отличающихся между собой по

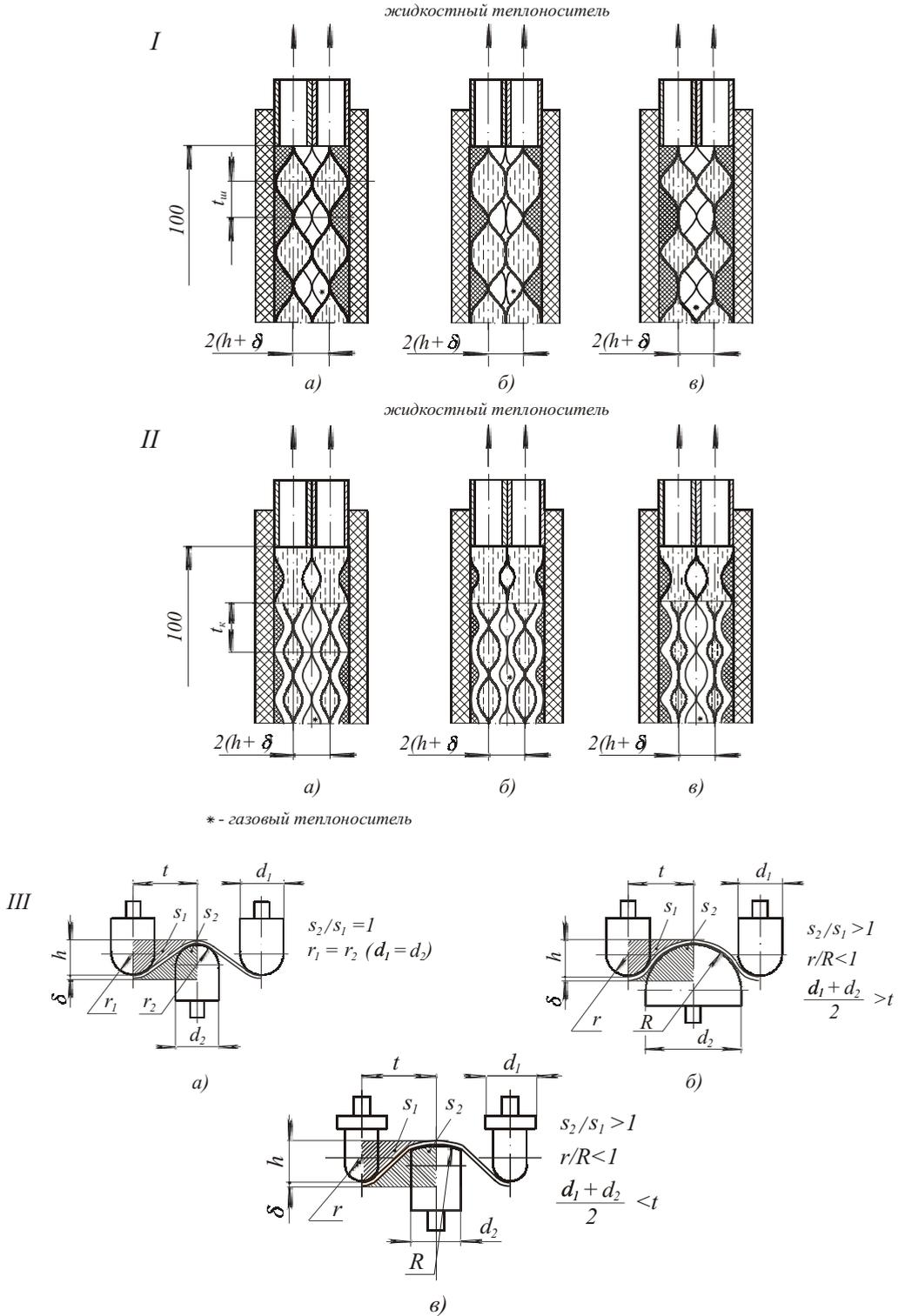


Рис. 1. Проходные сечения каналов опытных пластинчатых теплообменников с шахматной (I) и коридорной (II) схемами расположения элементов рельефа поверхности: а) - равнеликие сечения смежных каналов; б), в) - разнеликие сечения смежных каналов; III - геометрия профилирующих элементов: а) - при равнеликих смежных каналах; б), в) - при разнеликих каналах

физическим свойствам и давлениям рабочих сред, может быть достигнута при использовании поверхности с разновеликой выштамповкой или компоновок поверхности с промежуточными (между теплоотдающими поверхностями) профильными листами [8, 9].

Как было показано в [10] на примере расчета пластинчатого регенератора ГТУ, с увеличением относительной глубины разновеликой штамповки h/t увеличиваются проходные сечения каналов ($s_1 = s_2$) и объем теплообменного аппарата, но вместе с тем уменьшается площадь поверхности теплообмена, число профильных пластин матрицы и ее масса и, следовательно, сокращается стоимость материала и трудозатрат на изготовление теплообменника, определяющие экономическую целесообразность применения поверхности с большой глубиной штамповки сфероидальных элементов h . С изменением геометрических параметров штамповки пластинчатой поверхности теплообмена изменяется и соотношение основных размеров матрицы теплообменника: ширины, высоты, длины ($B \times H \times L$).

Повышение относительной глубины h/t , обусловленное увеличением абсолютной глубины штамповки h и уменьшением шага расположения профильных элементов поверхности t , в значительной мере определяется соотношением диаметров профилирующих сфероидальных элементов d_1/d_2 , а также пластическими прочностными характеристиками материала пластин. В отличие от разновеликой штамповки ($r_1=r_2$) (рис.1, III а) профилирование поверхности с противоположных сторон пластины штампуемыми элементами с разными радиусами сферы (разновеликая штамповка ($r/R < 1$)) позволяет изменить соотношение проходных сечений для смежных теплоносителей и обеспечить $s_2/s_1 > 1$ (рис.1, III б; рис. 2 а).

Однако результаты расчета величины отношения проходных сечений каналов для смежных теплоносителей по обеим сторонам пластины с шахматным расположением профильных элементов, приведенные на рис. 2 в виде зависимостей $s_2/s_1 = f(r, R, h, t)$ [8], и пробная штамповка поверхности теплообмена из стали 1X18H9T толщиной $\delta = 0,25$ мм показали проблематичность практической реализации соотношения $s_2/s_1 > 1,5$ при $r/R = 0,2 \dots 0,5$, т.к. растяжение металла выходит за пределы пластической деформации.

Один из возможных вариантов повышения относительной глубины h/t и достижения более высоких значений соотношения s_2/s_1 может быть осуществлен при использовании при штамповке с одной из сторон пластины профилирующих цилиндрических элементов с диаметром $d_2 \geq d_1$, со сферической сегментной головкой и радиусом сферы $R > (d_2/2)$, обеспечивающих при этом условие $0.5(d_1+d_2) < t$ (рис.1, III в).

Для оценки аэродинамических характеристик опытной пластинчатой поверхности были проведены испытания моделей теплообменников с разновеликими проходными сечениями ($s_2/s_1 < 1$) для смежных теплоносителей по обеим сторонам пластин с шахматной и коридорной схемами расположения и различной формой профильных выступов и впадин: сфероидальных и сегментных, образованных цилиндрическими штампуемыми элементами с радиусом сферы рабочей части соответственно $r=2,5$ мм и $R=15$ мм. Глубина штамповки элементов рельефа на пластинах из стали 1X18H9T толщиной $\delta=0.25$ мм с шахматной схемой расположения составляла $h=4,3$ мм при величине шага чередования выступов и впадин $t_w = 10$ мм, с коридорной схемой – $h_k=4,1$ мм и $t_k = t_w \sqrt{2} = 10\sqrt{2} = 14,14$ мм (квадратное расположение выступов или впадин). Площадь проекции профильной части пластин равнялась 100×210 мм². В качестве теплоносителя использовался воздух. Основные геометрические характеристики исследованных вариантов пластинчатой поверхности теплообмена представлены на рис.1 и в табл. 1.

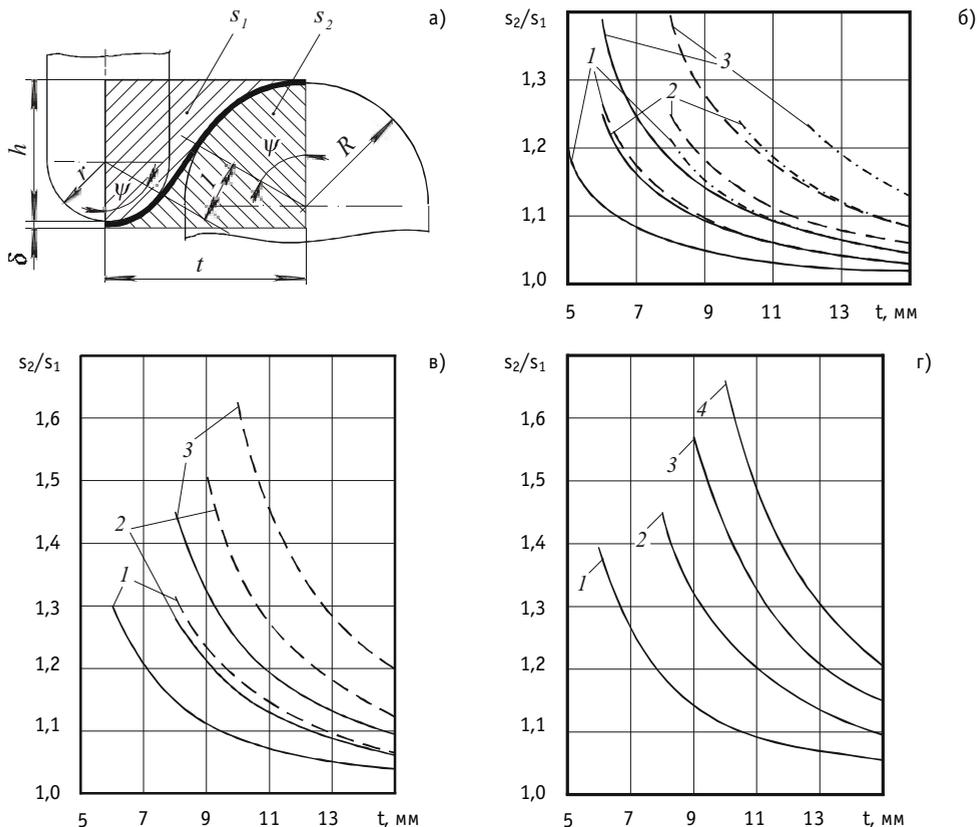


Рис. 2. Схема элемента пластинчатой поверхности с разновеликими сечениями а) и расчетные значения геометрических соотношений проходных сечений $s_2/s_1 = f(r, R, h, t)$: б) $r/R=0,5$; ———— $r/R=2/4$, - - - - - $r/R=3/6$, - · - · - $r/R=5/10$; в) $r/R=0,3$; ———— $r/R=2/6$, - - - - - $r/R=3/10$, где 1 - $h = 2$ мм; 2 - $h = 3,5$ мм; 3 - $h = 5$ мм; г) 1 - $r/R=2/4$; 2 - $r/R=2/6$; 3 - $r/R=2/8$; 4 - $r/R=2/10$ при $h = 5$ мм

Таблица 1

Геометрические характеристики исследованных вариантов поверхности теплообмена

Номер опытного теплообменника	Компоновка поверхности теплообмена на рис. 1	Шаг профильных элементов поверхности $t_{ш}(t_k)$, мм	Соотношение радиусов рабочей поверхности штампующих элементов r/R	Относительная глубина штамповки h/t
1	I б	10	2,5/15	$4,3/10 = 0,43$
2	I в	10	15/2,5	$4,3/10 = 0,43$
3	II б	$10\sqrt{2}$	2,5/15	$4,1/10\sqrt{2} = 0,29$
4	II в	$10\sqrt{2}$	15/2,5	$4,1/10\sqrt{2} = 0,29$
5	I а	10	4,75/4,75	$4,45/10 = 0,445$
6	II а	$10\sqrt{2}$	4/4	$4,3/10\sqrt{2} = 0,3$

Конструктивные и технологические особенности изготовления пластинчатой поверхности и опытных теплообменников, описание экспериментальной установки в виде аэродинамической трубы разомкнутого типа, работающей на всасывание от вентилятора низкого давления, а также методика исследования пластинчатой повер-

ности теплообмена со сфероидальными элементами приведены в [2].

Результаты проведенных исследований средней величины теплоотдачи и аэродинамического сопротивления опытных теплообменников с различными вариантами рельефа поверхности теплообмена приведены на рис. 3 и 4 в виде зависимостей $Nu_h=f(Re_h)$ и $Eu_L=f'(Re_h)$ и в табл. 2 в виде коэффициентов и показателей степени критериальных уравнений теплоотдачи $Nu_h = aRe_h^n$ и сопротивления $Eu_L = bRe_h^{-m}$, где $Nu_h = \alpha h/\lambda$, $Eu_L = \Delta p/\rho w^2$, $Re_h = wh/\nu$.

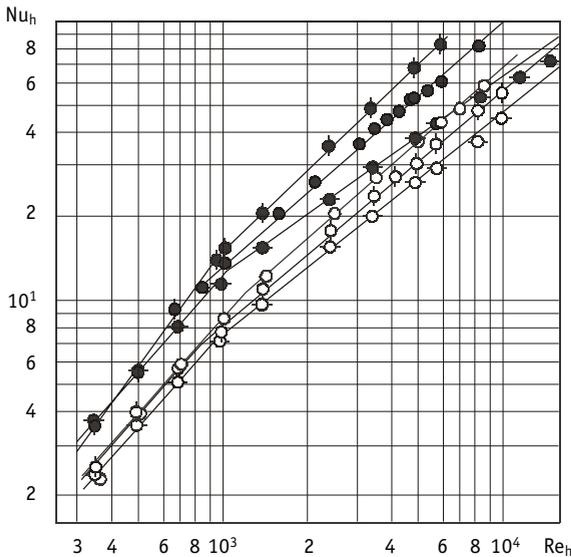


Рис. 3. Теплоотдача опытных вариантов пластинчатой поверхности теплообмена: ● - 1; ● - 2; ○ - 3; ○ - 4; ● - 5; ○ - 6 (1 - 6 - табл. 1, 2)

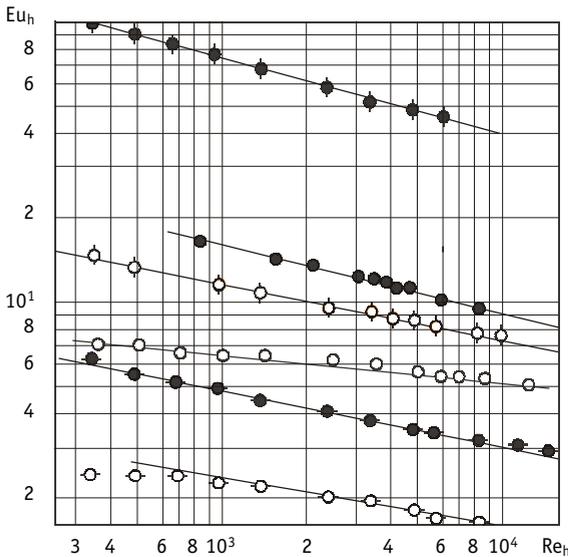


Рис. 4. Сопротивление опытных вариантов пластинчатой поверхности теплообмена: ● - 1; ● - 2; ○ - 3; ○ - 4; ● - 5; ○ - 6 (1 - 6 - табл. 1, 2)

Для сравнения энергетической эффективности поверхности теплообмена с различными вариантами рельефа в табл. 1, 2 (п. 5 и 6) и на рис. 3 и 4 приведены также геометрические характеристики и результаты испытаний теплоаэродинамических показателей компоновок поверхности с равновеликими проходными сечениями смежных каналов, с наиболее близкими к представленным вариантам поверхности с разновеликими проходными сечениями, значениями глубины штамповки сфероидальных элементов рельефа $h_w=4,45$ мм и $t_w=10$ мм (п. 5) с шахматной схемой расположения (по данным [2]) и $h_k=4,3$ мм и $t_k=14,14$ мм - с коридорной (п. 6) (по [3]).

В качестве определяющих параметров при обработке опытных данных принимались значения средних величин: температуры потока воздуха t_f , скорости в поперечном сечении воздушного канала (соответствующей величине скорости w в поперечном сечении компоновок поверхности с шахматным расположением равновеликих по обеим сторонам листа сфероидальных элементов), глубины сфероидальных выступов и впадин h . Температура стенки $t_{ст}$ принималась равной средней температуре горячей воды в водяных элементах матрицы теплообменника ввиду незначительного термического сопротивления стенки, а также термического сопротивления водяной

Таблица 2

Коэффициенты и показатели степени критерияльных уравнений теплоотдачи и сопротивления опытных вариантов пластинчатой поверхности теплообмена

Номер опытного теплообменника	Теплоотдача		Сопротивление		Диапазон изменения чисел Рейнольдса $Re_1 \dots Re_{кр},$ $Re_{кр} \dots Re_2$
	a	n	b	m	
1	0,000977	1,4	478,63	0,27	300 ... 950
	0,02138	0,95			950 ... 10000
2	0,0051	1,13	19,055	0,2	300 ... 1013
	0,1	0,7			1013 ... 10000
3	0,0035	1,13	45,7	0,2	300 ... 819
	0,0229	0,85			819 ... 10000
4	0,003169	1,13	7,586	0,17	300 ... 926
	0,0302	0,8			926 ... 10000
5	0,03208	0,875	89,12	0,25	900 ... 10000
6	0,00359	1,13	13,0	0,1	300 ... 1223
	0,022	0,875			1223 ... 10000

стороны. Теплофизические свойства воздуха ρ, λ, ν - определялись по среднеарифметическим величинам давления и температуры потока, измеряемым на входе и выходе каналов теплообменников. При этом величина давления является полным гидродинамическим сопротивлением матрицы, включающим в себя входные и выходные потери, потери на трение и потери, связанные с формой сечения воздушных каналов. При определении коэффициента теплоотдачи плотность теплового потока рассчитывалась по площади проекции профильной части теплоотдающей пластины.

Из рис. 3 следует, что величина теплоотдачи поверхности каналов с разновеликими проходными сечениями, образованными профильными элементами рельефа глубиной $h_w = 4,3$ мм с соотношением радиусов контактирующих участков сегментной и сфероидальной поверхности выступов $r/R=2,5/15$ и $R/r=15/2,5$ с шахматной схемой их расположения (табл. 1, 2, п. 1, 2), выше, чем для однотипной поверхности с коридорной схемой расположения профильных элементов рельефа (табл. 1, 2, п. 3, 4), имеющих глубину штамповки $h_k=4,1$ мм ($h_w/h_k=1,04$). Так, при числе Рейнольдса $Re=5 \cdot 10^2$ (Nu_w/Nu_k) $_{2,5/15}=1,495$; (Nu_w/Nu_k) $_{15/2,5}=1,609$; при $Re=5 \cdot 10^3$ (Nu_w/Nu_k) $_{2,5/15}=2,188$; (Nu_w/Nu_k) $_{15/2,5}=1,413$.

Соотношения интенсивности теплоотдачи поверхности с равновеликими проходными сечениями с шахматным расположением профильных элементов глубиной $h = 4,45$ мм (табл. 1, 2, п. 5) и опытных вариантов поверхности с разнопроходными сечениями смежных каналов (табл. 1, 2, п. 1, 2) при $Re=5 \cdot 10^3$ составляют ($Nu_p/Nu_{2,5/15}$) $_w=0,792$, ($Nu_p/Nu_{15/2,5}$) $_w=1,42$. Для соответствующих поверхностей с коридорным расположением профильных элементов рельефа (табл. 1, 2, п. 3, 4, 6) указанные соотношения равняются ($Nu_p/Nu_{2,5/15}$) $_k=1,19$, ($Nu_p/Nu_{2,5/15}$) $_k=1,38$. При этом глубина равновеликих сфероидальных элементов $h_p=4,3$ мм (табл. 1, 2, п. 6). Как видно на рис. 3, величина теплоотдачи поверхности опытных каналов с шахматным расположением элементов рельефа, сфероидальных выступов с радиусом $r=2,5$ мм или сегментных с $R=15$ мм заметно различается при числе Рейнольдса $Re>455$ (рис. 1; табл. 1, 2, п. 1, 2). Причем интенсивность теплоотдачи в каналах с контактирующими поперечно обтекаемыми сегментными выступами существенно выше, чем интенсивность теплоотдачи в каналах с поперечно обтекаемыми сфероидальными выступами со значительно меньшей степенью загромождения сечения, обусловленной геометрической

формой и размерами профильных элементов. Так, при числе Рейнольдса $Re=5 \cdot 10^2$ соотношение величины теплоотдачи поверхностей с различными комбинациями радиусов контактирующих выступов (табл. 1, п. 1, 2), при $Re=5 \cdot 10^3$ - $Nu_{2,5/15}/Nu_{15/2,5}=1,798$. При этом для указанных вариантов поверхности теплообмена значения показателя степени n в уравнении подобия теплоотдачи $Nu=aRe^n$ различаются, как и значения критического числа Рейнольдса, соответствующего точке излома зависимостей по теплоотдаче, отделяющей границу переходного и развитого турбулентного режимов течения. Для варианта поверхности с комбинацией $r/R=2,5/15$ (табл. 1, 2, п. 1) $n=1,4$ и $0,95$ при $Re_{кр}=950$. Для варианта поверхности с $R/r=15/2,5$ (табл. 1, 2, п. 2) - $n=1,13$ и $0,7$ при $Re_{кр}=1013$, что характеризует более интенсивный процесс теплоотдачи поверхности в каналах с сегментными выступами (1) по сравнению со смежными каналами поверхности со сферическими выступами меньшего радиуса $r=2,5$ мм (2).

Для соответствующих вариантов (3, 4) пластинчатой поверхности с коридорной схемой расположения выступов и впадин (элементов рельефа) указанные соотношения интенсивности теплоотдачи составляют при $Re=5 \cdot 10^2$ $Nu_{2,5/15}/Nu_{15/2,5}=1,104$, при $Re=5 \cdot 10^3$ $Nu_{2,5/15}/Nu_{15/2,5}=1,161$, что показывает слабое влияние геометрии профильных элементов при линейном их расположении на изменение теплоотдачи поверхности при различных режимах движения потока и степени загромождения проходного сечения. При этом значения $n=1,13$ и $0,85$ при $Re_{кр}=819$ для варианта поверхности с $r/R=2,5/15$ (табл. 1, 2, п. 3) и $n=1,13$ и $0,8$ при $Re_{кр}=926$ для варианта поверхности с $R/r=15/2,5$ (табл. 1, 2, п. 4) указывают на более интенсивный процесс теплоотдачи и более ранний переход режима течения в каналах с сегментными выступами и вместе с тем согласуются по величине показателя степени n с характерным для потока в гладких каналах значением $n=0,8$, отражающим преобладание «внутреннего» характера течения.

Сложные проходные сечения каналов опытных теплообменников с разной геометрической формой контактирующих элементов рельефа с шахматной и коридорной схемами расположения обеспечивают различный уровень теплоотдачи, обусловленный турбулизацией потока путем реализации прежде всего эффекта внешнего поперечного обтекания профильных выступов, моделирующих при их взаимном контакте трубчатую поверхность с переменным по высоте и разным по величине радиусом образующей в условиях внутренней задачи, и за счет гидродинамических процессов в сфероидальных впадинах. И в этом плане, как и в поперечно обтекаемых пучках круглых цилиндрических труб, пластинчатая поверхность с шахматной схемой расположения контактирующих профильных элементов разной формы имеет более высокую интенсивность теплоотдачи по сравнению с поверхностью с коридорным расположением элементов рельефа.

Анализируя представленные на рис. 4 опытные данные по сопротивлению исследованных вариантов пластинчатой поверхности в виде графических зависимостей $Eu=f(Re)$, следует отметить их значительные различия по величине сопротивления, обусловленные геометрическими параметрами рельефа и степенью загромождения проходного сечения соответствующих экспериментальных каналов. Величина сопротивления опытных вариантов поверхности с разновеликими проходными сечениями смежных каналов, образованными профильными элементами с шахматной схемой расположения (табл. 1, 2, п. 1, 2), не только превосходит величину сопротивления подобных вариантов поверхности с коридорной схемой расположения (табл. 1, 2, п. 3, 4) элементов рельефа, но и значительно различается для вариантов поверхности с разными комбинациями контактирующих сегментных и сфероидальных выступов с $r/R=2,5/15$ и $R/r=15/2,5$ (табл. 1, 2, п. 1, 2) с указанной шахматной схемой рас-

положения, обеспечивающих среднюю величину отношения проходных сечений смежных каналов $s_2/s_1 \approx 1,5$.

При значении числа Рейнольдса $Re=5 \cdot 10^2$ ($Eu_w/Eu_k)_{2,5/15}=6,779$; ($Eu_w/Eu_k)_{15/2,5}=2,085$; при $Re=5 \cdot 10^3$ ($Eu_w/Eu_k)_{2,5/15}=5,77$; ($Eu_w/Eu_k)_{15/2,5}=1,945$. В то же время при $Re=5 \cdot 10^3$ ($Eu_{2,5/15}/Eu_{15/2,5})_w=13,8$.

Соотношение значений сопротивления вариантов поверхности с коридорной схемой расположения и разными комбинациями контактирующих сегментных и сфероидальных выступов с $r/R=2,5/15$ или $R/r=15/2,5$ при $Re=5 \cdot 10^3$ составляет ($Eu_{2,5/15}/Eu_{15/2,5})_k=4,66$. Варианты поверхности с коридорной схемой расположения профильных элементов отличаются непостоянством проходного сечения каналов по ходу потока из-за образующихся двугольных овальных диафрагменных сужений (между контактирующими выступами) высотой h , периодически расширяющихся в вертикальной плоскости высотой $2h$ в пределах шага их чередования t_k (рис. 1). Поэтому величина отношения средних проходных сечений смежных каналов вариантов поверхности с коридорным расположением профильных элементов составляет $s_2/s_1 \approx 1,5$ (для узких проходных сечений смежных каналов $s_2/s_1 \approx 2$).

Соотношения величины сопротивления опытных поверхностей с равновеликими проходными сечениями (табл. 1, 2, п. 5, 6) и разновеликими проходными сечениями соответствующих смежных каналов (табл. 1, 2, п. 1-4) при $Re=5 \cdot 10^3$ составляют: с шахматной схемой расположения профильных элементов ($Eu_p/Eu_{2,5/15})_w=0,22$ и; с коридорной схемой расположения профильных элементов ($Eu_p/Eu_{2,5/15})_k=0,666$ и ($Eu_p/Eu_{15/2,5})_k=3,11$.

Приведенные расчетные соотношения показывают существенное влияние на величину гидродинамического сопротивления вариантов поверхности с разновеликими проходными сечениями смежных каналов геометрической формы, размеров и схемы расположения профильных элементов рельефа.

Контактирующие сегментные выступы в большем приближении, чем сфероидальные, моделируют поперечно обтекаемые короткие трубчатые поверхности и согласно схеме их расположения определяют величину полного сопротивления экспериментальных пластинчатых теплообменников (табл. 1, 2, п. 1, 3). Наблюдаемые в указанных вариантах поверхности изменения проходного сечения со сложной геометрией приводят, с одной стороны, к увеличению степени турбулизации потока и повышению интенсивности теплоотдачи, с другой стороны, сопровождаются повышением диссипации кинетической энергии потока, приводящей к несоразмерному росту гидродинамического сопротивления. При этом показатели степени m при числе Re в уравнении подобия сопротивления $Eu=bRe^m$ для вариантов поверхности с шахматной и коридорной схемами расположения сегментных выступов (табл. 1, 2, п. 1, 3) составляют 0,27 и 0,2, равные аналогичным средним значениям показателей степени в критериальных зависимостях, рекомендуемых нормативным методом [11] для расчета сопротивления в шахматных и коридорных поперечно обтекаемых пучках труб в области развитого переходного режима течения потока.

Для оценки энергетической эффективности исследованных вариантов пластинчатой поверхности с различной величиной отношения проходных сечений смежных каналов опытные данные по теплоотдаче и аэродинамическому сопротивлению представлены на рис. 5 в виде тепловых комплексных характеристик $Q/F\Delta\bar{t} = \alpha = f(Q/N\Delta\bar{t})$. На рис. 5 видно, что в интервале изменения значений энергетического коэффициента $Q/N\Delta\bar{t} = (158...5)K^{-1}$, соответствующих переходному режиму течения с относительно небольшими массовыми скоростями потока, тепловые характеристики экспериментальных каналов (1-6) значительно расслаиваются. При-

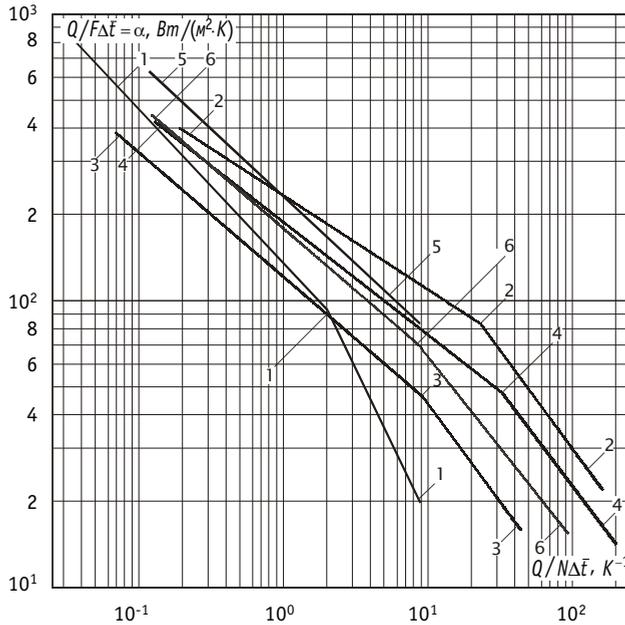


Рис. 5. Тепловые комплексные характеристики опытных вариантов пластинчатой поверхности теплообмена (1 - 6 - табл. 1, 2)

чем, несмотря на более высокий уровень теплоотдачи варианты поверхности с шахматной и коридорной схемами расположения контактирующих сегментных выступов (табл. 1, 2, п. 1, 3) имеют пониженную тепловую эффективность (при $Q/N\Delta\bar{T} = \text{idem}$) по сравнению с вариантами поверхности со сфероидальными выступами малого радиуса с шахматным и коридорным расположением (табл. 1, 2, п. 2, 4), отличающимися более свободными проходными сечениями каналов, существенно меньшей величиной сопротивления и несколько меньшей теплоотдачей.

По мере увеличения массовой скорости потока теплоносителя (уменьшения значений $Q/N\Delta\bar{T}$) тепловые характеристики опытных поверхностей располагаются более компактно, сохраняя общую картину соотношения тепловой эффективности во всем диапазоне изменения величины энергетического коэффициента

$Q/N\Delta\bar{T} = (158 \dots 0,1) \text{K}^{-1}$. При одинаковом значении $Q/N\Delta\bar{T} = 1 \text{K}^{-1}$ отношения величин коэффициентов теплоотдачи соответствующих опытных каналов с разновеликими проходными сечениями выглядят как $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 : \alpha_4 = 135 : 232 : 121 : 188$. При этом на рис. 5 выделяется более интенсивный рост тепловой эффективности поверхности с шахматным расположением сегментных выступов (1) (табл. 1, 2, п. 1), обусловленный реализацией внешней задачи в каналах со значительным гидродинамическим сопротивлением, увеличение которого однако в области больших чисел Re компенсируется энергетически более весомым повышением теплоотдачи.

Величина тепловой эффективности вариантов поверхности с равновеликими проходными сечениями смежных каналов (5, 6) (табл. 1, 2, п. 5, 6) превосходит уровень эффективности соответствующих опытных вариантов поверхности с разновеликими проходными сечениями: с шахматным расположением элементов рельефа (5, 1, 2) при $Q/N\Delta\bar{T} < 1 \text{K}^{-1}$, с коридорным (6, 3, 4) - при $Q/N\Delta\bar{T} < 0,32 \text{K}^{-1}$ и сохраняет тенденцию своего роста при увеличении массовой скорости потока (уменьшении $Q/N\Delta\bar{T}$).

ВЫВОДЫ

1. Представленные результаты исследования теплоаэродинамических характеристик компоновок пластинчатой поверхности с разной величиной проходных сечений ($s_2/s_1 > 1$) смежных каналов (с шахматной и коридорной схемами расположения двухсторонних контактирующих элементов рельефа) показали значительное различие величины сопротивления в каналах по обеим сторонам профильной пластины при практически сопоставимой с компоновками поверхности с обычными равновеликими ($s_2/s_1 = 1$) смежными каналами интенсивностью теплоотдачи.

2. Существенное уменьшение гидродинамического сопротивления по одной из сторон пластинчатой поверхности в компоновках с разными проходными сечениями смежных каналов ($s_2/s_1 > 1$) при обеспечении приемлемой (из условия располагаемого перепада давления в теплообменнике) допустимой величины сопротивления по другой стороне пластины, с учетом теплофизических свойств потоков, можно рассматривать как один из способов повышения энергетической эффективности пластинчатой поверхности теплообмена при прочих равных условиях.

3. Возможность обеспечения оптимальной геометрии смежных каналов, образованных профильными пластинами, т.е. величины отношения проходных сечений ($s_2/s_1 > 1$) и их конфигурации и, следовательно, рациональных массовой кратности и соотношения скоростей потоков теплоносителей является одним из основных условий поиска резерва повышения эффективности теплообмена пластинчатой поверхности с двухсторонними сфероидальными выступами и впадинами.

Литература

1. Берман С.С. Пластинчатые теплообменники для тепловозов // Электрическая и тепловозная тяга. - 1960. - № 5. - С.4-8.
2. Андреев М.М., Берман С.С., Буглаев В.Т., Костров Х.Н. Теплообменная аппаратура энергетических установок. - М.: Машгиз, 1963. - 240 с.
3. Евенко В.И., Шишков В.М., Анисин А.К. Теплообмен и сопротивление профильной пластинчатой поверхности с коридорным расположением сфероидальных выштамповок // Транспортное машиностроение (НИИинформтяжмаш, 5-74-10). - М., 1974. - № 10. - С. 5-10.
4. Анисин А.К. Теплоотдача и сопротивление трубчатой поверхности с двухсторонними сфероидальными элементами шероховатости // Изв. вузов СССР. Энергетика. - 1983. - №3. - С. 93-96.
5. Щукин А.В. и др. Интенсификация теплообмена сферическими выемками. Обзор // Изв. АН. Энергетика. - 1998. - № 3. - С.47-64.
6. Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К., Подымака Н.Ф., Хабенский В.Б. Сомоорганизация вихревых структур при обтекании водой полусферической лунки // Доклады Академии наук СССР. - 1986. - Т.291. - №6. - С.1315-1318.
7. Коваленко Л.М., Глушков А.Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 240 с.
8. Анисин А.К., Буглаев В.Т. Экспериментально - аналитическая оценка теплоаэродинамических характеристик компоновок пластинчатой поверхности теплообмена из плоских и профильных листов с шахматным расположением сфероидальных элементов // Изв. вузов. Ядерная энергетика. - 1997. - №4. - С. 40 - 47.
9. Анисин А.К., Буглаев В.Т. Особенности теплоаэродинамических характеристик компоновок поверхности теплообмена из профильных пластин с коридорным расположением сфероидальных элементов // Изв. вузов. Ядерная энергетика. - 1998. - № 3. - С. 80 - 89.
10. Шишков В.М., Соченов В.Н., Анисин А.К. и др. Влияние геометрических параметров пластинчатой поверхности на технико-экономические показатели теплообменных аппаратов // Изв. вузов СССР. Энергетика. - 1977. - №10. - С. 83 - 89.
11. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) // Под ред. С.И. Мочана. - Л.: Энергия, 1977. - 256 с.

УМЕНЬШЕНИЕ МГД-СОПРОТИВЛЕНИЯ ПУТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ В КОНТУРАХ С ЖИДКИМИ МЕТАЛЛАМИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕАКТОРУ ТОКАМАК

А.В. Безносков*, С.С. Пинаев*, М.А. Камнев*, А.В. Назаров*,

П.В. Романов**

** Нижегородский государственный технический университет, г. Н.Новгород,*

*** Министерство по атомной энергии РФ, г. Москва*



Статья содержит обзор экспериментальных данных, полученных в работах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями по уменьшению МГД-сопротивления путем формирования оксидных электроизолирующих покрытий на внутренних поверхностях трубопроводов бланкета и дивертора токамака.

Применение жидких металлов как щелочных, так и тяжелых в качестве теплоносителей имеет ряд преимуществ по сравнению с водой, являющейся в настоящее время основным теплоносителем мировой ядерной энергетики.

Тяжелые жидкометаллические теплоносители, такие как свинец, галлий, эвтектики свинец-висмут и свинец-литий, по сравнению с щелочными металлами обладают большей пожаробезопасностью, а также позволяют формировать оксидные электроизолирующие покрытия на внутренних поверхностях конструкционных материалов каналов циркуляции теплоносителя.

Последнее актуально для термоядерных установок с магнитным удержанием плазмы. Магнитные поля, перпендикулярные каналам теплоотвода бланкета и дивертора термоядерного реактора, создают значительное магнитогидродинамическое сопротивление течению щелочного жидкометаллического теплоносителя (1 - 3 МПа [1,2]). В связи с этим было предложено использовать теплоносители на основе свинца для охлаждения бланкета [3] и галлий для охлаждения дивертора термоядерного реактора [4]. Использование тяжелых жидких металлов в качестве теплоносителей бланкета и дивертора термоядерного реактора позволяет существенно уменьшить МГД-сопротивление потока теплоносителя за счет формирования оксидного покрытия на поверхности конструкционного материала, контактирующего с жидким металлом. Наличие такого покрытия существенно снижает величину токов, индуцированных в ядре потока жидкого металла, и тем самым уменьшает возникающую тормозящую объемную силу.

© *А.В. Безносков, С.С. Пинаев, М.А. Камнев, А.В. Назаров, П.В. Романов, 2002*

Таблица 1

Условия проведения экспериментов

Теплоноситель	Экспериментальный участок		Re	Ha ² /Re	t, °C
	диаметр, мм	длина, мм			
Pb-Bi	10	500	(50 – 350)×10 ³	0 – 0,20	250 – 450
Pb	6	500	(45 – 200)×10 ³	0 – 0,09	400 – 500
Ga	6	500	(8 – 70)×10 ³	0 – 1,2	100 – 300

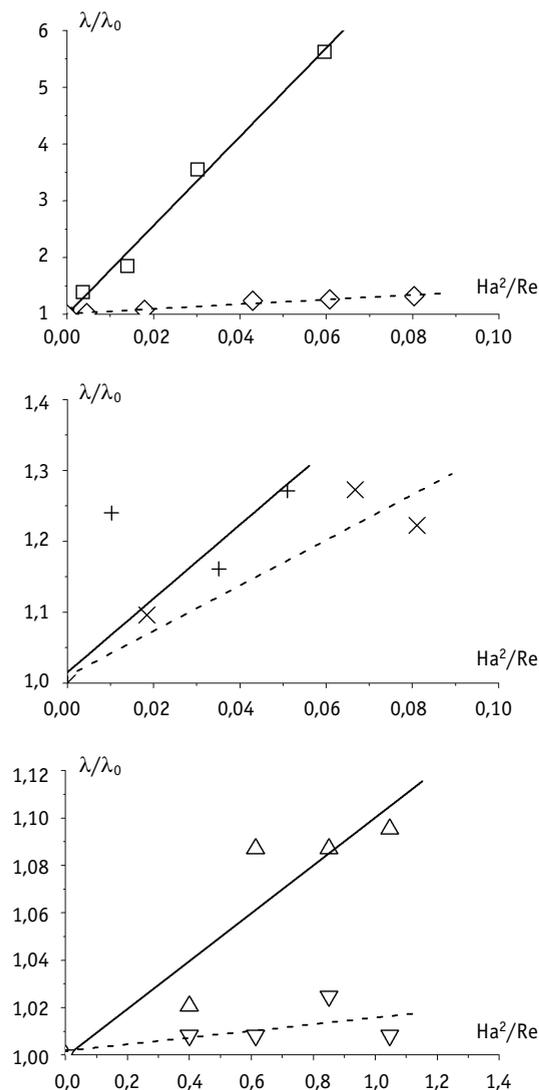


Рис. 1. Уменьшение МГД-сопротивления при формировании оксидных электроизолирующих покрытий: а) в свинец-висмутовом теплоносителе; б) в свинцовом теплоносителе; в) в галлиевом теплоносителе; ---- внутренняя поверхность канала в состоянии поставки; - - - - внутренняя поверхность канала со сформированными оксидными покрытиями.

На кафедре «Атомные и тепловые станции» НГТУ в течение 10 лет проводятся работы по обоснованию возможности создания электроизолирующих покрытий на поверхностях конструкционных материалов, контактирующих с жидкометаллическими теплоносителями. Эффективность действия сформированных покрытий подтверждена экспериментами по определению МГД-сопротивления. Эксперименты проводились как на статических [5], так и на циркуляционных стендах с галлиевым [6], свинцовым [7, 8] и свинцово-висмутовым теплоносителями.

Измерения МГД-сопротивления проводились на вертикальных экспериментальных участках, изготовленных из стали 08Х18Н10Т, ванадиевого сплава ВТХ-1 и молибденового стекла диаметром 6,0 – 12,0 мм. Индукция магнитного поля в районе экспериментального участка варьировалась от 0 до 0,8 Тл. В ходе экспериментов отработывалась методика формирования оксидных покрытий при подаче газообразного кислорода на свободную поверхность теплоносителя непосредственно в поток жидкого металла через эжектор, а также путем растворения образовавшихся оксидов теплоносителя. В табл. 1 представлены характеристики некоторых серий экспериментов.

На рис. 1 приведены графические зависимости величины относительного коэффициента сопротивления потока жидкометаллического

теплоносителя от параметра Na^2/Re в трубе из стали 08X18H10T при наличии и при отсутствии оксидного покрытия.

Из графиков видно, что наилучший эффект от электроизоляции материала стенки был достигнут на свинцово-висмутовом теплоносителе (рис. 1а): МГД-сопротивление снизилось (уменьшился тангенс угла наклона прямой) в 19 раз (с 78,2 до 4,1). В случае применения свинец-висмутового теплоносителя наилучший эффект дала методика ввода газообразного кислорода на свободную поверхность.

При экспериментах с галлиевым теплоносителем (рис. 1в) после формирования оксидного покрытия на стенке канала МГД-сопротивление снизилось (уменьшился тангенс угла наклона прямой) в 10 раз (с 0,10 до 0,01). В этом случае наиболее эффективна была методика формирования покрытия путем введения кислорода в состав оксидов галлия.

На свинцовом теплоносителе (рис. 1б) МГД-сопротивление снизилось (уменьшился тангенс угла наклона прямой) в 1,6 раза (с 5,19 до 3,20). В этих экспериментах кислород вводился через эжектор.

Проведенные эксперименты показали, что на всех исследуемых конструкционных материалах возможно создание оксидных электроизолирующих покрытий, уменьшающих МГД-сопротивление, что позволяет рассматривать свинец, галлий, эвтектики свинец-висмут и свинец-литий в качестве теплоносителей бланкета и дивертора токамаков повышенной безопасности.

Литература

1. Gordon J.D., Garnet J.K., Hoffman N.J. Application of lead and lithium-lead in Fusion reactor blankets//Liquid metal engineering and technology. London: BNES, 1984. - V. 1. - P. 329-336.
2. Tokamak concept innovations: Report of a specialists' meeting Atomic Energy Agency and held in Vienna, 13-17 January 1986, IAEA - TECDOC-373. Vienna: IAEA, 1986.
3. Орлов В.В., Муравьев Е.В., Хрипунов В.И., Громов Б.Ф., Орлов Ю.И., Безносков А.В., Лыков С.В. Тяжелые теплоносители на основе свинца в системе охлаждения и преобразования энергии термоядерного реактора с магнитным удержанием плазмы//Атомная энергия. - 1990. - Т. 71. - №12. - С. 506 - 511.
4. Муравьев Е.В., Клищенко А.В., Петров В.С., Романов П.В., Хрипунов В.И., Шпанский Ю.С. Диверторная кассета реактора ИТЭР с галлиевым охлаждением//Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». - 1997. - Вып. 1-2. - С. 22 - 33.
5. Романов П.В., Безносков А.В., Кузьминых С.А., Бутов А.А., Парфенова Л.А. Экспериментальное исследование МГД-сопротивления и характеристик электроизолирующих покрытий на конструкционных материалах систем охлаждения токамака жидкометаллическими теплоносителями// Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». - 1998. - Вып. 1-2.
6. Бутов А.А. Экспериментальное и расчетное обоснование применения галлиевого теплоносителя в системе охлаждения дивертора токамака: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Н. Новгород, 2000.
7. Захватов В.Н. Экспериментальное и расчетное обоснование применения свинцового теплоносителя в системе охлаждения бланкета токамака: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Н. Новгород, 2001.
8. Besnosov A.V., Pinaev S.S., Zakhvatov V.N., Semyonov A.V., Bokova T.A., Romanov P.V. Experimental research of magnetohydrodynamic resistance to a flow of lead, gallium, lead-bismuth and lead-lithium eutectics in a transverse magnetic field: 5th World Conf. On Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics And Thermodynamics. - Thessaloniki, Greece, 2001. - V. II. - P. 1515-1518.

Поступила в редакцию 15.08.2002

УДК 556.555.8

ЗАГРЯЗНЕНИЕ СТРОНЦИЕМ-90 ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ЗАПАДНЫХ РАЙОНАХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ, ПОСТРАДАВШИХ ОТ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ

М.Н. Каткова, Я.И.Газиев, Г.И.Петренко, А.М.Полухина

В 1997-1999 гг. в западных районах Брянской области проведен мониторинг водных экосистем, загрязненных чернобыльскими выпадениями. В рамках этих исследований оценен текущий уровень загрязнения водных объектов радиоизотопом ^{90}Sr . Сделаны основные выводы и даны рекомендации по их использованию в дальнейшем с учетом полученных результатов.

ВВЕДЕНИЕ

В результате аварии на Чернобыльской АЭС в атмосферу было выброшено большое количество радиоактивных веществ. Атмосферный перенос и оседание их на земную поверхность привели к долговременному радиоактивному загрязнению местности. На территории Российской Федерации наиболее пострадавшими оказались юго-западные районы Брянской области. Схема района исследований показана на рис.1.

В рамках Проекта РФ-ПРООН РУС/95/004 в 1997-1999 гг. и на основе предыдущих наблюдений был проведен радиоэкологический мониторинг поверхностных водных экосистем, расположенных в загрязненных чернобыльскими радионуклидами районах Брянской области. Авторы настоящей статьи приняли участие в работах по этому проекту. Одной из подзадач крупномасштабного мониторинга являлась оценка текущего уровня загрязнения водных экосистем долгоживущим радиоизотопом ^{90}Sr . Нами были опробованы и проанализированы на содержание ^{90}Sr следующие компоненты водных экосистем: вода, донные отложения и, частично, гидробионты (рыба).

На территории юго-западных районов Брянской области расположено семь естественных водоемов; Наиболее крупные из них – озеро Кожановское объемом 5460 тыс.м³ и озеро Заломенье объемом 750 тыс.м³.

Помимо естественных водоемов на исследуемой территории находится 209 водохранилищ и прудов, 14 наиболее крупных из них отнесены к федеральной собственности, остальные – областного и внутрихозяйственного значения. Назначение искусственных водоемов различное: от хозяйственно-бытового до рыбоводческого, причем два водоема в Гордеевском районе и один в Климовском частично используются для питьевого водоснабжения.

Озера, пруды и водохранилища имеют слабопроточный характер и повышен-



Рис.1. Схема сети наблюдений НПО «Тайфун» в рамках проекта РФ-ПРООН РУС/95/004 (1997-2000 гг.) в юго-западных районах Брянской области: ○ - пункты отбора проб; ⊗ - гидрологические посты

ные уровни загрязнения сельскохозяйственными и бытовыми стоками. Некоторые из них после черновильских событий накопили определенный запас радионуклидов, влияющий на экологическую обстановку местности, самого водоема и, как следствие, на здоровье населения.

Степень загрязнения местности ^{90}Sr определялась путем проведения радиохимических анализов почвенных проб. На основе полученных результатов было проведено распределение количества населенных пунктов в Брянской области по уровню загрязнения ^{90}Sr и построена карта загрязнения ^{90}Sr с шагом сетки 0,03 градуса по широте и долготе. Указанное выше распределение населенных пунктов и карта загрязнения стронцием-90 представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Наиболее загрязненными ^{90}Sr оказались семь пунктов в Злынковском районе, в

Таблица 1

Распределение населенных пунктов в Брянской области по уровню загрязнения стронцием-90 (ГБк/км²) по состоянию на август 1995 г.

Интервал значений	<4	4-19	19-37	37-56
Количество пунктов	163	281	40	7

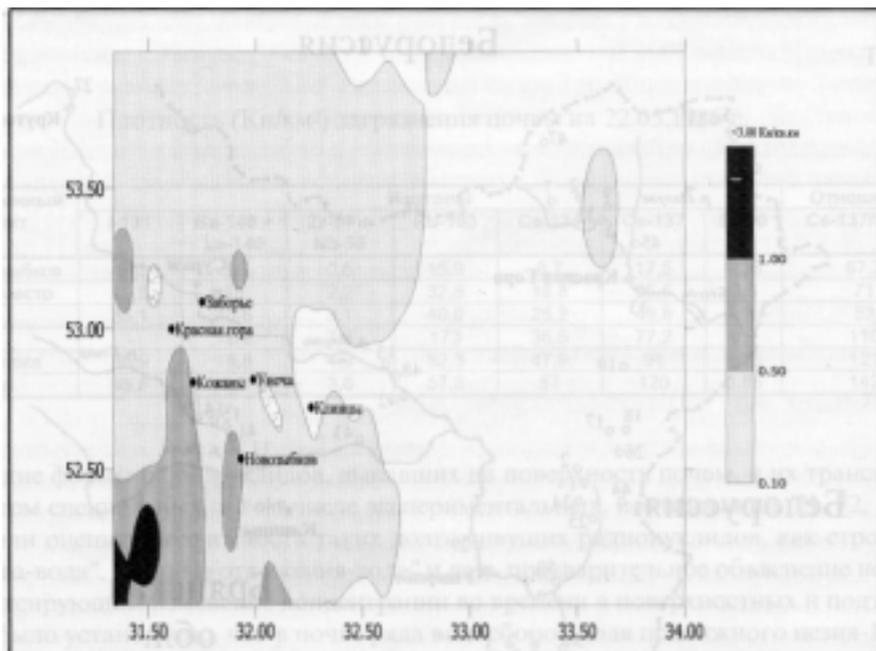


Рис.2. Карта-схема загрязнения ^{90}Sr территории Брянской области на 01.07.86 г.

которых средние по населенному пункту значения изменялись в пределах 37-56 ГБк/км².

Отбор проб поверхностных вод для определения ^{90}Sr производился в полиэтиленовые 10-литровые канистры. При опробовании слабозагрязненных водоемов использовались дополнительно 25-литровые бидоны с крышками.

Для отбора проб донных отложений использовались пробоотборники четырех типов:

- пробоотборник с большой площадью поперечного сечения пробы в виде дюралевой трубы диаметром 12 и длиной 70 см, насаживаемой на разборную штангу длиной до 10 м; внутри трубы помещался мешок из ткани для забора керна донных отложений;
- пробоотборник с малой площадью отбора ($S=0,1 \text{ м}^2$), который использовался для сильно загрязненных и мощных (до 1,5 м) донных отложений с большой пористостью (80-97%);
- укороченный вариант пробоотборника 2-го типа (длина 1 м), предназначенный для отбора проб донных отложений на небольшой глубине (до 0,8 м); опробование производится так же, как и пробоотборником 2 типа;
- ковшовый пробоотборник (экскаваторный тип) предназначен для отбора поверхностных донных отложений.

Рыба является биоаккумулятором радионуклидов и, следовательно, индикатором радиоактивного загрязнения среды обитания. В рамках Проекта РФ-ПРООН РУС/95/004 оценка загрязнения радионуклидами гидробионтов и рыбы не являлась основной задачей, поэтому их опробование имело эпизодический характер.

Радиохимическое определение ^{90}Sr в пробах воды ($V=5-25 \text{ л}$) определялось стандартным методом карбонатного осаждения с последующим выделением дочернего изотопа ^{90}Y . В пробах донных отложений и почвы стронций переводился в раствор из прокаленной при 550-600°C навески (30-50 г) пробы двукратным выщелачиванием бн соляной кислотой ~ 1:3.

Таблица 2

**Концентрация ^{90}Sr в воде озер и прудов
(сентябрь-октябрь 1998 г., август-сентябрь 1999 г.)**

Водный объект	Год	№ на рис.1	Концентрация, Бк/л
О.Кожановское	1998	1	1,5±0,2
О.Кожановское	1999	1	0,8±0,2
Пруд Яловка	1998	18	0,9±0,2
Пруд Яловка	1999	18	0,8±0,2
Иск.водоем Карьер	1998	2	0,9±0,3
Иск.водоем Карьер	1999	2	0,6±0,2
О.Заозерье	1998	26	0,7±0,2
О.Святое на Беседи	1998	7	0,4±0,2
О.Святое на Беседи	1999	7	0,4±0,1
Пруд Ковали	1999	16	0,8±0,2
Пруд Николаевка	1999	23	0,4±0,1
Пруд Заборье	1999	12	0,2±0,1
О.Верещакские разливы	1999	25	0,4±0,1

Погрешности измерений содержания ^{90}Sr в пробах поверхностных вод и донных отложений лежали в пределах $\pm 15\text{-}30\%$ для доверительной вероятности $p=0,95$. Эти погрешности оценивались с учетом определения химических выходов ^{90}Sr и ^{90}Y .

В результате проведенных процедур пробоотбора и радиохимического анализа проб воды и донных отложений был получен ряд результатов, которые отражают степень загрязнения ^{90}Sr водных экосистем.

В табл. 2 представлены концентрации ^{90}Sr в воде поверхностных водоемов, исследованных в сентябре-октябре 1998 г. и августе-сентябре 1999 г.

Из табл.2 видно, что максимальное содержание ^{90}Sr наблюдалось в воде о.Кожановского в сентябре-октябре 1998 г. и оказалось равным 1,5 Бк/л. В то же самое время примерно в полтора раза меньшей оказалась активность ^{90}Sr в воде о.Карьер и пруда в Яловке – по 0,9 Бк/л. В августе-сентябре 1999 г. активность ^{90}Sr в воде озер уменьшилась до 0,9 Бк/л в о. Кожановском и до 0,6 Бк/л в о. Карьер. Это, по всей видимости, было следствием поступления в озера значительного количества паводковых вод с меньшим содержанием ^{90}Sr , чем в озерных водах, во время весеннего паводка в 1999 г. Также из табл. 2 видно, что подобного эффекта в пруде Яловке и о. Святом на Беседи не наблюдалось, что, вероятно, связано с ландшафтными особенностями районов, в которых находятся эти водоемы.

Относительно небольшим в 1999 г. оказалось содержание ^{90}Sr в воде пруда в д. Заборье (0,2 Бк/л), где оно оказалось в 3 раза меньше, чем в воде о. Карьер, хотя согласно табл. 3 удельная активность ^{90}Sr в верхнем слое донных отложений пруда в 1,4 раза превышала таковую в таком же слое донных отложений озера.

В настоящее время основным источником загрязнения ^{90}Sr вод и водоемов типа пруда в д.Заборье и о.Карьер являются донные отложения. На основе полученных данных был оценен коэффициент распределения ^{90}Sr в системе “вода-донные отложения”, равный отношению удельной активности в верхнем слое донных отложений к активности в воде. В пруде д.Заборье этот коэффициент значительно больше, чем в о.Карьер – 10^3 л/кг и $2,6 \cdot 10^2$ л/кг соответственно.

Согласно данным, приведенным в табл. 3, удельные активности ^{90}Sr в донных отложениях рассматриваемых водоемов практически не изменялись с глубиной.

Таблица 3

Концентрация ^{90}Sr в донных отложениях озера Карьер и пруда в д. Заборье

Водный объект	№ на рис.1	Дата отбора	Толщина слоя	Концентрация, Бк/кг с.в.	Погрешность для $p=0,95$, Бк/кг
Пруд д. Заборье	12	20.08.99	0-4	210	32
			4-8	300	45
Иск.водоем Карьер	2	19.08.99	0-4	154	23
			4-8	147	22
			8-12	157	24
			12-16	136	20

Как уже отмечалось выше, в рамках Проекта РФ-ПРООН РУС/95/004 не ставилась задача оценки радиоактивного загрязнения водной биоты чернобыльскими радионуклидами. В связи с этим были получены только единичные результаты по загрязнению ^{90}Sr рыбы (щука (*Esox lucius*) из о.Кожановское – 110 Бк/кг; карась (*Carassius carassius*) из искусственного водоема Карьер – 40 Бк/кг).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать следующие основные заключения о степени загрязнения ^{90}Sr поверхностных водоемов Брянской области, пострадавших от аварии на ЧАЭС.

1. В ходе полевых работ на трех полигонах («Кожаны», «Деменка», «Заборье») в 1999 г. получены новые базовые данные о содержании ^{90}Sr в поверхностных водоемах и донных отложениях.

2. Исследованные поверхностные водоемы составляют примерно 90% всех поверхностных водных ресурсов загрязненных районов Брянской области (Гордеевский, Злынковский, Клинцовский, Красногорский, Новозыбковский) и представляют все их основные типы: пойменные и водораздельные озера, пруды, водохранилища и искусственные водоемы, образовавшиеся на месте торфоразработок.

3. Из семи естественных озер на территории проекта были изучены на предмет загрязнения ^{90}Sr два: Святое на Беседи, Кожановское.

4. В 1998-1999 гг. в воде о.Святое на Беседи содержание ^{90}Sr составляло примерно одну десятую от уровня вмешательства (УВ) воды, равного 5 Бк/л по НРБ-99.

5. В воде о.Кожановское в 1998-1999 гг. средняя концентрация ^{90}Sr составляла приблизительно 0,25 от значения УВ воды для ^{90}Sr .

6. Уровни загрязнения ^{90}Sr поверхностных вод в большинстве изученных водных объектов были меньше нескольких десятых долей от УВ воды по НРБ-99.

7. Ограничения на водопользование объектов в настоящее время отсутствуют.

8. Необходимо продолжить исследования с целью оценки загрязнения чернобыльскими радионуклидами, в частности ^{90}Sr , каждого трофического уровня цепи вода - донные отложения - гидробионт в замкнутых слабопроточных водоемах Брянской области типа о.Кожановского, а также увеличить статистику измерений по каждому отдельному трофическому уровню.

9. Существует необходимость оценки дозовых нагрузок на население, потребляющее загрязненные рыбопродукты из озер с большой степенью загрязнения продуктами аварии на ЧАЭС.

Работа подготовлена по материалам окончательного отчета по проекту РФ-ПРООН РУС/95/004 «Оценка и прогноз качества воды на территориях, пораженных в результате аварии на Чернобыльской АЭС (Брянская область)»/ Ред.В.Т.Дубинчук.- М.: «ИНФОКОМ-ГЕО», 113105, Варшавское шоссе, 39-а; 2001.

Поступила в редакцию

УДК 631.42

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ^{137}Cs ПО “ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИМ” ФРАКЦИЯМ ПОЧВ ТРИДЦАТИКИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

С.М. Рудая*, О.В. Чистик*, И.И. Матвеевко**

** Международный государственный экологический университет*

им. А.Д. Сахарова, г. Минск, Беларусь

*** Республиканский центр радиационного контроля и мониторинга окружающей среды, г. Минск, Беларусь*



Представлены результаты изучения распределения ^{137}Cs по фракциям почв, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС. Дано математическое описание распределения радиоцезия по фракциям $>0,01$ мм, $0,01-0,001$ мм, $<0,001$ мм. Показано, что гранулометрический и минералогический составы исследованных почв в значительной степени определяют сорбцию радионуклида на почвенных частицах и влияют на вертикальную миграцию.

ВВЕДЕНИЕ

В наземных экосистемах наиболее емким и самым инерционным звеном, приводящим к поступлению радиоактивных загрязнений в организм человека, является почва. Состояние и скорость миграции радионуклидов в почве во многом определяют интенсивность распространения радионуклидов по пищевым цепочкам. Поэтому важной задачей является изучение всей совокупности процессов, приводящих к перемещению радионуклидов в почве и перераспределению их между различными фазами. На миграционные способности радионуклидов, попавших на почвенную поверхность, существенно влияет их связь с почвенными компонентами разной дисперсности.

Целью данной работы было изучение распределения ^{137}Cs по “гранулометрическим” фракциям почв тридцатикилометровой зоны Чернобыльской АЭС. Объектом исследования были почвы различного типа, отобранные с разной глубины в 2000 г. Контрольные пункты наблюдения расположены в Хойникском и Брагинском районах Гомельской области. Исследуемые участки находятся в пределах естественных лесных экосистем.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отбор проб почвы проводился послойно через 5 см до глубины 15 см по стандартной методике [1]. Гранулометрический состав почв анализировался по методу Н.А. Качинского [2]. Разделение почвенных образцов на фракции для определения

сорбции ^{137}Cs осуществлялось методом отмучивания [3]. В ходе анализа были выделены следующие фракции: физический песок ($>0,01$ мм), физическая глина ($0,01-0,001$ мм), илистая фракция ($<0,001$ мм). Минералогический состав определялся на рентгенографической установке ДРОН-3М. Погрешность определения содержания глинистых минералов составляла 3-5%. Содержание ^{137}Cs в почве и почвенных фракциях измерялось на γ -спектрометре EL-1308 [4]. Погрешность измерения активности радионуклида не превышала 10% и зависела от активности образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почва является природным телом, которое представлено твердой, жидкой, газовой фазами и живым веществом. На сорбционные способности почв в значительной мере влияют их специфические ионообменные особенности. На кинетику адсорбции и десорбции ионов, в первую очередь, оказывает влияние полидисперсность почвы, т.е. ее гранулометрический состав. Несмотря на некоторую условность границ гранулометрических фракций, в целом эти границы отражают реально существующие различия в свойствах почвенных частиц, что, в свою очередь, обуславливает зависимость сорбционных свойств почв от гранулометрического состава.

По характеру распределения в почвенном профиле частиц $<0,001$ мм исследуемые почвы относятся к почвам, развитым на породах легкого гранулометрического состава. Для данного типа почв свойственно выраженное преобладание песчаных фракций и очень небольшое содержание тонкодисперсных частиц.

В гранулометрическом составе исследуемых почв (табл. 1) преобладает фракция мелкого песка, на долю которой приходится от 60 до 85%. Характерен низкий про-

Таблица 1

Гранулометрический состав почв экспериментальных площадок (в процентах на общую массу почвы)

Генетический горизонт	Глубина отбора, см	Фракция, мм						
		>1	1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
Дерново-подзолистая песчаная почва, площадка №1								
A ₀	0-5	0,10	4,82	83,49	4,00	2,40	2,80	2,40
A ₁ A ₂	5-10	0,20	6,39	84,60	2,40	1,60	2,80	2,00
A ₁ A ₂	10-15	0,30	12,74	80,57	2,00	1,20	2,40	0,80
Дерново-подзолистая песчаная почва, площадка №3								
A ₀	0-5	-*	14,34	78,46	2,80	2,00	0,80	1,60
A ₁	5-10	0,10	14,20	79,31	1,60	1,60	1,99	1,20
A ₁	10-15	0,10	16,22	77,27	1,20	0,80	3,21	1,20
Дерново-подзолисто-глееватая оторфованная песчаная почва, площадка №4								
A ₀	0-5	-	24,72	61,55	5,65	2,02	3,23	2,83
A ₁	5-10	-	24,94	65,00	3,22	1,61	2,82	2,41
A ₁	10-15	-	34,22	59,37	2,00	0,80	2,00	1,61
Дерново-перегнойно-глееватая супесчаная почва, площадка №7								
A ₀	0-5	0,20	12,95	74,47	5,99	2,40	2,40	1,60
A ₁	5-10	0,20	16,65	74,70	4,02	0,80	2,41	1,21
A ₁	10-15	-	5,95	75,48	9,67	0,80	4,85	3,23

Примечание: * - не обнаружено

цент частиц крупного и среднего песка. Дерново-подзолистые песчаные и дерново-подзолисто-глееватые оторфованные песчаные почвы отличаются аккумуляцией высокодисперсных минералов в верхних горизонтах. Слой 0-5 см по сравнению со слоем 10-15 см имеет более высокое содержание илистой фракции и фракции физической глины. В дерново-перегнойно-глееватой супесчаной почве характер гранулометрического состава почвенного профиля иной. Здесь наблюдается вынос из верхней части почвенного профиля частиц $<0,005$ мм, т.е. процессы почвообразования приводят к обеднению глинистыми минералами верхних горизонтов супесчаных почв.

Важным свойством, связанным с гранулометрическим составом, является суммарная поверхность частиц, которая увеличивается с уменьшением размеров частиц. По мере возрастания суммарной поверхности частиц увеличивается площадь их соприкосновения с почвенной влагой, воздухом, живыми организмами; частицы приобретают ряд новых свойств, в частности возрастает поверхностная энергия, определяющая сорбционную способность почвенного комплекса. Верхние горизонты песчаных почв характеризуются более высокой суммарной поверхностью частиц, в то время как в дерново-перегнойно-глееватой супесчаной почве это присуще нижним слоям.

Таким образом, установленный гранулометрический состав отражает специфику почвообразовательного процесса на исследованных участках.

Полифункциональность почвы как ионита связана с неоднородностью ее минералогического состава и присутствием органического вещества. Минералогический состав в значительной мере определяет физико-химические и генетические особенности почв. На минералогический состав почв оказывает влияние большое количество факторов: минералогический и химический составы исходной почвообразующей породы, биоклиматическая обстановка почвообразования, соотношение рН и окислительно-восстановительного потенциала среды, условия дренажа, присутствие катионов в среде, возраст выветривания и почвообразования, количественный и качественный составы органических компонентов. Разнообразие их сочетаний дает соответствующее разнообразие минеральных ассоциаций в почвах и в отдельных горизонтах почвенного профиля. К этому добавляется и перемещение минералов в пределах профиля [5].

Минеральная составляющая исследуемых почв представляет собой смесь кварца, полевого шпата и глинистых минералов. Установлено, что содержание кварца в песчаных почвах составляет до 90%, полевого шпата - 10-20% и глинистых минералов до 10%; в супесчаной почве содержание минералов соответственно составляет до 70%, 20-30%, до 30%.

Фракция физического песка, в основном, состоит из непрозрачных и полупрозрачных бесцветных или молочно-белых, иногда желтоватых, зерен кварца. Вторым основным компонентом является полевой шпат, представленный бурыми, желтовато-бурыми или кремовыми, частично выветренными зёрнами. Полевые шпаты в исследуемых почвах представлены, в основном, калиевой разновидностью. В перегнойных горизонтах почв фиксируются полуразложившиеся растительные остатки, часто обугленные.

Исследование глинистых минералов изучаемых горизонтов дерново-подзолистых песчаных почв выявило преобладание хлоритной массы. Минералогический состав фракций 0,01-0,001 мм и $<0,001$ мм представлен на рис. 1. Как видно из рисунка, в исследуемых песчаных почвах наблюдается хлорито-каолиново-гидрослюдистая ассоциация. При этом с глубиной отмечается не только уменьшение содержания илистой и глинистой фракций, но и уменьшение содержания в них гидрослюды, способной к необменной сорбции ^{137}Cs . Хорошо известно, что отличительной особенностью радиоцезия является его способность к прочной фиксации в структуре глинист-

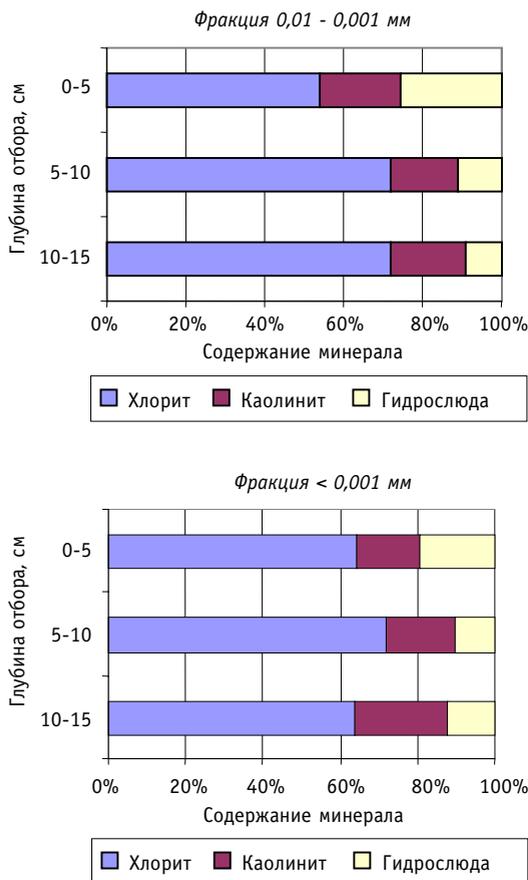


Рис. 1. Глинистые минералы фракций <0,01 мм вертикального разреза дерново-подзолистой песчаной почвы

нералов.

Исследование глинистых минералов дерново-перегнойно-глееватой супесчаной почвы показало, что в составе фракций 0,01-0,001 мм и <0,001 мм преобладают гидрослюдистые массы. Минералогический состав этих фракций представлен гидрослюдой и смешанослойными минералами. В тонкодисперсной фракции горизонтов 5-10 см и 10-15 см присутствует каолинит. Явных неоднородностей в распределении минералов, отвечающих за необменную сорбцию ¹³⁷Cs, в изучаемом почвенном профиле супесчаной почвы не выявлено.

Фракции 0,01-0,001 мм и <0,001 мм дерново-подзолисто-глееватой оторфованной песчаной почвы содержат гидрослюду, каолинит и хлорит. В почвенном профиле в составе этих фракций отмечаются следующие особенности: слой 0-5 см содержит кальцит, а в слое 10-15 см появляются смешанослойные минералы, свидетельствующие о развитии восстановительных процессов. Как и в дерново-подзолистых песчаных почвах, в состав тонкодисперсной фракции дерново-подзолисто-глееватой оторфованной песчаной и дерново-перегнойно-глееватой супесчаной почв помимо глинистых минералов входят также аморфные органоминеральные соединения, кристаллические и аморфные гидроксиды железа и алюминия, тонкодисперсный кварц, в нижних слоях - полевые шпаты.

Необходимо отметить, что поскольку разделение почвенных частиц на фракции

тых минералов и к селективной сорбции в области расширения межпакетного пространства на боковых гранях кристаллов глинистых минералов группы иллита FES (от английского Frayed Edge Sites). Селективные сорбционные центры более прочно удерживают цезий по сравнению с обычными неселективными обменными центрами RES (от английского Regular Exchange Sites) [6].

Помимо глинистых минералов в состав илистой фракции входят аморфные органоминеральные соединения, кристаллические и аморфные гидроксиды железа и алюминия, тонкодисперсный кварц и полевые шпаты.

Дерново-подзолисто-глееватая оторфованная песчаная и дерново-перегнойно-глееватая супесчаная почвы характеризуются интенсивным процессом разрушения первичных минералов. В результате длительного периодического переувлажнения почв развиваются процессы, приводящие к восстановлению элементов с переменной валентностью, разрушению первичных минералов и синтезу вторичных ми-

Таблица 2

Удельная активность ^{137}Cs в «гранулометрических» фракциях исследуемых почв на 01.07.2001 г. (Бк/г)

Гранулометрическая фракция, мм	Глубина отбора, см		
	0-5	5-10	10-15
Дерново-подзолистая песчаная почва, площадка №1			
>0,01	76,49	2,97	1,85
0,01-0,001	2436,51	227,11	127,58
<0,001	4051,78	407,99	187,70
Дерново-подзолистая песчаная почва, площадка №3			
>0,01	10,95	0,45	0,06
0,01-0,001	398,55	36,00	4,91
<0,001	548,60	87,20	10,91
Дерново-подзолисто-глееватая оторфованная песчаная почва, площадка №4			
>0,01	4,59	0,17	0,02
0,01-0,001	124,47	10,42	2,81
<0,001	168,84	32,85	7,16
Дерново-перегнойно-глееватая супесчаная почва, площадка №7			
>0,01	3,63	0,45	0,12
0,01-0,001	104,89	31,70	6,65
<0,001	193,94	36,93	8,51

для определения сорбции на них радиоцезия проводилось методом отмучивания без использования каких-либо реагентов (кроме дистиллированной воды), то в ходе анализа не были до конца разрушены водостойкие почвенные агрегаты. В итоге распределение радионуклида по почвенным частицам не было нарушено, но содержание глинистой и илистой фракций оказалось меньше, чем при традиционном гранулометрическом анализе (метод Н.А. Качинского). Поэтому полученные фракции, по-видимому, являются промежуточными между почвенными агрегатами и гранулометрическими фракциями. Тем не менее, данные, полученные в ходе исследования, позволяя судить о распределении ^{137}Cs по почвенным частицам разной дисперсности.

Как показывают результаты распределения ^{137}Cs по фракциям (табл. 2), наибольшая удельная активность характерна для илистой фракции, наименьшая – для фракции физического песка. Увеличение удельной активности ^{137}Cs в ряду *физический песок* < *физическая глина* < *ил* объясняется не только степенью дисперсности почвенных частиц, но и их минералогическим составом, определяющим специфику сорбции радионуклида каждой фракцией. В почвенном профиле происходит уменьшение с глубиной удельной активности всех рассмотренных фракций.

Распределение ^{137}Cs , сорбированного на фракциях физического песка (>0,01 мм), физической глины (0,01-0,001 мм), илистой фракции (<0,001 мм), в виде треугольной диаграммы Гиббса представлено на рис. 2.

Треугольная диаграмма Гиббса является одним из способов рационального и количественного описания результатов сорбции радиоцезия на трех фракциях. Применение данной диаграммы для представления табличных данных подробно описано в работе [7]. Используя подход к представлению данных, описанный в этой работе, обозначим долю радионуклида, связанного с фракцией >0,01 мм через X_1 , тогда доли

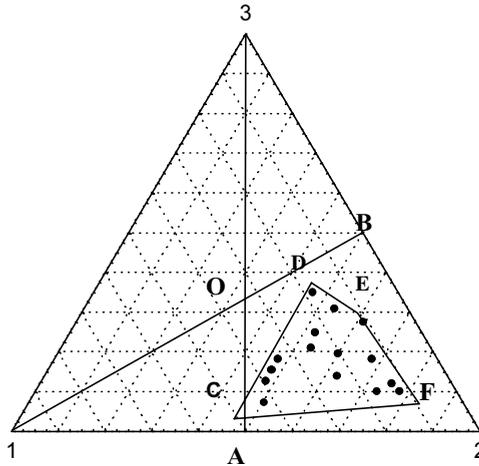


Рис. 2. Распределение ¹³⁷Cs по «гранулометрическим» фракциям исследуемых почв: 1 – доля ¹³⁷Cs, сорбированного фракцией > 0,01 мм; 2 – фракцией 0,01-0,001 мм; 3 - фракцией < 0,001 мм

радионуклида, сорбированного фракциями 0,01-0,001 мм и <001 мм, будут соответственно равны X_2 и X_3 . При этом $X_1+X_2+X_3=1$.

Соотношение между долями на диаграмме изображено в виде отдельных точек, координаты которых представлены в системе координат треугольника Гиббса. Группирование точек в определенной части треугольника характеризует особенности сорбции ¹³⁷Cs на трех почвенных фракциях. Условимся считать, что любая совокупность сопряженных точек может быть околнурена прямыми линиями.

Околнуренная область *CDEF* располагается в нижнем правом углу диаграммы в зоне *2AOB*, которая однозначно отвечает превалированию доли с индексом 2 по отношению к двум другим.

Сначала рассмотрим основные характеристики зоны *2AOB*. Видно, что зона *2AOB* ограничена двумя центральными секущими *1B* и *3A*, а также сторонами *1-2* и *2-3*. Расположение зоны *2AOB* на треугольной диаграмме Гиббса описывается системой линейных неравенств

$$X_2 \geq X_1; X_2 \geq X_3; X_1 \geq 0; X_3 \geq 0. \tag{1}$$

Известно, что экстремальные значения линейных функций, ограниченных определенными условиями, имеют экстремумы в вершинах симплекса [8]. В нашем случае это означает, что значения точек, попадающих в многоугольник *2AOB* с координатами вершин *2*(0; 1; 0), *A*(0,5; 0,5; 0), *O*(1/3; 1/3; 1/3), *B*(0; 0,5; 0,5), имеют следующие интервалы изменения:

$$0,5 \geq X_1 \geq 0; 1 \geq X_2 \geq 1/3; 0,5 \geq X_3 \geq 0. \tag{2}$$

Откуда видно, что X_2 имеет максимальное значение 1 и не опускается ниже 0,333, а X_1 и X_3 изменяются одинаково, но диапазон изменений уже.

А теперь вернемся к околнуренной области *CDEF*, которая математически описывается системой линейных неравенств:

$$\left. \begin{aligned} 2,40X_1 + 1,25X_2 &\geq 1 \\ 1,11X_1 + 10,00X_3 &\geq 1 \\ X_1 &\geq 0,10 \\ X_2 &\geq 0,45 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

где X_1, X_2, X_3 – доли ^{137}Cs , сорбированного почвенными фракциями размером $>0,01$ мм, $0,01-0,001$ мм, $<0,001$ мм соответственно.

Данная система неравенств не только наглядно демонстрирует зону доминирования фракции $0,01-0,001$ мм в сорбции радионуклида ($X_2 \geq 0,45$), но и позволяет оценить пределы изменения сорбции ^{137}Cs на каждой из фракций. Решая попарно уравнения отрезков CD и DE , DE и EF , EF и FC , FC и CD , находим координаты вершин $C(0,50; 0,45; 0,04)$, $D(0,18; 0,45; 0,36)$, $E(0,10; 0,60; 0,28)$, $F(0,10; 0,84; 0,06)$. Сравнивая максимальные и минимальные значения координат, получаем следующие пределы изменения долей:

$$0,50 \geq X_1 \geq 0,10; 0,84 \geq X_2 \geq 0,45; 0,36 \geq X_3 \geq 0,04. \quad (4)$$

Таким образом, хорошо видно, что максимальное количество радионуклида сорбировано на почвенных частицах $0,01-0,001$ мм. В дерново-подзолистых песчаных почвах на эту фракцию приходится 47-53% валового содержания радионуклида, в дерново-подзолисто-глеевой оторфованной песчаной – 61-62%, в дерново-перегнойно-глеевой супесчаной – 73-78%. Следовательно, на сорбцию ^{137}Cs в почвах существенно влияет как содержание глинистой фракции, так и ее минералогический состав.

В профиле дерново-перегнойно-глеевой супесчаной почвы не выявлено существенных изменений распределения ^{137}Cs по почвенным фракциям. Такой тип распределения позволяет предположить, что основным механизмом вертикальной миграции радионуклида для данного типа почв является диффузия свободных и адсорбированных ионов.

В песчаных почвах наблюдается изменение с глубиной вклада илистой и песчаной фракций в сорбцию радионуклида. В этих почвах вниз по профилю наблюдается увеличение доли радиоцезия, связанного с илистой фракцией, и уменьшение доли радионуклида, сорбированного фракцией физического песка. На фракцию $>0,01$ мм в верхнем пятисантиметровом слое дерново-подзолистых песчаных почв приходится до 40% радионуклида, содержащегося в этом слое, а в нижнем слое 10-15 см – до 18%. Доля ^{137}Cs , сорбированного тонкодисперсной фракцией с глубиной увеличивается с 7-14% (в слое 0-5 см) до 35% (в слое 10-15 см).

Таким образом, в дерново-подзолистых песчаных почвах, с одной стороны, с глубиной уменьшается содержание как фракций $<0,01$ мм, так и глинистых минералов, отвечающих за необменную сорбцию ^{137}Cs , с другой стороны, увеличивается доля радионуклида, сорбированного тонкодисперсной фракцией. Это объясняется лессиважем, т.е. процессом отмывки илистых и тонкопылеватых частиц с поверхности песчаного и крупнопылеватого материала и последующим выносом их в неразрушенном состоянии из элювиального горизонта. Поэтому, возможно, перенос ^{137}Cs , сорбированного на тонкодисперсной фракции, вносит существенный вклад в вертикальное перераспределение радионуклида на данном типе почвы.

В дерново-подзолисто-глеевой оторфованной песчаной почве увеличение в нижних слоях ^{137}Cs , сорбированного фракцией $<0,01$ мм, связано как с лессиважем, так и с развитием в этих слоях восстановительных процессов, приводящих к синтезу глинистых минералов, способных к необменной сорбции радионуклида.

Выводы

Результаты выполненных исследований распределения ^{137}Cs по “гранулометрическим” фракциям почв тридцатикилометровой зоны Чернобыльской АЭС позволяют сделать следующие выводы.

1. ^{137}Cs в различных количествах сорбирован на почвенных частицах. Распределение радионуклида по фракциям описывается системой линейных неравенств. На

фракции >0,01 мм может быть сорбировано от 4 до 36% валового содержания радионуклида, на фракции 0,01-0,001 мм – 45-84% и на фракции <0,001 мм - 10-50%.

2. Наибольшая удельная активность характерна для илистой фракции, наименьшая – для фракции физического песка. Удельная активность почвенных частиц с глубиной уменьшается.

3. Максимальное количество радионуклида (>45%) сорбировано фракцией 0,01-0,001 мм и зависит от гранулометрического и минералогического составов почв.

4. Распределение ^{137}Cs по фракциям в почвенном профиле определяется типом почвы.

Литература

1. Методика обследования территорий населенных пунктов, гражданских и промышленных объектов для последующего проведения дезактивационных работ. Утверждена Межведомственной комиссией по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР 17.03.89.

2. Агрохимические методы исследования почв. – М.: Наука, 1965.

3. Методическое руководство по петрограф - минералогическому изучению глин: Труды ВСЕГЕИ Министерства геологии и охраны недр СССР / *Под рук. М. Ф. Викуловой*. – М.: Госгеотехиздат, 1957.

4. Государственная система обеспечения единства измерений. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма - спектрометре. МИ 2143-91. Утверждена НП ВНИИФТРИ Госстандарта СССР, 28.12.90.

5. Почвоведение: Учеб. для ун-тов. В 2 ч./*Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова*. Ч.1. Почва и почвообразование/*Г.Д. Белицина, В.Д. Васильевская, Л.А. Гришина и др.* – М.: Высшая школа, 1988.

6. *Cremers A., Elsen A., De Peter P., Maes A.* Quantitative analysis of radiocaesium retention in soils// *Nature*. – 1988. - V. 335. - № 6187. - P. 247-249.

7. *Кольненок В.П., Кузнецов В.А., Генералова В.А.* Треугольная диаграмма распределения форм нахождения элементов в породе//*Вести Акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук.* – 1993. - №3.

8. *Полунин И. Ф.* Курс математического программирования. – Мн., 1975.

Поступила в редакцию 9.01.2002

УДК 574:621.039.542.4

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА МОТОРНОГО ТОПЛИВА ИЗ БУРЫХ УГЛЕЙ И ТЯЖЕЛЫХ НЕФТЯНЫХ ОСТАТКОВ МЕТОДОМ ГИДРОГЕНИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Г.И. Сидоров*, В.М. Поплавский*, А.А. Кричко, А.С. Малолетнев****

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

*** Московский институт горючих ископаемых, г. Москва*



Рассмотрены вопросы экологии при крупнотоннажном производстве моторного топлива из угля и тяжелых нефтяных остатков. В России разработана экономически эффективная универсальная технология переработки угля в моторное топливо методом гидрогенизации под невысоким давлением водорода 6-10 МПа, вместо 20-30 МПа в зарубежных процессах. Наиболее существенное повышение эффективности переработки угля может быть достигнуто при использовании высоконадежных экологически безопасных ядерных реакторов типа БН в составе промышленного комплекса для энергообеспечения и интенсификации технологического процесса получения синтетического жидкого топлива. Это позволит резко улучшить экологическую обстановку в районе добычи и в местах переработки угля.

Химическая переработка твердых горючих ископаемых в настоящее время претерпевает радикальные принципиальные изменения. Идет реструктуризация и всей угольной промышленности.

В связи с разразившимся в мире энергетическим кризисом в 70-80-х гг. в США, Германии, Японии, России, Австралии, Канаде, Китае, Великобритании снова вернулись к идее переработки угля в моторное топливо методом гидрогенизации, которая осуществлялась в промышленном масштабе в 30-50-х гг. в Германии, Англии, России.

В настоящее время разработано в общей сложности более 60 технологических схем переработки угля в продукты топливного и химического назначения, в том числе 30 вариантов процессов с применением метода гидрогенизации.

В России разработана экономически эффективная универсальная технология переработки угля методом гидрогенизации под невысоким давлением водорода 6-10 МПа вместо 20-30 МПа в зарубежных процессах, позволяющая рентабельно производить из бурых и низкосортных углей высококачественные бензин, дизельное и реактивное топливо, фенолы, бензол, ксилолы и другие продукты углехимии [1-3].

В этих работах участвовало большое число научно-исследовательских, проектно-конструкторских организаций и промышленных предприятий России. Были разработаны научные основы и новая отечественная технология, которая прошла паробацию в условиях опытно-промышленного производства на заводе СТ-5 (г. Венев Тульской обл.), а также проектно-конструкторская документация для сооружения в Канско-Ачинском бассейне промышленного предприятия мощностью от 3,0 до 4,5-5,0 млн. т жидких продуктов в год. В состав углеперерабатывающего предприятия включены принципиально новые процессы подготовки и переработки угля (сушка в вихревых камерах, микронный помол, диспергирование, нанесение на уголь эмульгированного катализатора и др.), сжигания твердого остатка для регенерации Мо-катализато-

Таблица 1

Основные экономические показатели промышленного предприятия СТ-500 по получению жидкого топлива из угля (цены 1991 г.) [3]

Показатели	Единицы измерения	Величина показателей	
		I схема *	II схема**
Годовой объем переработки угля,	млн.т	20,318	28,198
в т.ч. на технологию	- " -	14,068	21,198
Годовой выпуск жидких продуктов, всего	- " -	4,361	5,486
в том числе			
автобензин АИ-93	- " -	1,000	2,370
авиакеросин	- " -	0,300	0,300
дизтопливо марки Л гидроочищенное	- " -	2,715	2,715
бензол	- " -	0,061	0,061
толуол	- " -	0,005	0,005
МТБЭ – метил-требутиловый эфир	- " -	0,281	-
метанол	- " -	-	0,036
Стоимость годового выпуска товарных продуктов	млн.руб	1556,7	2087,9
Себестоимость годового выпуска товарных продуктов	- " -	778,2	989,0
Годовая прибыль	- " -	778,5	1098,9
Сметная стоимость строительства, всего	- " -	4884,7	6261,1
в том числе СМР	- " -	2626,8	3367,0
Численность производственного персонала	чел.	4621	4853
Годовой расход энергосредств:			
бурый уголь для сжигания на ТЭЦ	млн.т	4,600	4,820
бурый уголь для сжигания в блоке углеподготовки	- " -	1,650	1,740
топливный газ (собственная выработка)	млн.м ³	5,139	5,210
пар (собственная выработка)	млн.Г кал	7,780	7,940
электроэнергия (50% собственная выработка)	млн.кВтч	3338,7	3647,18
вода свежая	млн.м ³	59,0	65,096
Срок окупаемости капитальных вложений	лет	6,2	5,7

* получение жидкого топлива прямой гидрогенизацией угля;

** получение жидкого топлива гидрогенизацией и газификацией угля (дополнительно включена установка по производству из синтез-газа бензина с последующей гидроконверсией его в высокооктановый автобензин).

ра, очистки водородосодержащего газа (ВСГ) от примесей и известные из практики нефтепереработки процессы, необходимые для функционирования промышленного предприятия. Основные технико-экономические показатели производства приведены в табл. 1 [3]. На основании данных табл. 1 можно констатировать, что переработка угля с применением гидрогенизационных процессов при пониженном давлении водорода (10,0 МПа) позволяет увеличить ресурсы моторного топлива; все получаемые продукты обеспечат прибыль и рентабельность промышленного производства при сроке окупаемости капложений в течение 5-6 лет. В ближайшей перспективе сооружение предприятий по производству из угля 3,0-5,0 млн.т моторного топлива в год в одном угольном регионе вряд ли целесообразно в связи с трудностями обеспечения инвестициями на создание столь крупномасштабного производства. Более реальным представляется строительство упрощенных установок модульного типа мощностью 500 тыс.т жидких продуктов в год.

Создание таких установок достаточно для обеспечения горючесмазочными материалами угольных регионов России, удаленных от источников централизованного снабжения нефтепродуктами, но располагающих ресурсами угля, в том числе малодефицитных мелких классов.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Предприятия ТЭК являются основным источником загрязнения окружающей среды. На долю ТЭК приходится около 48,0% выбросов вредных веществ в атмосферу и 27,0% сброса загрязненных сточных вод в поверхностные водоемы, свыше 30,0% твердых отходов и до 70,0% общего объема парниковых газов [4]. При производстве тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях с использованием органического топлива (угля, мазута, природного газа, торфа и др.) негативное воздействие на окружающую среду выражается, прежде всего, в загрязнении атмосферного воздуха. Помимо газообразных продуктов сгорания следствием применения твердого и частично жидкого топлива являются выбросы твердых частиц, причем также из систем складирования и транспортировки топлива, отделений пыле- и золоудаления ТЭС. Приводятся данные [5], что в 1995 г. общий объем выбросов в России на ТЭС составил 4474 тыс.т, из них твердых веществ - 1349 тыс.т, диоксида серы - 1913,5 тыс.т, оксидов азота - 1045 тыс.т, оксидов углерода - 124 тыс.т, или 89,0% от общего газового выброса в энергетическом секторе. По данным Государственного вычислительного центра (ГВЦ) энергетики в 1999 г. объем выбросов вредных веществ в атмосферу уже составлял 10606,3 тыс.т. Другим источником негативного воздействия угледобывающих, углеперерабатывающих и углепотребляющих предприятий ТЭК являются золошлаковые отходы. В России более 170 тепловых станций, работающих на угле, способствуют образованию ежегодно около 50,0 млн.т золошлаковых отходов, причем доля их утилизации крайне мала [6]. Приводятся данные о том, что в конце 90-х гг. для производства строительных материалов, в дорожном строительстве и для других целей было использовано лишь от 4,3 до 7,7% золошлаковых отходов ТЭС [4]. Сопоставление объемов поступления загрязняющих веществ в окружающую среду с объемами добычи и переработки топливно-энергетических ресурсов в нефтеперерабатывающей и угольной отраслях ТЭК приведено в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что для этих энергоемких отраслей ТЭК удельные выбросы загрязняющих веществ за указанные 5 лет не только не снизились, несмотря на спад добычи ТЭР и производства электроэнергии, но и наблюдался их устойчивый рост (угольная промышленность). Углеперерабатывающее промышленное предприятие по производству СЖТ является так же, как и ТЭС, потенциально опас-

Таблица 2

Динамика поступления загрязняющих веществ в окружающую среду от предприятий ТЭК [4,5]

Показатели	Годы				
	1991	1992	1993	1994	1995
Нефтеперерабатывающая промышленность					
Объем нефтепереработки, млн.т	284	249	213	187	175
Газовые выбросы, тыс.т					
в целом	1436	1360	1191	1004	909
на 1 млн.т переработанной нефти	5,06	5,49	5,59	5,37	5,19
Сбросы сточных вод, млн.м ³					
в целом	325	325	279	225	317
на 1 млн.т переработанной нефти	1144	1305	1318	1203	1811
Угольная промышленность					
Добыча угля					
млн.т	349	332	306	272	252
млн.т. у. т.	156	148	136	121	112
Газовые выбросы, тыс.т					
в целом	236	267	384	687	627
на единицу добытого угля (в млн.т. у. т.)	1,51	1,80	2,82	5,68	5,60
Сбросы сточных вод, млн.м ³					
в целом	552	598	664	649	740
на единицу добытого угля (в млн.т. у.т.)	3571	4041	4882	5364	6607

ным источником вредных выбросов в атмосферу оксидов серы и азота, непредельных и ароматических углеводородов, твердых частиц (угольная пыль), а также образования большого количества золошлаковых отходов, требующих складирования и утилизации. В [7, 8] показано, что при производстве 4,0-5,0 млн.т жидких продуктов из бурых углей Канско-Ачинского бассейна 70,0% выбросов в атмосферу приходится на долю технологических установок, 2,7% - факельного хозяйства, 27,2% - ТЭЦ.

На долю неорганизованных источников выбросов (выбросы от фланцевых соединений аппаратуры, оборудования, трубопроводов, "дыханий" резервуарных парков и др.) промышленного модуля по производству СЖТ из угля приходится 22,0% от общих вредных выбросов предприятия.

Существенное снижение вредных выбросов промышленного комплекса по производству СЖТ может быть достигнуто при применении в его составе экологически безопасных ядерных БН-реакторов для выработки электроэнергии, водяного пара и газового теплоносителя на собственные нужды и обеспечения в районе его размещения близлежащих поселков [7-10]. Отмечается, что в этом случае можно рассчитывать на сокращение объемов добычи и сжигания угля на 20,0-30,0%, а также на 10,0-15,0% расхода угля на газификацию для производства водорода и энергетического газа на собственные нужды предприятия. Суммарное снижение удельного расхода угля на производство примерно в 1,5 раза позволит резко увеличить защищенность окружающей среды от вредных выбросов газов в атмосферу и на 30,0-40,0% снизить складирование твердых золошлаковых отходов в отвалы.

ОЦЕНКА ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ НА ТОВАРНУЮ ПРОДУКЦИЮ С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАТЕЖЕЙ

В настоящее время в большинстве стран приняты стандарты качества воздуха и специальные правила, ограничивающие нормы допустимых загрязняющих окружаю-

Таблица 3

Представительные стоимости специальных способов охраны окружающей среды при вводе в эксплуатацию новых угольных теплоэлектростанций (долл. США по курсу 1978 г. за 1 т используемого угля)

Способ охраны окружающей среды	Стоимости способов, долл.	Усредненные данные, долл.
Контроль за выделением тепла (охладительные башни) - с применением воды - сухой метод	0,8 11	5,9
Контроль за выделением твердых частиц - специализированный - механическое улавливание	2 3	2,5
Контроль за выделением серы - обессеривание дымовых газов с помощью известняка - регенерация - сухие методы обессеривания дымовых газов	20 17 20	19
Контроль за окислами азота - выделение окислов азота после сжигания - улавливание окислов серы и азота скрубберами после сжигания угля	6 13	9,5
Размещение отходов, полученных при сжигании угля, - обычной золы - золы, содержащей токсичные материалы, - золы и шламов, полученных при обессеривании дымовых газов	2 5 2,5	3,2
Обработка загрязненной отработанной воды - обычными методами - полная очистка	1 2,5	1,8
Итого:		~ 42 долл./т угля

Для оценки стоимости природоохранных мероприятий использовались данные, приведенные в книге К.Л. Уильсона Уголь - мост в будущее.- М.: Недра, 1985.

щую среду выделений при работе тепловых электростанций, использующих в качестве топлива уголь.

Основными загрязняющими веществами, регламентируемыми правилами, являются диоксид серы SO_2 , микрочастицы (частицы, полностью находящиеся во взвешенном состоянии) и оксиды азота NO_x .

В отдельных странах стандарты по качеству окружающего воздуха отсутствуют. Это не означает, что не предпринимаются попытки контролировать уровень загрязнения атмосферы; просто в тех странах используются другие методы определения и достижения качества окружающего воздуха. Более того, даже в тех странах, где стандарты качества окружающего воздуха имеются, методы их применения отличаются друг от друга.

Так, в США для новых угольных теплоэлектростанций введены специальные способы охраны окружающей среды (табл. 3).

На основании данных табл. 3 были проведены оценка и сравнение затрат на производство электроэнергии на теплоэлектростанциях на угле с затратами по производству электроэнергии на реакторе БН-600 (табл. 4).

В табл. 5 приведены основные экономические показатели производства синтети-

Таблица 4

Сравнение затрат на производство электроэнергии на различных электростанциях (в ценах 1991 года)

Показатели	БН 600 МВт (э)	КЭС на угле 600 МВт (э)
Капиталовложения в промстроительство, млн. руб.	1300	820
Годовые эксплуатационные расходы (включая топливо), млн.руб.	103,5	150
Срок эксплуатации, лет	30	30
Средний коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) за срок эксплуатации	0,8	0,8
Годовая выработка электроэнергии, млрд. кВт-ч/год.	4,2	4,2
Приведенные затраты на производство электроэнергии,	5,6	5,5
Дополнительные экологические платежи, руб./т. угля	-	42
Средний расход топлива, кг/кВт-ч (бурый уголь)	-	1,0
Дополнительные годовые затраты на производство электроэнергии, связанные с экологическими платежами, млн.руб./год.	-	176,4
Затраты на производство электроэнергии с учетом экологических платежей, коп./кВт-ч	5,6	9,7

Таблица составлена на основании данных "Проекта Южно-Уральской атомной станции", 1993

ческого жидкого топлива из угля на предприятии типа СТ-500.

Таким образом, сравнительные оценки стоимости производства электроэнергии на ТЭС и АЭС, проведенные с учетом экологических платежей, отличаются ~ в 1,7 раза (табл. 4), а приведенные удельные затраты на производство синтетического жидкого топлива с энергообеспечением от АЭС ~ на 30% ниже (табл. 5).

Таблица 5

Основные экономические показатели производства синтетического жидкого топлива из угля на предприятии типа СТ-500 (в ценах 1991 г.)

Показатели	Единица измерения	Вариант БН (600·10 ³ кВт(э))	Вариант КЭС (600· 10 ³ кВт(э))
Производительность по моторному топливу	млн.т/год	1,8	1,8
Капитальные вложения в комбинат	млн.руб.	2400	2050
Удельные капитальные вложения на 1 т товарной продукции	руб./т	1333	1140
Текущие эксплуатационные затраты	млн.руб./ год	200	427
Удельные текущие эксплуатационные затраты	руб./т	111	237
Приведенные удельные затраты	руб./т	311	408
Соотношение приведенных удельных затрат	%	100	131

Расчеты выполнены на основании данных ТЭДа предприятия СТ-500 (по производительности, капиталовложениям, эксплуатационным затратам и энергообеспечению)

Если ограничение выбросов в атмосферу загрязняющих химических веществ носит пока характер проблемы национального масштаба, то вопросы минимизации выбросов парниковых газов, отраженные в протоколе, принятом в Киото (Япония), приобретают статус международных соглашений, подлежащих выполнению к 2008-2012 гг. всеми подписавшими протокол странами. Ядерная энергетика обладает огромным потенциалом снижения загрязнения воздушной среды, как в региональном, так и в глобальном масштабах.

ПРИМЕНЕНИЕ ГАММА-РАДИАЦИИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРЕВРАЩЕНИЯ УГЛЯ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

В последние годы возросло внимание исследователей к другим аспектам применения ядерных энергоисточников, а именно, к изучению γ -радиационного воздействия на интенсификацию химико-технологических процессов.

Анализ литературы показывает, что пока нельзя сделать однозначных выводов и предсказать изменения в углях и нефтепродуктах, подвергшихся радиационному воздействию. Это объясняется тем, что описанные в литературе эксперименты проводили на разных углях, при различных условиях подготовки и облучения образцов. Для изучения преобразований, происходящих при радиоллизе углей, использовали, как правило, только один метод исследования. Однако можно сделать заключение о необходимости дальнейшего изучения проблемы с использованием современных методов воздействия на уголь, нефтепродукты и их смеси, а также анализа экспериментальных результатов для разработки научно-технических и технологических рекомендаций применения ядерных энергоисточников для интенсификации различных химико-технологических процессов, в том числе получения жидкого топлива из угля.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА УГОЛЬ

Работы по радиолизу угля в лабораторных условиях проводились для изучения влияния различных видов и доз ионизирующего излучения на изменение физических и химических свойств природных углей различной степени углефикации [11-20].

При введении в образец угля источника α -излучения наблюдали искусственно вызванный процесс углефикации; под воздействием ионизирующего облучения повышалось содержание углерода и изменялась отражательная способность облученного угля по сравнению с исходным [11]. Влияние ионизирующего излучения на гидрогенизацию облученного угля (доза γ -облучения $1 \cdot 10^{-7}$ Гр; доза рентгеновского облучения $6 \cdot 10^{-4}$ Гр) исследовали при температуре 400°C и давлении водорода 30,0 МПа [12]. Для большинства углей с содержанием углерода от 70,4 до 90,2%, подвергнутых действию ионизирующего излучения, увеличение степени превращения углей составило примерно 4,0%, т.е. глубина превращения углей была примерно такой же, как и необлученных углей. Эффект увеличения степени превращения отмечался у образца угля с содержанием углерода 77,1%, которое при γ -облучении составило 10,0%, а при рентгеновском облучении - 6,0%.

При исследовании влияния γ -облучения на бурые и газовые угли и их смеси с тяжелыми нефтяными остатками [13,14] установлено, что при низких дозах радиации при термообработке указанного сырья преобладают деструктивные процессы; при более высоких дозах усиливается роль поликонденсационных процессов. Отмечается, что радиационное облучение влияет на устойчивость бурых углей к термическому воздействию и на природу парамагнитных центров (ПМЦ). В [15-20] приведены данные по изучению процессов образования ПМЦ в углях при облучении образцов углей медленными и быстрыми нейтронами на ядерном реакторе, γ -квантами и электронами. При нейтронном облучении угля [15] отмечено значительное увеличение

концентрации ПМЦ в углях с содержанием углерода 89,3 и 90,5%. При облучении углей электронами с энергией 6,0 МэВ наблюдали образование короткоживущих ПМЦ, исчезающих после прекращения действия ионизирующего облучения [20]. В [21] показано, что структурные характеристики каменного угля (марки К₂) зависят от поглощенной дозы γ -излучения. В [22] исследовано влияние воздействия γ -облучения на структуру и свойства каменных углей марки Г6 Кузбасса. Установлено, что с увеличением дозы облучения угля при его термическом разложении появляется тенденция к снижению выхода твердого остатка и соответственно увеличению выхода газообразных продуктов. Аналогичные выводы о снижении термической устойчивости каменных углей при воздействии γ -облучения получены в [23-25].

Анализ литературных данных позволяет сделать вывод о том, что при воздействии ионизирующего излучения на гумусовые угли наблюдается смещение области максимального разложения углей в сторону более низких температур, увеличение доли летучих веществ, выделившихся до температуры максимума основного разложения, а также повышение реакционной способности облученных образцов по сравнению с исходным углем.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НЕФТЕПРОДУКТЫ

В литературе имеются ограниченные сведения по влиянию γ -радиации на превращение нефтепродуктов. Приводятся результаты [26,27], свидетельствующие о том, что под действием γ -облучения в нефтяных фракциях протекают деструктирующие процессы радиолитического разложения. В [28] методами группового химического анализа, дистилляции и ИК-спектроскопии изучено влияние радиационного облучения на нефтепродукты с температурой кипения выше 260°C, угольные дистилляты процесса ожижения углей при 10,0 МПа (70,0% фракции с температурой кипения выше 400°C + 30,0% гидроочищенной фракции с температурой кипения 300-400°C) и на смесь нефтепродукта с углем в соотношении 1:1. Образцы были подвергнуты действию γ -облучения в течение различного времени - от 2,5 до 75 ч. Установлено деструктирующее влияние γ -радиации на нефтепродукты как в процессе облучения, так и при последующем нагреве облученного образца при дистилляции. Авторы [28] делают вывод о том, во время протекания процессов радиолитического разложения как в угольном веществе, так и в нефтяной фракции и дальнейшего взаимодействия образующихся продуктов происходит изменение группового химического состава; увеличение образования жидких продуктов и растворимости в бензоле остатка, уменьшение содержания в структуре облученных веществ кислородных группировок, усиление эффекта отклонения от аддитивности потери массы при нагревании в интервале 350-450°C.

Таким образом, анализ литературы по проблеме гидрогенизационной переработки углей и нефтепродуктов с применением ядерных энергоисточников и ионизирующего облучения показывает, что для интенсификации процессов гидрогенизации угля и нефтепродуктов, решения проблемы сокращения расхода угля и экологически вредных выбросов в атмосферу углеперерабатывающего предприятия актуальной задачей является определение технических возможностей снижения давления процесса с 10,0 до 5,0-6,0 МПа, реализации в составе промышленного модуля энергоносителей на базе ядерной энергии, а также проведение технико-экономической оценки переориентирования этих производств на новый вид энергоносителя.

Литература

1. Малолетнев А.С., Кричко А.А., Гаркуша А.А. Получение синтетического жидкого топлива гидрогенизацией углей. - М.: Недра, 1992. - 129 с.
2. Кричко А.А., Малолетнев А.С. Жидкое топливо из угля // Российский химический журнал (Ж. Рос.хим. о-ва им. Д.И.Менделеева). - 1997. - Т.XLI. - №6. - С.16-22.
3. Малолетнев А.С. Получение моторных топлив из угольных дистиллятов с применением гидрогенизационных процессов: Дисс. докт. техн. наук. - М.: ИГИ, 1995. - 227 с.
4. Соловьянов А.А. Особенности воздействия топливно-энергетического комплекса России на окружающую среду // Российский химический журнал (Ж. Рос. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева). - 1997. - т. XLI. - №6. - С.41-44.
5. О состоянии природной среды Российской Федерации в 1995 г. - М.: ЭКОС-информ, 1996. - 451 с.
6. Итоги работы Минтопэнерго России в 1998 г. - М.: ГВЦ Энергетики, 1999. - 37 с.
7. Кричко А.А., Малолетнев А.С., Заманова Л.В., Поплавский В.М. и др. Экологические аспекты гидрогенизации бурых углей Канско-Ачинского бассейна // Химия тв. топлива. - 1998. - №2. - С.14-20.
8. Trojanov M.F., Poplavski V.M., Krichko A.A., Maloletnev A.S. et al. Power technology complex for production of motor fuel from brown coals with power supply from NPPs // Proceedings of the 4th Symposium "Nuclear heat applications: Design aspects and operating experience". - International Atomic Energy Agency (IAEA), USA, TECDOC-1056, 1998. - P.217-225.
9. Чистотина Е.А., Малолетнев А.С., Сидоров Г.И. Пути сокращения вредных выбросов при промышленном производстве жидкого топлива из угля // В сб: Международная научн. конф., посвященная 275-летию РАН "Химия и природосберегающие технологии использования угля" (Звенигород, февраль 1999). - М.: МГУ, 1999. - С.235-237.
10. Головин Г.С., Кричко А.А., Малолетнев А.С., Поплавский В.М. и др. Моторное топливо и химические продукты из угля с применением ядерной энергии // В кн: XVI Менделевский съезд по общей и прикладной химии. - М.: ИОНХ РАН, 1998. - Т. 2. - С. 271.
11. Stach N., Depireux J. // Brennstoff. Chemie. - 1965. - В.46. - S.7.
12. Lewis P.S., Kawa W., Hiteshue R.W. Hydrogenation of irradiated coal // US Bureau of mines. - 1962. - RI 6022.
13. Смуткина З.С., Секриеру В.И., Кричко И.Б., Скрипченко Г.Б. Влияние γ -радиации на термические преобразования углей // Химия тв. топлива. - 1983. - №1. - С.37-41.
14. Рустамов В.Р., Курбанов М.А., Дзантиев Б.Г. и др. Закономерности образования CO и H₂ при радиоллизе бурого угля // Химия тв. топлива. - 1982. - №3. - С.114-116.
15. Friedel R.A., Berger J.A. // Science. - 1959. - V.130. - P.1762.
16. Кузнецов П.Н., Кузнецова Л.И., Куксанов Н.К., Фадеев С.Н. Влияние ионизирующего облучения бурого угля пучком ускоренных электронов на реакцию способность при деструкции в тетралине // В сб: Международная научн. конф. "Химия угля на рубеже тысячелетий" (Клязьма, март 2000). - М.: МГУ, 2000. - С.21-23.
17. Лихтерова Н.М., Лунин В.В. // Химия и технология топлив и масел. - 1998. - №6. - С. 3-6.
18. Руднев А.В., Вальтер А.И., Калязин Е.П. Образование парамагнитных центров при гамма-радиоллизе бурого угля // Химия тв. топлива. - 1985. - №4. - С.47-49.
19. Лигачева Е.А., Костиков В.И., Скрипченко Г.Б. Влияние нейтронного облучения на структуру и свойства углеродных волокон // Химия тв. топлива. - 1979. - №4. - С.14-18.
20. Скрипченко Г.Б. Закономерности формирования надмолекулярной структуры в процессе метаморфизма углей и технологии получения высокообуглероженных материалов: Дисс. в форме научн. докл. докт. хим. наук. - М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 1998. - 53 с.
21. Кричко И.Б., Хренкова Т.М., Кирда В.С. Изменение структурных параметров коксового угля под воздействием γ -излучения // Химия тв. топлива. - 1984. - №1. - С. 18-22.
22. Лебедев В.В., Чередкова К.И., Головина Г.С. и др. Исследование воздействия γ -излучения на уголь // Химия тв. топлива. - 1975. - №1. - С.165-166.
23. Henley E.J., Karasyk L. The effects of gamma radiation on the extractable matter in bituminous coal // Fuel. - 1961. - №3. - V. XL. - P.155-159.

24. *Ouchi K., Kawana Y., Masuda T., et al.* Effect of cobalt-60 gamma radiation on coals 1- Analysis of the decomposition gases // *Fuel*. - 1963. - №1. - V. XLII. - P.55-61.
25. *Roy M.M.* Studies on the effect of gamma radiation on coals // *Fuel*. - 1963. - №2. - V. XLII. - P.125-130.
26. Радиолиз углеводородов // *Под ред. Топчиева А.В., Полака Л.С.* - М.: АН СССР, 1972. - 226 с.
27. *Лунин В.В., Соловецкий Ю.Н.* Экологически чистая технология радиационно-термической переработки угля пучками ускоренных электронов с энергией до 2,0 МэВ // В сб: VII научн. конф. по химии и технологии твердого топлива России и стран СНГ (Звенигород, ноябрь 1996). - М.: МГУ, 1996. - С. 261.
28. *Скрипченко Г.Б., Секриеру В.И., Ларина Н.К. и др.* Действие облучения на тяжелые нефтяные и угольные продукты // *Химия тв. топлива*. - 1986. - №4. - С.55-59.

Поступила в редакции 06.06.2002

УДК 574.4.631

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК. СООБЩЕНИЕ 2. ОЦЕНКА ЭКСПОЗИЦИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РИСКА В АГРОСФЕРЕ

Е.С. Фесенко, Б.И. Сынзыныс

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



На примере агроэкосистем и природных биогеоценозов рассмотрены общие принципы оценки экспозиции животных и растений при попадании в экосистемы химических веществ или радионуклидов.

Описаны главные пути и точки воздействия химических или радиоактивных веществ в агросфере, пути распространения химических и радиоактивных веществ, маршрут воздействия.

ВВЕДЕНИЕ

Современная технология определения риска как для человека, так и для экосистем предполагает разработку следующих этапов [С.1]:

- идентификация опасности;
- оценка экспозиции;
- установление зависимости доза (концентрация) - ответ;
- анализ факторов, влияющий на точность и достоверность оценки риска;
- характеристика неопределенностей;
- характеристика и оценка риска;
- управление риском; использование данных по оценке риска при принятии управленческих решений.

Одним из важных (а может быть и самых ответственных) этапов в определении риска является оценка экспозиции, которая в совокупности с данными об эффектах воздействия на здоровье людей, сельскохозяйственных животных или окружающую среду является основой для оценки риска.

Экспозиция (или воздействие) – это контакт, взаимодействие химического, физического (например, радиационного) факторов с живым организмом – рецептором [1]. Величина экспозиции определяется как измеренное или рассчитанное количество химического агента, активность радионуклидов, находящихся в соприкосновении с живыми организмами, а для человека - в соприкосновении с так называемыми “пограничными” органами – легкими, кишечником, кожей.

Оценка экспозиции - это измерение или оценка частоты, продолжительности и путей воздействия химических соединений и радионуклидов, находящихся в окружающей среде. С другой стороны, оценка экспозиции также описывает природу воздействия, величину и особенности обследуемых популяций людей, сельскохозяйственных животных или других живых организмов.

Наиболее важными шагами при оценке экспозиции являются идентификация среды, в которой распространяется опасное вещество; определение маршрутов воздействия; определение концентрации загрязняющего вещества, мощности экспозиционной дозы; определение времени, повторяемости и продолжительности воздействия; оценка популяции, подвергающейся воздействию.

Целью данной обзорной статьи является описание на примере агроэкосистем первых шагов в оценке экспозиции: характеристика окружающей обстановки при радиационном и химическом загрязнении агроэкосистем и идентификация маршрутов воздействия и потенциальных путей распространения радионуклидов или тяжелых металлов. Третьему этапу в оценке экспозиции – количественной характеристике экспозиции – будет посвящено следующее третье сообщение нашего обзора.

Общие принципы оценки экспозиции:

- главные пути и точки воздействия радиоактивных и химических веществ в агро-сфере;
- пути распространения радиоактивных и химических веществ в агро-сфере;
- маршруты воздействия.

ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В АГРОСФЕРУ

Присутствующие в сельскохозяйственной сфере радионуклиды разделяют на две категории — естественные и искусственные. К группе естественных относят составляющие компоненту природного радиационного фона радионуклиды с очень длительным периодом полураспада, содержащиеся в составе Земли как планеты с момента ее образования (наиболее важные среди них ^{40}K , тяжелые естественные радионуклиды ^{238}U и ^{232}Th , а также продукты их распада и некоторые другие). Кроме того, биогенно значимые естественные радионуклиды поступают на Землю из воздуха (^3H , ^{14}C и др.). Некоторые естественные радионуклиды (^{40}K , ^{226}Ra и др.) играют важную роль при миграции по сельскохозяйственным цепочкам. Вторую группу радионуклидов составляют искусственные радионуклиды, т.е. радионуклиды техногенного происхождения. К числу наиболее вредных в сельскохозяйственном отношении радионуклидов этой группы относят продукты деления урана и плутония (^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs и некоторые другие), а также нуклиды с наведенной активностью (^{54}Mn , $^{55,59}\text{Fe}$, ^{60}Co , ^{65}Zn и др.) и трансурановые радионуклиды (^{239}Pu , ^{241}Am и др.) [2].

Основными источниками техногенных радионуклидов в агро-сфере являются остаточные количества долгоживущих радионуклидов, поступивших в нее в результате испытаний ядерного оружия, а также выбросов и сбросов радионуклидов при работе атомных электростанций и других предприятий полного ядерного топливного цикла (предприятия по добыче уранового сырья, заводы по переработке отработанного ядерного топлива и др.). В последние годы растет число ядерных технологий, применяемых в различных отраслях хозяйственной деятельности человека; при этом не исключено поступление радионуклидов в биосферу. Очень серьезным источником техногенных радионуклидов для окружающей среды явились крупные радиационные аварии в атомной промышленности и ядерной энергетике – авария на Южном Урале в 1957 г., в Уиндскейле (Великобритания) в 1957 г. и на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 г. Остаточные количества радионуклидов присутствуют на полигонах, где проводились испытания ядерного оружия, и прилегающих к ним территориях (Семипалатинский полигон, о. Новая Земля). Рост химизации сельского хозяйства ведет к увеличению применения удобрений и мелиорантов с повышенным содержанием естественных радионуклидов. Это связано, в частности, с тем, что некоторые виды горного сырья, используемого при получении минеральных удобрений (в первую очередь, фосфорных), обогащены ^{238}U , ^{232}Th и дочерними продуктами их распада [1].

ПОВЕДЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВЕ

Поведение радионуклидов в почве определяется, прежде всего, тем, что они находятся в ней в ультрамикроразнообразиях. Например, при содержании радионуклидов в почве, равном 37 кБк/м^2 (1 Ки/км^2), их массовые доли в пахотном слое почвы равны ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28,5$ года) - $2,4 \cdot 10^{-12}\%$, ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,17$ года) - $3,9 \cdot 10^{-12}\%$, ^{95}Zr ($T_{1/2} = 63,98$ сут) - $1,6 \cdot 10^{-14}\%$ [7]. Исключение составляет небольшая группа естественных тяжелых радионуклидов, например, массовые доли ^{238}U и ^{232}Th в почве равны соответственно $3 - 4 \cdot 10^{-4}$ и $4 - 9 \cdot 10^{-4}\%$. Очень низкая массовая доля радионуклидов с $T_{1/2} < n \cdot 10^{-2} - 10^{-4}$ лет обуславливает существенную зависимость поведения радионуклидов в почвах от концентрации и свойств их изотопных и неизотопных носителей. Являясь изотопами химических элементов, радионуклиды характеризуются такими же физико-химическими свойствами, что и стабильные изотопы этих элементов. Однако тождественность поведения радионуклидов и их стабильных изотопных аналогов может наблюдаться только в случае равновесного распределения в почве физико-химических форм привнесенных радионуклидов, с одной стороны, и нативных форм их стабильных аналогов — с другой, т.е. при достижении полноты изотопного обмена во всех компонентах почвы. Время наступления равновесного распределения радионуклидов во многом зависит от свойств почвы (реакции и состава почвенного раствора, количества и состава почвенных коллоидов, содержания гумуса, влажности и др.), а также от исходной физико-химической формы радионуклидов [7].

Поступившие в почву «свежие» техногенные радионуклиды первоначально являются новыми компонентами в природной среде и постепенно, по мере «старения», становятся менее доступными для поглощения корневыми системами растений, что происходит вследствие усиления сорбции радионуклидов твердой фазой почвы, вхождения их в кристаллическую решетку глинистых минералов и т.п. Скорость «старения» разных техногенных радионуклидов неодинакова, например, для ^{137}Cs характерно интенсивное «старение», а ^{90}Sr , наоборот, в течение длительного времени сохраняется в почвах в обменном состоянии. Явление «старения» радионуклидов имеет важное значение в случае аварийного загрязнения почв, когда первое время радионуклиды находятся, как правило, в биологически доступной форме. Поглощение почвой подавляющего большинства радионуклидов определяется процессами их распределения между двумя основными фазами - твердой и жидкой (почвенный раствор) - и осуществляется, главным образом, благодаря процессам сорбции - десорбции радионуклидов, осаждения — растворения труднорастворимых соединений и коагуляции - пептизации коллоидов.

По типу поведения в почвах радионуклиды можно разделить на несколько групп. Для радионуклидов Zn, Cd и Co характерна не обменная сорбция, а их вероятные механизмы закрепления в почвах - адсорбция почвенными минералами и образование комплексов с органическими и органоминеральными лигандами. Радионуклиды Na, Rb и Sr сорбируются почвами преимущественно по обменному типу. Длительное нахождение долгоживущего техногенного радионуклида ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28$ лет) в почвах в обменной форме приводит к тому, что он становится одним из наиболее важных в загрязнении сельскохозяйственной продукции. Радионуклидам I, Ce, Pm, Zr, Nb, Fe и Ru свойственно многоформенное поведение с образованием комплексов и осаждением (коагуляцией) коллоидов. Для ^{137}Cs характерна достаточно сильная фиксация твердой фазой почвы, причем важную роль в этом процессе играют такие глинистые минералы как клиноптилолит (^{137}Cs включается в кристаллическую решетку этих минералов, переходя в недоступную для поглощения корневыми системами форму). Хотя ^{137}Cs сорбируется почвами прочнее, чем ^{90}Sr , длительный период полураспада и

биологическая значимость этого щелочного радионуклида определяют его важную роль в загрязнении сферы сельскохозяйственного производства. Для многих радионуклидов (в частности, I) существенное значение имеет образование соединений с органическим веществом почвы [9].

Радионуклиды, поступившие на почвенно-растительный покров из воздуха, первоначально концентрируются в верхнем слое почвы 0 - 2 см, а затем начинают мигрировать по ее профилю. Вертикальное перемещение радионуклидов в неперепахиваемых почвах приводит к постепенному перераспределению радиоактивных веществ в пределах корнеобитаемого слоя, а следовательно, и к изменению их поглощения корневыми системами растений и снижению мощности дозы облучения.

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ РАСТЕНИЯМИ

Радиоактивные вещества могут поступать в растения через надземные органы (при аэральном выпадении радионуклидов на почвенно-растительный покров и задержании их надземной фитомассой) и через корни (при почвенном усвоении радионуклидов). Особенностью аэрального (некорневого) перехода радионуклидов является фактически неселективная адсорбция всех поступивших на надземные части растений радионуклидов с возможным включением в цепь миграции всей смеси радионуклидов (разделение радионуклидов начинается на этапе физиологически активной инкорпорации радиоактивных веществ во внутренние ткани). Иная картина характеризует почвенный путь перехода радионуклидов, где почвы выступают как природный сорбент, а корневые системы растений поглощают радионуклиды селективно в соответствии с закономерностями минерального питания растений.

Интенсивность поступления радионуклидов в растения из почвы принято оценивать с помощью коэффициента накопления (или концентрационного отношения) K_n , равного отношению концентраций радионуклида в растениях и почве соответственно. Если аккумуляцию растениями радионуклидов из почвы определяют в расчете на золу растений, то соответствующее отношение называют коэффициентом биологического поглощения (КБП). Другим, часто используемым (особенно в практике) показателем способности растений накапливать радионуклиды является коэффициент перехода K_p , равный отношению концентрации радионуклидов в растениях к плотности загрязнения почвы, который обычно выражают в (Бк/кг)/(Бк/м²) [1].

Темпы переноса ряда радионуклидов по сельскохозяйственным цепочкам, в частности в системе почва - растение, зависят от количества сопровождающих этот процесс изотопных или неизотопных носителей радионуклидов. Это прежде всего относится к транспорту двух ведущих долгоживущих искусственных радионуклидов - ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs, основными неизотопными носителями которых являются биологически важные макроэлементы - соответственно Са и К. Для учета сопряженного переноса ⁹⁰Sr - Са и ¹³⁷Cs - К введен термин «коэффициент дискриминации микроколичеств радионуклида относительно макроколичеств носителя» (КД).

В системе почва — растение акцептором является растение, а донором — почва. Аналогичное соотношение введено и для пары ¹³⁷Cs - К. Переход ⁹⁰Sr из почвы в растения (выраженный по отношению к Са) зависит от количества обменного Ca²⁺ в почве, и в этом случае КД предложено называть показателем Клечковского.

Задерживание выпадающих из воздуха на растительный покров радиоактивных частиц принято характеризовать отношением количества радионуклидов, сорбированного на надземных частях растений, к количеству радиоактивных веществ, выпавшему на данную площадь сельскохозяйственных угодий. Задерживание оседающих на растения радиоактивных частиц и последующее их удаление зависят от площади растительной поверхности, способной аккумулировать частицы; запасов фитомассы

на единице площади, формы, размера и ориентации листьев и других надземных органов растений, а также от свойств их поверхности; скорости ветра, проходящего через посев во время и после выпадения частиц; размера аэрозольных частиц, количества выпавшего материала; относительной влажности во время и после выпадений. Роль некорневого (аэрального) загрязнения растений по сравнению с накоплением радионуклидов из почвы особенно велика в первый период после выпадений: в это время содержание радиоактивных веществ в растениях может целиком определяться задержанием радионуклидов, оседающих из воздуха, надземной фитомассой. После прекращения радиоактивных выпадений начинается очищение растений от радионуклидов (смывание дождем, сдувание ветром, удаление аэрозолей под влиянием гравитационных сил и т.п.). Снижение концентрации радионуклидов в растениях после прекращения выпадений оценивается периодом полуочищения (т.е. временем, в течение которого с надземной фитомассы удаляется 50% радионуклидов). Период полуочищения от большого числа радионуклидов у сельскохозяйственных растений колеблется от 7 до 17 сут (он зависит от физико-химических свойств радионуклидов, размеров аэрозольных частиц, биологических особенностей растений и т.д.).

Радионуклиды могут поступать в растения в результате подъема ветром или дождем с почвенного покрова как самих радиоактивных частиц, так и загрязненных частиц почвы. Это явление называют вторичным радиоактивным загрязнением растений. Такой путь поступления в растения особенно важен для тех радионуклидов, которые прочно фиксируются почвой и слабо накапливаются при корневом поглощении. Относительный вклад пылевого загрязнения в суммарное содержание радионуклидов в растениях (т.е. обусловленного поступлением радионуклидов из почвы по корневому пути и аэральным загрязнением) зависит от коэффициента накопления радионуклида: чем ниже K_n , тем относительно большее значение приобретает внекорневое (пылевое) загрязнение растения. Для глобально рассеянных в результате ядерных испытаний ^{90}Sr и ^{137}Cs вклад пылевого загрязнения в Нечерноземной зоне России в 80-х годах составлял 0,3 - 1,4 % для зерна и 3 - 4 % - для вегетативных органов растений; этот вклад был несколько выше для растений на лугах - 6 - 14 %.

По накоплению растениями химические элементы разделяют на 5 групп, характеризующихся сильным накоплением ($K_n > 10$), слабым накоплением (1 - 10), отсутствием аккумуляции (0,1 - 1), слабой дискриминацией при переходе из почвы (0,01 - 0,1) и сильной дискриминацией ($< 0,01$). Из техногенных радионуклидов растения интенсивно усваивают из почвы ^{90}Sr , значительно слабее ^{137}Cs [1].

Аккумуляция из почвы растениями таких среднеживущих радионуклидов как ^{95}Zr , $^{103,106}\text{Ru}$, $^{141,144}\text{Ce}$ очень незначительна. Крайне мало растения накапливают из почвы ^{239}Pu , ^{241}Am , радионуклиды U.

Накопление растениями радионуклидов из почвы зависит от ее физико-химических свойств: как правило, чем выше в ней содержание гумуса, обменных катионов, илстой и глинистой фракций, а следовательно, и плодородия, тем слабее поглощение растениями большинства радионуклидов. Максимальные значения K_n радионуклидов в растения характерны для торфяных и легких по гранулометрическому составу (песчаные и супесчаные) дерново-подзолистых почв.

Поступление радионуклидов в лугопастбищные растения во многом зависит от повышенной доступности радиоактивных веществ, содержащихся в луговой дернине; на лугах растения накапливают в 5 - 10 и более раз больше радионуклидов (в том числе ^{90}Sr и ^{137}Cs), чем на пахотных почвах. Особенности минерального питания, разная продолжительность вегетационного периода, характер распределения корневых систем в почве, различия в продуктивности и другие биологические особенности

растений влияют на накопление радионуклидов разными видами и сортами сельскохозяйственных культур. Аккумуляция растениями ^{90}Sr и ^{137}Cs при корневом пути перехода может различаться в зависимости от вида (в 10 - 30 раз) и от сорта (в 5 - 7 раз) [1].

ПЕРЕНОС РАДИОНУКЛИДОВ ПО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ ЦЕПОЧКАМ С УЧАСТИЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ

При выпасе на пастбищах, подвергшихся радиоактивному загрязнению, а также при поедании радионуклидсодержащих кормов в стойловый период радионуклиды поступают в организм сельскохозяйственных животных и далее переходят в продукцию животноводства (молоко, мясо и др.).

Транспорт радионуклидов по сельскохозяйственным цепочкам с участием животных описывают с помощью ряда показателей. Кратность накопления F соотносит содержание радионуклида в определенном органе или ткани животного и количество радионуклида, поступающее в организм в условиях длительного введения радиоактивных веществ. При продолжительном кормлении животных загрязненными кормами

$$F = CM/Q,$$

где C - концентрация радионуклида в органе или ткани, Бк/г; M - масса органа или ткани, г; Q - количество радионуклида, ежедневно поступающее с кормом в организм животного, Бк.

Величина F зависит от степени равновесия в обмене радионуклида у животных, достигая постоянного значения в условиях установившегося равновесия в этом обмене, т.е. в условиях, когда количество радионуклида, поступившего в организм, равно количеству выведенного из него радионуклида [1].

Выведение радионуклидов из организма (органа или ткани) животных описывают с помощью периода полувыведения $T_{\text{биол}}$, т.е. срока, в течение которого из организма (органа или ткани) удаляется половина содержащихся в нем радионуклидов. При этом предполагают экспоненциальный характер удаления радионуклидов из организма животного.

Выведение радионуклидов из органов и тканей сельскохозяйственных животных обычно оценивают с помощью одной или нескольких экспонент. Как и для звена почва - растение, для сельскохозяйственных цепочек с участием животных применяют K_n , соотносящий накопление радионуклидов в продукции животноводства (молоко, мясо и др.) и плотность радиоактивного загрязнения территории.

Попавшие в организм животных радионуклиды вовлекаются в метаболические процессы, включающие в себя всасывание, передвижение по отдельным органам и тканям, депонирование и выведение. От интенсивности этих процессов зависит, в конечном счете, накопление радионуклидов в продукции животноводства.

Метаболизм радиоактивных веществ в организме сельскохозяйственных животных для большого числа естественных и искусственных радионуклидов может рассматриваться как барьер, ограничивающий поступление радионуклидов в продукцию животноводства (молоко, мясо, яйцо, субпродукты). Такое ограничение является, в первую очередь, следствием низкого всасывания в желудочно-кишечном тракте животных таких радионуклидов как ^{60}Co , ^{90}Y , $^{103,106}\text{Ru}$, $^{141,144}\text{Ce}$, ^{238}U и трансураниевые радионуклиды. Однако в отличие от перечисленных большая группа радионуклидов, например, ^3H , ^{45}Ca , ^{65}Zn , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs и др., хорошо всасывается в желудочно-кишечном тракте. Этот процесс зависит не только от физико-химических свойств радионуклидов, но и от их формы, а также от возраста животных (у молодых всасывание выше, чем у взрослых). Тип распределения радионуклидов в организме, как и выведение их из него зависят от множества факторов (табл. 1). Наибольшее

Таблица 1

Тип распределения радионуклидов в организме сельскохозяйственных животных

Тип распределения	Радионуклид
Равномерный	Радионуклиды щелочных элементов (^3H , ^7Li , ^{22}Na , ^{40}K , ^{86}Rb , $^{134,137}\text{Cs}$)
Скелетный	Радионуклиды щелочноземельных элементов (^7Be , ^{45}Ca , $^{89,90}\text{Sr}$, ^{140}Ba , ^{226}Ra)
Печеночный	^{48}V , ^{74}Se , ^{76}As , ^{125}Sb , ^{238}U
Тиреотропный	1 ^{131}Y , ^{211}At

практическое значение имеют коэффициенты миграции радионуклидов в трофических цепях, ведущих к переходу радионуклидов в молоко и мясо, - основные источники поступления радионуклидов в организм человека [9].

Для наиболее важных в радиологическом отношении нуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs переход в 1 л молока равен соответственно 0,1 - 0,2 и 0,5 - 1,5% от суточного поступления с кормом, а в 1 кг мяса — соответственно 0,04 и 8%. Если в составе смеси, выпадающей на лугопастбищные угодья, присутствует ^{131}I , он становится одним из главных источников радиационной опасности для человека вследствие быстрого перехода в молоко (в 1 л молока 1% от суточного поступления) и последующего накопления в щитовидной железе человека. При выпасе животных на пастбищах, подвергшихся радиоактивному загрязнению (особенно на низкопродуктивных угодьях), существенным источником поступления радионуклидов в продукты животноводства может стать заглатывание животными частиц почвы [1].

МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В АГРОЦЕНОЗАХ

С учетом зависимости отдельных блоков миграции радионуклидов в агросфере и специфических особенностей их передвижения по отдельным сельскохозяйственным цепочкам можно выделить 6 групп такого рода моделей: 1) модели миграции радионуклидов в почвах; 2) модели аэрального радиоактивного загрязнения посевов сельскохозяйственных растений; 3) модели миграции радионуклидов в системе почва-растение; 4) модели миграции радионуклидов в организме сельскохозяйственных животных; 5) модели миграции радионуклидов по пищевым цепям; 6) модели миграции радионуклидов в агросфере (в локальном, региональном и глобальном масштабах).

Особый интерес представляют такие радиологические ситуации, когда под влиянием ряда факторов миграция радионуклидов по сельскохозяйственным цепочкам осуществляется с повышенной интенсивностью. Причинами такого ускоренного перемещения радионуклидов могут быть сравнительно высокая их подвижность в отдельных звеньях круговорота; своеобразные биогеохимические условия, способствующие ускорению переноса радионуклидов; отдельные технологические процессы в АПК, ведущие к увеличению накопления радионуклидов в конечных пищевых продуктах, и т.п. Во всех этих случаях принято говорить о существовании «горячих» радиозоологических районов, «горячих» сельскохозяйственных цепочек и т.п. Их наличие имеет важное значение при радиационном мониторинге агросферы, например, при выборе площадок для АЭС и других предприятий полного ядерного топливного

цикла [10].

Как радиологически «горячие» ландшафты можно рассматривать лугопастбищные угодья. Своеобразие накопления радионуклидов луговой растительностью определяется наличием на лугах дернинного слоя, состоящего из полуразложившихся остатков растений и собственно почвы. В этом специфическом депо радионуклиды, поступившие на луговые угодья после радиоактивных выпадений, задерживаются на длительное время, оставаясь повышено доступными для растений. Рыхление дернинного слоя и перевод естественных пастбищ в искусственные высокопродуктивные с сеянными травами сильно снижают накопление радионуклидов луговыми растениями и в результате ограничивают переход радиоактивных веществ в молоко и другие продукты животноводства.

Миграция радионуклидов в системе оросительная вода-почва-растение усиливается в условиях орошаемого земледелия. Особенно интенсивно ускорение перехода радионуклидов в растения происходит при дождевании, хотя и при поливе по бороздам, напуском, по чекам и т.п. также имеет место повышение поступления радионуклидов в растения относительно богарных условий. При дождевании радионуклиды поступают непосредственно в надземные части растений, минуя почвенное звено круговорота, т.е. исключается сорбция радионуклидов твердой фазой почвы. Особенно значим этот путь миграции для радионуклидов, которые сравнительно инертны при почвенном пути поступления в растения. Так, если для относительно более подвижного в системе почва-растение ^{90}Sr накопление в зерне озимой пшеницы при поливе дождеванием в 17 - 83 раза выше, чем при богарных условиях, то для менее мобильного ^{137}Cs это увеличение может достигать 700 - 1400 раз. Более сильное накопление растениями в условиях дождевания, чем при богарном земледелии, показано для большого числа искусственных радионуклидов (продуктов деления, нуклидов с наведенной активностью), а также для тяжелых естественных радионуклидов [1].

ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АГРОСФЕРУ

К тяжелым металлам (ТМ) относят элементы с атомной массой больше 50 а.е.м. Наиболее опасными загрязняющими веществами признаны тяжелые металлы: свинец, ртуть, кадмий, мышьяк, цинк, никель и др. Примерно 90% тяжелых металлов, поступающих в окружающую среду, аккумулируются почвами. Затем они мигрируют в природные воды, поглощаются растениями и поступают в пищевые цепи.

Свинец, ртуть, кадмий, мышьяк и цинк считаются основными загрязнителями, главным образом, потому, что техногенное их накопление в окружающей среде идет особенно высокими темпами. Данные элементы обладают большим сродством к физиологически важным органическим соединениям и способны подавлять наиболее значимые процессы метаболизма, тормозят рост и развитие. В сельскохозяйственном производстве это приводит к снижению продуктивности и ухудшению качества продукции.

Допустимое количество тяжелых металлов, которое человек может потреблять с продуктами питания без риска заболеть, колеблется в зависимости от вида металла: свинец - 3 мг, кадмий - 0,4 - 0,5, ртуть - 0,3 мг в неделю. Хотя эти уровни условны, тем не менее, они служат основой для контроля содержания тяжелых металлов в продуктах питания [1].

Для почв сельскохозяйственного использования основными источниками загрязнения тяжелыми металлами являются отходы промышленности и осадки сточных вод крупных промышленных городов, а также компосты из бытового мусора, применяемые в качестве удобрений [2].

Максимальное загрязнение ТМ почв и воздуха происходит за счет работы электростанций (27%), предприятий черной металлургии (24,3%), предприятий по добыче и переработке нефти (15,5%), транспорта (13,2%), предприятий цветной металлургии (10,5%), предприятий по добыче и изготовлению строительных материалов (8,1%).

Существенным загрязнителем почвы ТМ являются фосфорные удобрения, а также удобрения, получаемые с использованием экстракционной ортофосфорной кислоты (аммофосы, аммофоски, нитрофоски) [3,4]. В них могут содержаться такие ТМ как кадмий, хром, кобальт, медь, свинец, никель, ванадий, цинк. На всех предприятиях, производящих фосфорные удобрения, выбросы ТМ в атмосферу превышают в 1,5-2 раза проектные величины.

Непрерывный рост производства фосфорсодержащих удобрений приводит к накоплению твердых отходов, которые содержат фтор, мышьяк, ТМ [5]. Самым многотоннажным отходом является фосфогипс. Ежегодно фосфогипса накапливается 13 млн.т, для хранения которого ежегодно отчуждается 130 га земли. Зона аккумуляции выбросов от предприятий распространяется до 5 км.

При внесении в почву пестицидов происходит загрязнение ее, в основном, ртутью, цинком, мышьяком, медью. Содержание тяжелых металлов, примесных элементов в различных удобрениях может в сотни раз превышать их среднее содержание в почвах. Поэтому химизация сельского хозяйства сопровождается увеличением концентрации этих элементов в почве и, следовательно, в сельскохозяйственных растениях и в организме человека.

Применяемые в настоящее время в качестве органических удобрений осадки сточных вод, компосты из них и ПБО (переработанные бытовые отходы) содержат в своем составе тяжелых металлов и примесные элементы.

Концентрации тяжелых металлов в осадках сточных вод следующие (мг/кг сухого вещества): Cu - 100-2100, Zn - 820-7130, Ni - 30-920, Pb - 149-265; Pb - 100-202, Cd - 2-4.6, Cr - 20-131, Cu 100- 349, Ni -13- 52.7, Hg - 3.1, Zn до 1446 [5].

Из фунгицидов, содержащих наиболее токсичный металл - ртуть, следует назвать гранозан, используемый для протравливания семян - 75,6 % массы этого препарата представлено ртутью. При протравливании семян гранозаном норма расхода препарата 1,5-2 кг/т зерна, т.е. на 1 га может поступать от 3 до 6 г ртути ежегодно, что соответствует концентрации 1-2 мкг/кг почвы. Некоторые фунгициды содержат в своем составе медь и цинк (медный купорос, купрозан и цинеб) [8].

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ РАСТЕНИЯМИ

Поступая в растения, тяжелые металлы распределяются в их органах и тканях весьма неравномерно. Следовательно, изучение особенностей аккумуляции тяжелых металлов в растениях может помочь ограничить их поступление в организм человека.

Зачастую корневые системы растений содержат больше цинка, чем наземные органы. В наземных органах цинк концентрируется преимущественно в старых листьях. Корни пшеницы отличаются более высоким содержанием свинца и кадмия по сравнению с листьями. Уровень накопления тяжелых металлов в репродуктивных органах растений значительно ниже, чем в вегетативных, и зависит от биологических особенностей культуры, физиологической роли элемента, его содержания в почве и доступности для растений.

Органы накопления ассимилятов (корнеплоды, клубни, плоды) содержат значительно меньше тяжелых металлов, чем вегетативная масса растений. Это можно считать положительным фактом, поскольку именно они составляют хозяйственно ценную часть основных овощных культур.

Механизмы поглощения, транспорта, метаболизма и распределения тяжелых ме-

таллов в органах и тканях тесно связаны с видовыми и сортовыми особенностями возделываемых культур; на них влияют экологические и антропо-генные факторы. Знание закономерностей распределения тяжелых металлов в тканях и органах растений дает возможность выяснить механизмы их перераспределения и аккумуляции в процессе развития растений, разработать достоверные методы оценки качества урожая, грамотно сертифицировать продукцию.

Накопление и распределение тяжелых металлов в органах растения зависят прежде всего от вида, физиологической специализации и морфологических признаков отдельных органов (тип листьев, размер черешков и жилок, размер центрального цилиндра в корнеплодах).

Важно знать особенности распределения тяжелых металлов в овощных культурах.

В корнеплодах моркови содержание тяжелых металлов (кроме железа) убывает от кончика до головки. Для железа характерно высокое содержание в головке и равномерное распределение в остальной части корнеплода. В центральной части корнеплода содержится повышенное количество цинка и свинца, а в коре - повышенное количество меди, марганца, кадмия и железа.

Для нижней части корнеплода столовой свеклы характерно повышенное содержание всех элементов, кроме меди. Наименьшее содержание меди и железа отмечено в средней части корнеплода. В центральном цилиндре наблюдается повышенное количество цинка и свинца, а в коре - меди, марганца, кадмия и железа.

Минимальное количество кадмия, цинка и свинца находится в мякоти клубней картофеля. Повышенное количество железа характерно для периферийной части клубней. Медь распределена равномерно во всех частях клубня.

У плодов кабачков тяжелые металлы рассредоточены примерно одинаково по всей их длине, кроме зоны, примыкающей к плодоножке (примерно треть-четверть плода), в этой зоне содержание тяжелых металлов в 1,5 - 3 раза выше. Наибольшее количество тяжелых металлов находится в кожуре плода и в сердцевине.

Для тыквы характерно повышенное содержание тяжелых металлов в верхней части, примыкающей к плодоножке. Минимальное их количество находится в нижней части плодов (примерно в 1,5 - 4 раза меньше, чем в верхней).

Капуста отличается от других овощных культур и картофеля повышенным содержанием цинка и пониженным - кальция. Содержание всех элементов возрастает (примерно в 3 - 5 раз) от внешних листьев кочана к кочерыжке.

Для зеленных культур характерно более высокое содержание свинца в черешках, чем в листовых пластинках. Растения салата отличаются наиболее высоким содержанием свинца в корнях, тогда как растения петрушки и хрена - наименьшим. Среди зеленных культур наибольшее количество свинца во всех органах растения наблюдается у укропа, щавеля, салата [1].

Таким образом, зная распределение тяжелых металлов в отдельных зонах и тканях различных органов растений, можно оценить их опасность в зависимости от объема, который они занимают в данном органе.

Рассмотрены первые два этапа в оценке экспозиции: характеристика окружающей обстановки и идентификация маршрутов воздействия и потенциальных путей распространения. Располагая данными, изложенными в этой статье, можно перейти к характеристике третьего этапа в оценке экспозиции - количественной характеристике экспозиции. Этот этап в оценке экспозиции предусматривает установление и оценку величины, частоты и продолжительности - для химических соединений; для радиоактивных излучений - это оценка экспозиционной дозы. Технология расчета экспозиционной дозы для разных видов радионуклидов в окружающей среде также будет рассмотрена в следующем сообщении.

Литература

1. Черников В.А., Алексахин Р.М., Голубев А.В. и др. Агрэкология. - М.: Колос, 2000. - С. 300-311, 472 - 479.
2. Henin S. Les elements-traces dans le sol. /Bull.Assoc. fr. etude sol. - 1983., - №2. - P. 67-71.
3. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. - Л.: Агропромиздат. Ленингр. отделение, 1987. - С. 142.
4. Benes S. Nehtere Zdroje kontaminace pud tezkumi kovy./ Zemedelska vyroba v prmyslove oblasti. - 1988. - S. 47-51.
5. Riess P. Anwendung von Abfallen zu Nahrungs und Futterpflanzen/Landwirtschaftlicher Untersuchungs und Forschungsanstalten, 1988, 23.
6. Обуховская Т.Д., Каплунова Е.В., Сердюкова А.В. Цинк, кадмий, ртуть и свинец в системе почва-растение// Бюл. Почв. ин-та ВАСХНИЛ. - 1983. - №35. - С. 27-32.
7. Минеев В.Г. Экологические проблемы агрохимии. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. - С. 285.
8. Абрахамсон С. Возможный подход к оценке опасности мутагенов окружающей среды/ В кн.: Генетические последствия загрязнения окружающей среды. - М.: Наука, 1977. - С. 20-25.
9. Минеев В.Г. Агрохимия и биосфера. - М.: Колос, 1984. - С. 79-215.
10. Фокин А.Д. Проблема антропогенных загрязнений почв//Почвоведение. - 1989. - №10.

Поступила в редакцию 10.07.2002

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ ПОВЫШЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ВВЭР

О.Г. Герасимчук*, В.И. Орлов, В.Ф. Украинцев*****

* - Концерн «Росэнергоатом», г. Москва

** - Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций (ВНИИАЭС)

*** - Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



В работе получены и проанализированы зависимости характеристик топливоиспользования в топливных циклах повышенной длительности: длительности кампании, глубины выгорания, коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), удельного расхода природного урана и топливной составляющей себестоимости электроэнергии в зависимости от обогащения топлива и количества загружаемых ТВС.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время концерн «Росэнергоатом» и АЭС России уделяется большое внимание проблеме улучшения характеристик топливоиспользования в топливных циклах, особенно в перспективных циклах повышенной длительности.

Эти характеристики оценивают по нескольким параметрам (критериям)

- длительность кампании;
- глубина выгорания топлива;
- коэффициент использования установленной мощности (КИУМ);
- удельный расход природного урана;
- топливная составляющая себестоимости электроэнергии.

В работе исследовалось поведение этих характеристик в зависимости от обогащения топлива и количества загружаемых тепловыделяющих сборок (ТВС).

За последнее время произошли прогрессивные изменения в конструкции тепловыделяющих элементов и ТВС, которые позволяют ставить вопросы о возможности и целесообразности использовании топливных циклов повышенной длительности (до 470 суток).

АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ТОПЛИВНЫМ ЦИКЛАМ

Сначала определим КИУМ. Поскольку длительность рассматриваемых топливных грузов близка к календарному году, то для корректного сравнения различных топливных грузов КИУМ должен усредняться за достаточно большой период времени. В настоящей работе в качестве такого периода принимается проектный срок службы реактора - примерно 30 лет.

Таким образом, в простейшем случае

$$\text{КИУМ} = T_{\text{раб}}/T_{\text{экс}}$$

где $T_{\text{раб}}$ - эффективное время работы реактора на номинальной мощности; $T_{\text{экс}}$ - календарное время эксплуатации.

В упрощенном виде после преобразований можно представить КИУМ в виде

$$\text{КИУМ} = \frac{T_{\text{загр}}^k}{T_{\text{загр}}^k + T_{\text{ППР}}} + 0.005, \quad (1)$$

где $T_{\text{загр}}^k$ - календарное время работы одной (к-той) загрузки; $T_{\text{загр}}$ - эффективная длительность работы одной загрузки; $T_{\text{ППР}}$ - календарная длительность ППР.

Теперь остановимся подробнее на характеристиках и критериях топливоиспользования [1].

Глубина выгорания топлива, выраженная в энергетических единицах, равна выработке энергии на килограмм тяжелых ядер загрузки (МВт*сут/кгU_{мет}). Глубина выгорания может также выражаться количественно как масса подвергшихся делению ядер, отнесенная к единице массы топлива. Таким образом, средняя глубина выгорания характеризует энергетическую эффективность использования ядерного топлива, т.е. чем больше глубина выгорания, тем больше энергии получается от единицы массы ядерного топлива.

Однако в реакторах используется топливо разного обогащения, и одинаковую глубину выгорания можно получить, используя различное обогащение и различное количество загружаемых ТВС. Поэтому для сравнения эффективности топливных циклов с разным обогащением и количеством загружаемых ТВС необходим другой критерий. Таким критерием, позволяющим сравнивать различные топливные циклы и различные типы реакторов, является удельный расход природного урана, кгU/МВт*сут, т.е. расход ядерного топлива на единицу полученной тепловой (электрической) энергии.

Удельный расход природного урана $g_{\text{нр}}$ для стационарных топливных загрузок может быть определен по формуле

$$g_{\text{нр}} = \frac{G_x}{N_T T_{\text{эфф}}} \cdot \frac{x - x_{\text{отв}}}{x_{\text{нр}} - x_{\text{отв}}}, \quad (2)$$

где G_x - расход урана за кампанию, кг; N_T - тепловая мощность блока, МВт; $T_{\text{эфф}}$ - длительность кампании, эфф.сутки; x - обогащение топлива, %; $x_{\text{отв}}$ - обогащение топлива в отвале, %; $x_{\text{нр}}$ - обогащение природного урана, %.

Удельный расход природного урана (натуральный показатель) - является хорошим критерием эффективности для начальной стадии ядерного топливного цикла (ЯТЦ) - получение закиси-оксида (U₃O₈), обогащение урана, изготовление твэлов и ТВС.

Для центральной стадии ЯТЦ, которой является использование топлива на АЭС, где суммируются затраты на ядерное топливо и оценивается общая эффективность его использования, необходим стоимостный критерий, позволяющий учитывать стоимость ТВС различного обогащения и различных конструкций. Стоимостный критерий должен показывать какой топливный цикл является предпочтительнее для эксплуатации с точки зрения затрат на ядерное топливо.

Таким критерием, позволяющим сравнивать различные топливные циклы с точки зрения затрат на ядерное топливо, является топливная составляющая себестоимости электроэнергии (ТСС), руб/МВт-сут, которая для стационарных топливных загрузок может быть определена по формуле

$$\text{ТСС} = \frac{3_T}{N_T \cdot T_{\text{эфф}} \cdot \text{КПД}}, \quad (3)$$

где Z_T - затраты на свежее топливо в данную кампанию, руб; КПД - коэффициент полезного действия блока, отн.ед.

Таким образом, в данной работе рассматриваются соотношения между КИУМ и удельным расходом природного урана, между КИУМ и ТСС для различных топливных циклов.

Для реализации топливных циклов повышенной длительности можно либо использовать ТВС повышенного обогащения, либо загружать большее количество свежих ТВС, т.е. уменьшать кратность перегрузок (под кратностью перегрузок понимается отношение полного количества ТВС в активной зоне к числу перегружаемых ТВС), либо и то и другое; при этом будет меняться удельный расход природного урана и ТСС.

Анализы характеристик реакторов ВВЭР были проведены как для ВВЭР-440 (проекты В-330,230), так и для ВВЭР-1000 (проект 320). Здесь приводятся результаты только для ВВЭР-1000 как более перспективного в плане новых блоков.

Расчеты удельного расхода природного урана проводились по формуле (2), а расчеты КИУМ по формуле (1); при этом в качестве исходных брались следующие значения: $x_{OTB} = 0.3\%$, $x_{PP} = 0.714\%$, $N_T = 3000$ МВт, $T_{PP} = 67$ суток.

Результаты этих оценок приведены в сжатом виде в табл. 1, а для наглядности и удобства анализа построены их кривые.

Из таблицы видно, какую длительность кампании можно получить при использовании различных топливных циклов. Очевидно, что длительность кампании увеличивается с ростом обогащения и числа загружаемых ТВС. Для реализации топливных циклов длительностью от 400 эфф. суток до 550 эфф. суток необходимо увеличить обогащение до 5.0% и (или) увеличивать ежегодную загрузку до 84 ТВС.

Из этой же таблицы видно, какое среднее выгорание можно получить для различных топливных циклов, например, для топливного цикла с ежегодной загрузкой 73 ТВС обогащением 4.8%, длительность которого 500 эфф.суток, средняя глубина выгорания составляет 48 МВт*сут/кгU. Очевидно, что глубина выгорания увеличивается с ростом среднего обогащения ТВС и увеличением кратности перегрузок.

Зависимость КИУМ от обогащения топлива при различном количестве загружаемых ТВС представлена на рис.1, который подтверждает рост КИУМ с увеличением

Таблица 1

Основные характеристики топливных циклов ВВЭР-1000

Номера вариантов	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
Количество загружаемых ТВС, шт.	37	37	43	43	49	49	49	55	55	61	61	67	67	73	73
Среднее обогащение загружаемого топлива, %	4.09	5.24	4.12	5.28	3.72	4.10	5.25	4.12	5.28	4.10	5.26	4.11	5.24	4.16	5.10
Длительность кампании, эфф.сут.	253	324	287	367	287	316	407	349	447	373	479	400	513	433	531
Среднее выгорание выгружаемого топлива, МВт*сут/кг U	47.6	61.0	46.5	59.5	40.8	45.0	57.9	44.2	56.7	42.6	54.7	41.6	53.3	41.4	50.8
Удельный расход природного урана, кг/МВт-сут	0.193	0.197	0.200	0.204	0.204	0.206	0.208	0.210	0.214	0.217	0.220	0.223	0.225	0.227	0.230
ТСС без отправки ОТВС, отн.ед.	0.922	0.880	0.950	0.908	1.00	0.980	0.929	1.000	0.954	1.033	0.984	1.061	1.006	1.078	1.036
ТСС с отправкой ОТВС, отн.ед.	1.073	0.997	1.104	1.029	1.175	1.139	1.053	1.162	1.080	1.201	1.115	1.232	1.140	1.251	1.117
КИУМ, %	79.6	83.4	81.6	85.1	81.6	83.0	86.4	84.4	87.5	85.3	88.2	86.2	88.9	87.1	89.3

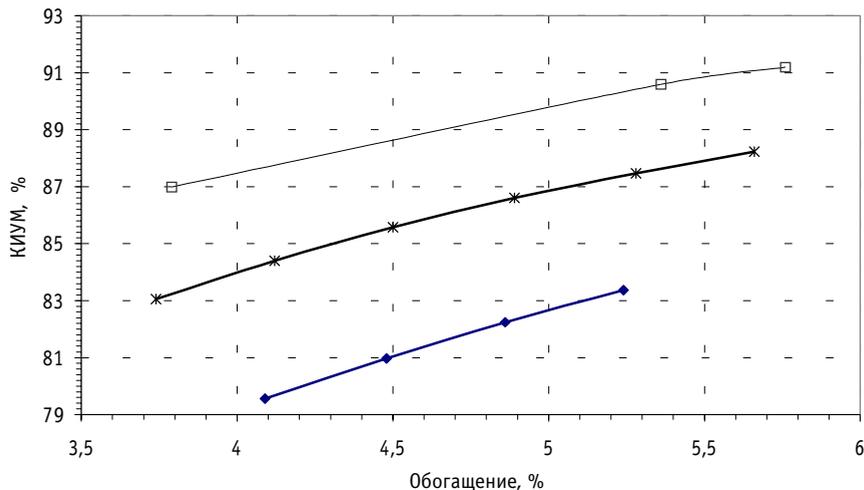


Рис. 1. Зависимость КИУМ от обогащения для разного количества загружаемых кассет. Количество загружаемых кассет: □ 84; * 55; ◆ 37

обогащения топлива и с уменьшением кратности перегрузок (которая является отношением числа загружаемых ТВС к числу ТВС в активной зоне). Отметим, что темп роста КИУМ замедляется с увеличением количества загружаемых ТВС.

Из рисунка следует, что, увеличивая обогащение топлива от 3.7 до 5.0%, можно получить увеличение КИУМ не более чем на 3.5% (в [2] кроме того показано, что использование в ВВЭР-1000 ТВС с обогащением более 5.0% будет затруднено вследствие достижения температурой повторной критичности своего предельного значения).

За счет уменьшения кратности перегрузок с 5 до 2 (количество загружаемых ТВС изменяется от 37 до 84) можно получить увеличение КИУМ на 7.5%.

Таким образом, суммарно можно получить максимальное увеличение КИУМ в 11% на всем диапазоне изменения обогащения и кратности перегрузок.

Об удельном расходе природного урана.

Из табл.1. видно, что имеет место слабая зависимость удельного расхода природного урана от обогащения и сильная зависимость от количества загружаемых ТВС. Расход природного урана растет при уменьшении кратности перегрузок. При увеличении обогащения топлива от 3.7 до 5.0% при постоянной кратности перегрузок удельный расход урана увеличивается только на 2.0%, а при увеличении числа загружаемых ТВС от 37 до 84 штук удельный расход природного урана увеличивается на 22%.

Рассмотрим, как меняется удельный расход природного урана при изменении КИУМ.

На рис. 2. представлена зависимость удельного расхода природного урана от коэффициента использования установленной мощности при разном количестве загружаемых ТВС (пунктирные линии - это линии постоянного обогащения).

Из рисунка следует, что увеличение КИУМ на 1% за счет увеличения обогащения при фиксированном количестве загружаемых ТВС в среднем приводит к увеличению удельного расхода природного урана всего на 0.6%.

Зависимость удельного расхода природного урана от КИУМ за счет изменения числа загружаемых ТВС сложнее. Мы уже отмечали, что темп роста КИУМ замедляется с увеличением количества загружаемых ТВС; это приводит к росту удельного рас-

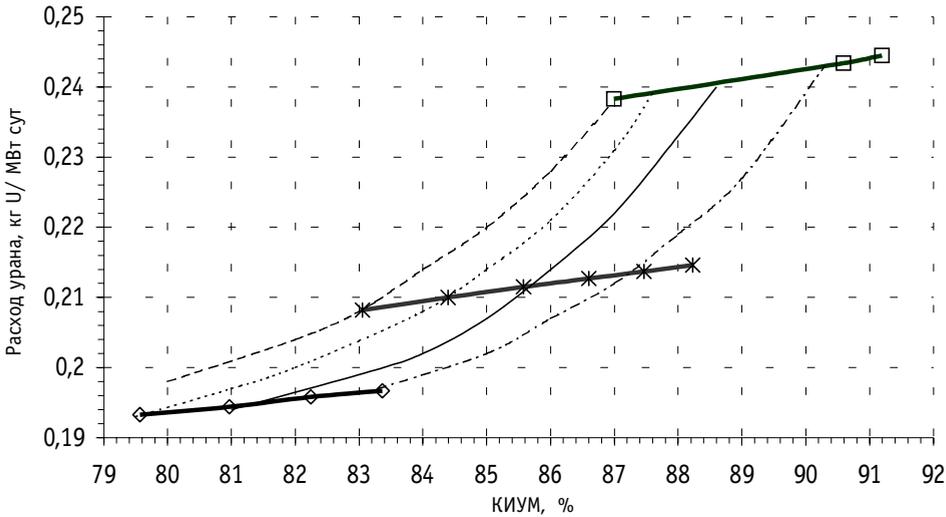


Рис. 2. Зависимость расхода природного урана от КИУМ для разного количества загружаемых кассет (пунктиром изображены линии равных обогачений). Количество загружаемых кассет и обогачение: □ — 84; * — 55; ◆ — 37; 3,75%; 4,10%; — 4,50%; 5,25%

хода природного урана на 1% изменения КИУМ при увеличении количества загружаемых ТВС (пунктирные линии становятся более вертикальными).

Для определения увеличения расхода урана от КИУМ при изменении числа загружаемых ТВС необходимо двигаться по пунктирным линиям до пересечения с интересующей линией, показывающей число загружаемых ТВС.

Для определения увеличения расхода урана при изменении КИУМ на 1% необходимо двигаться по пунктирным линиям до соответствующего пересечения с вертикальной линией координатной сетки.

Из рисунка следует, что увеличение количества ТВС на 6 штук приводит к увеличению КИУМ от 2,0 до 0,6%; при этом расход урана увеличивается приблизительно на 2,8%, увеличение же КИУМ на 1% за счет увеличения числа загружаемых ТВС приводит к увеличению расхода урана от 1,5 до 4,5%, в зависимости от сравниваемых топливных циклов.

Отсюда следует важный вывод, что темп роста КИУМ замедляется с уменьшением кратности перегрузок, т.е. эффективность, например, каждых шести последующих загружаемых ТВС уменьшается по сравнению с предыдущими с точки зрения увеличения КИУМ; при этом темп роста удельного расхода урана практически не изменяется.

Рассмотрим как меняется **топливная составляющая себестоимости** (ТСС) электроэнергии в зависимости от различных параметров и проанализируем ее изменение при изменении КИУМ.

В отличие от расхода урана для ТСС мы получим оценочные результаты, показывающие только основные тенденции и диапазон изменения параметров, т.к. принятая зависимость относительной стоимости ТВС от обогачения достаточно приближенная.

Из представленных в табл.1 данных видно, что имеет место слабая зависимость ТСС от изменения обогачения (это касается и оценок с учетом и без учета стоимости вывоза отработанных ТВС-ОТВС).

Из этой же таблицы видно, что имеет место сильная зависимость ТСС от количества загружаемых ТВС, ТСС растет при увеличении количества загружаемых ТВС (т.е.

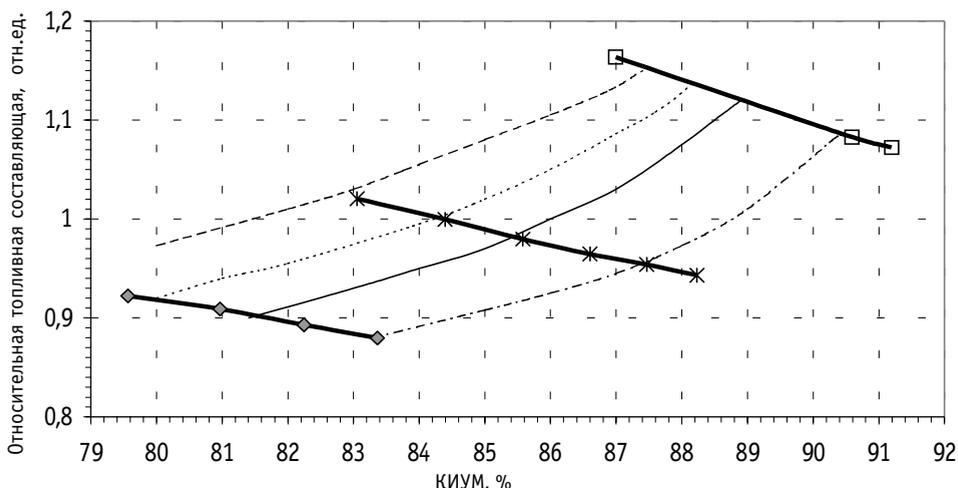


Рис. 3. Зависимость относительной топливной составляющей от КИУМ для разного количества загружаемых кассет (пунктиром изображены линии равных обогащений). Количество загружаемых кассет и обогащение: □ 84; * 55; ◆ 37; 3,75%; — 4,10%; — 4,50%; - - - 5,25%

с уменьшением кратности перегрузок). При увеличении числа загружаемых ТВС от 37 до 84 штук ТСС увеличивается на 22% (в то же время отметим, что во всем диапазоне изменения обогащений от 3.7 до 5.0% ТСС уменьшается лишь на 5%). Кроме того, с ростом обогащения уменьшение ТСС замедляется. Так как обогащение загружаемого топлива в настоящее время около 4%, то реально уменьшить ТСС за счет увеличения обогащения только на 4%.

Таким образом, пятигодичный топливный цикл по ТСС экономичнее двухгодичного топливного цикла на 22%, а четырехгодичный (загрузка 49 ТВС) и трехгодичный экономичнее двухгодичного на 18 и 14.5% соответственно.

Рассмотрим как меняется топливная составляющая себестоимости электроэнергии при изменении коэффициента использования установленной мощности.

На рис. 3 представлена зависимость ТСС от КИУМ при разном количестве загружаемых ТВС (пунктирные линии — это линии постоянного обогащения).

Из рисунка следует, что увеличение КИУМ на 1% за счет увеличения обогащения при фиксированном количестве загружаемых ТВС уменьшает ТСС не более чем на 1.5%.

Из анализа приведенного выше, как уже говорилось, следует, что реально увеличить КИУМ за счет увеличения обогащения возможно на 2.5%. Таким образом, за счет увеличения обогащения от 4.0 до 5.0% возможно увеличить КИУМ на 2.5% и уменьшить ТСС на 4%.

Зависимость ТСС от КИУМ за счет изменения числа загружаемых ТВС сложнее. Замедление роста КИУМ с увеличением количества загружаемых ТВС (см. рис.1) приводит к росту ТСС на 1% изменения КИУМ при увеличении количества загружаемых ТВС (пунктирные линии становятся более вертикальными).

Для определения увеличения значения ТСС от КИУМ при изменении числа загружаемых ТВС необходимо двигаться по пунктирным линиям до пересечения с интересующей линией, показывающей число загружаемых ТВС.

Для определения увеличения ТСС при изменении КИУМ на 1% необходимо двигаться по пунктирным линиям до соответствующего пересечения с вертикальной линией координатной сетки.

Из рисунка следует, что увеличение количества ТВС на 6 штук приводит к увели-

чению КИУМ от 2.0 до 0.6%, но при этом ТСС увеличивается в среднем на 2.8%, т.е. темп роста ТСС практически не зависит от кратности перегрузок. Увеличение же КИУМ на 1% за счет увеличения числа загружаемых ТВС приводит к увеличению ТСС от 1.3 до 4.8% в зависимости от того, какие топливные циклы мы рассматриваем, т.е. замедление темпа роста КИУМ приводит к увеличению темпа роста ТСС.

Представленные зависимости позволяют оценить выигрыш в КИУМ и проигрыш в ТСС при переходе от одного топливного цикла к другому.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что КИУМ растет с увеличением обогащения топлива и количества загружаемых ТВС; при этом темп роста КИУМ замедляется с увеличением обогащения и количества загружаемых ТВС. На всем диапазоне изменения обогащения и кратности перегрузок максимальное изменение КИУМ для ВВЭР-1000 составляет 11% (при этом за счет изменения обогащения на 3.5% и за счет изменения числа загружаемых ТВС - на 7.5%).

Таким образом, с точки зрения наименьшего увеличения удельного расхода природного урана целесообразно увеличивать КИУМ сначала за счет увеличения обогащения и только потом за счет увеличения числа загружаемых ТВС.

Темп роста КИУМ замедляется с уменьшением кратности перегрузок, т.е. эффективность каждых шести последующих загружаемых ТВС уменьшается с точки зрения увеличения КИУМ; при этом темп роста удельного расхода природного урана практически не изменяется. Для ВВЭР-1000 увеличение загружаемых ТВС на 6 штук приводит к увеличению КИУМ от 2.0 до 0.6%, при этом расход природного урана увеличивается примерно на 2.8%.

При формировании длинных топливных циклов с увеличенным КИУМ за счет увеличения обогащения топлива и уменьшения кратности перегрузок происходит значительное увеличение ТСС за счет уменьшения кратности перегрузок и незначительное ее снижение за счет увеличения обогащения. Поэтому выгодно увеличивать КИУМ за счет увеличения обогащения, однако это возможно в небольших пределах.

Анализ и сопоставление приведенных показателей достаточно полно отражают картину формирования топливных циклов увеличенной длительности. Но для более полной и реальной картины экономический анализ необходимо, кроме того, проводить по таким показателям, как себестоимость электроэнергии, прибыль, а также учитывать влияние на экономические показатели работы на мощностном эффекте реактивности.

Однако необходимо четко осознавать, что стремление к увеличению только КИУМ может приводить к снижению других характеристик, например топливоиспользования.

Вопрос каковые из них сделать приоритетными на данный момент может быть обусловлен как чисто экономическими причинами (и тогда приоритетными надо брать экономические характеристики), так и другими причинами, например политикой и борьбой за рынки (тогда КИУМ действительно может быть приоритетным).

Литература

1. Шевелев Я.В., Клименко А.В. Эффективная экономика ядерного топливно-энергетического комплекса. - М.: РГТУ, 1996. - 734с.
2. Орлов В.И., Маханько А.С., Диданин Л.Л. и др. Повышение КИУМ и эффективность топливоиспользования на АЭС с ВВЭР. 3 Межд. Научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». - М.: ВНИИАЭС, АО«Машмир», 2002. - С. 64.

Поступила в редакцию 07.08.2002

УДК 621.039.54

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ВВЭР

О.Г. Герасимчук*, В.И. Орлов, В.Ф. Украинцев*****

* - Концерн «Росэнергоатом», г. Москва

** - Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций (ВНИИАЭС), г. Москва

*** - Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



Получены и проанализированы зависимости основных экономических характеристик (себестоимости электроэнергии и совокупной экономической прибыли при производстве электроэнергии на реакторах ВВЭР) от обогащения топлива, количества загружаемых ТВС, длительности кампании и КИУМ с учетом изменения структуры затрат. На их основе сделаны прогнозы по внедрению на АЭС с ВВЭР оптимальных топливных циклов повышенной длительности.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на АЭС с реакторами ВВЭР в России заканчивается этап опытной эксплуатации нового экспериментального топлива, готовится его серийное производство. Это топливо позволяет реализовать топливные циклы повышенной длительности; для реакторов ВВЭР-1000 это означает 4-5-летний цикл. Новые тепловыделяющие сборки (ТВС) имеют отличия в конструкции: циркониевые дистанционирующие решетки (ДР) и направляющие каналы (НК), центральное отверстие в таблетке диаметром 1.5 мм и др. По сравнению с серийными такие ТВС имеют улучшенные эксплуатационные характеристики и характеристики безопасности, но в данной работе мы сконцентрируем внимание на анализе экономических аспектов топливных циклов с этими ТВС.

Наиболее объективными критериями, позволяющими сравнивать различные топливные циклы и выбирать из них оптимальные, с учетом длительности проведения планово-предупредительных ремонтов (ППР), структуры затрат на производство электроэнергии и количества произведенной электроэнергии являются себестоимость электроэнергии (стоимость выработки единицы электроэнергии) и совокупная экономическая прибыль (валовой доход минус валовые издержки) [1-3].

Цель настоящей работы - определение оптимальных (с экономической точки зрения) топливных циклов путем их сравнения между собой по этим наиболее объективным показателям.

Поскольку указанные экономические показатели зависят от очень многих параметров, меняющихся во времени, и для их получения используются упрощенные модели, не позволяющие определить их точные значения, то в данной работе не опре-

© О.Г. Герасимчук, В.И. Орлов, В.Ф. Украинцев, 2002

деляются абсолютные числовые значения экономических показателей. Однако мы можем достаточно точно (в меру точности знания значений стоимостных параметров) провести сравнение различных топливных циклов на основе относительных величин, нормированных на некоторую «базовую», и спрогнозировать такие оптимальные топливные циклы, которые позволяют выработать стратегию топливоиспользования на энергоблоках с реакторами ВВЭР.

Топливные циклы с увеличенной длительностью кампании могут отличаться от топливных циклов с «традиционной» длительностью кампании как структурой затрат, так и длительностью проведения ППР, поэтому эти факторы необходимо учитывать.

Разделим структуру затрат, куда входит много статей расходов, на четыре части (доли):

- S_m – затраты на закупку свежего топлива;
- S_o – затраты на вывоз отработанного ядерного топлива;
- S_p – затраты на проведение планово-предупредительных ремонтов (ППР);
- S_n – постоянная составляющая эксплуатационных расходов энергоблока в год.

Первые две составляющие являются переменными и зависят как от стоимости загружаемых ТВС, так и от стоимости вывоза отработанных ТВС. К последней (постоянной) составляющей отнесены все постоянные затраты (отчисления), которые вынуждена делать АЭС, даже если нет выработки энергоблоком электроэнергии (затраты на оплату труда, амортизацию основных фондов, отчисления в отраслевые фонды, оплата налогов и т.д.).

Наиболее сложной (с точки зрения того как с ней работать и куда ее относить) является составляющая затрат, связанная с ремонтом, т.к. в этой составляющей есть и закупка нового оборудования и деталей, и оплата труда ремонтного персонала, поэтому она выделяется в отдельную статью затрат.

Рассмотрим для некоторого варианта k -того топливного цикла суммарные затраты за одну кампанию; их можно записать в виде

$$S_k = S_m^k + S_o^k + S_p^k + S_n^k, \quad (1)$$

а удельные затраты (себестоимость электроэнергии на 1 кВт·ч, нетто)

$$C_k = \frac{S_m^k + S_o^k + S_p^k + S_n^k}{W_{эл}^k} = C_m^k + C_o^k + C_p^k + C_n^k, \quad (1')$$

где $W_{эл}^k$ – выработка электроэнергии за кампанию в k -ом варианте топливного цикла. Рассмотрим более подробно каждую составляющую.

Первые две составляющие – топливная составляющая себестоимости электроэнергии (ТСС) и удельные затраты на вывоз отработанного топлива рассматривались в [4] для различных топливных циклов. Данные составляющие были получены в относительных единицах, т.е. нормированы на значения C_m^0 в базовом варианте.

Удельные затраты на вывоз отработанного топлива зависят только от количества вывозимых ТВС и выработанной электроэнергии.

Удельная постоянная составляющая эксплуатационных расходов, C_n^k для k -го варианта топливного цикла за кампанию определяется по формуле

$$C_n^k = \frac{S_n^k}{W_{эл}^k} = \frac{S_n}{365} (T^k + T_n^k) \cdot \frac{1}{W_{эл}^k}, \quad (2)$$

где 365 – число дней в году, T^k – длительность кампании k -го топливного цикла, T_n^k – длительность проведения ППР в k -ом топливном цикле.

Постоянная составляющая эксплуатационных расходов S_n^k пропорциональна сумме длительностей T^k и T_n^k .

Возьмем некоторый вариант за базовый и сравнивать будем относительные удельные затраты, т.е. отнесенные к удельным затратам в базовом варианте. Кроме того, введем базовую длительность проведения ППР T_n^b , тогда (2) запишется в виде

$$C_n^k = \frac{C_n^b (T^k + T_n^k) \cdot T^b}{(T^b + T_n^b) \cdot T^k}, \quad (3)$$

где T^b - длительность кампании базового варианта, C_n^b - удельные постоянные эксплуатационные расходы в базовом варианте, отн.ед.

Для удельных относительных затрат, связанных с ремонтом энергоблока (проведением ППР), рассмотрим две основные зависимости.

1). Первая зависимость основана на предположении, что затраты на проведение ремонта S_p^k не зависят от длительности топливного цикла, но зависят от длительности проведения ППР, тогда удельные относительные затраты на ремонт для k -го варианта топливного цикла определяются по формуле

$$C_p^k = \frac{C_p^b \cdot T_n^k \cdot T^b}{T_n^b \cdot T^k}, \quad (4)$$

где C_p^b - базовые удельные затраты на ремонт, отн.ед.

Таким образом, удельные затраты на ремонт обратно пропорциональны длительности кампании рассматриваемого k -го варианта топливного цикла и прямо пропорциональны длительности проведения ППР k -го варианта.

2). Вторая зависимость, как и в случае C_n^k , основана на предположении, что затраты на ремонт S_p^k прямо пропорциональны сумме длительности кампании и длительности проведения ремонта, тогда удельные относительные затраты на ремонт определяются по формуле

$$C_p^k = \frac{C_p^b \cdot (T^k + T_n^k) \cdot T^b}{(T^b + T_n^b) \cdot T^k}. \quad (5)$$

Таким образом, определим относительную составляющую себестоимости электроэнергии для различных топливных циклов.

Из экономической теории известно, что производитель стремится к максимуму совокупной прибыли, а не к максимуму прибыли на единицу продукции; в нашем случае это значит, что топливный цикл, имеющий большую себестоимость, может дать и большую совокупную прибыль, чем топливный цикл, имеющий меньшую себестоимость, за счет большей выработки электроэнергии.

Пусть TR - некоторый средний тариф (выраженный в относительных единицах C_b) на выработанную единицу электроэнергии, тогда для k -го варианта топливного цикла

$TR \cdot \sum_A W_{эл}^k$ - валовый доход (суммирование за промежуток времени A),

$C_k \cdot \sum_A W_{эл}^k$ - валовые издержки,

$$P_K = (TR - C_K) \cdot \sum_A W_{эл}^K - \text{совокупная экономическая прибыль.}$$

Сделаем предположение, достаточно точное для большого интервала времени A (например, 30 лет), что все топливные циклы заканчиваются одновременно в конце

интервала A , тогда для базового варианта $\sum_A W_{эл}^б = W_{эл}^б \cdot \frac{A}{T^б + T_n^б}$, а для k -го варианта

$\sum_A W_{эл}^K = W_{эл}^K \cdot \frac{A}{T^K + T_n^K}$, где T^K и $T^б$ - длительности k -ого и базового циклов; T_n^K и $T_n^б$ - длительности ремонтов k -ого и базового циклов соответственно.

Относительная совокупная прибыль

$$P_K = \frac{p_K}{P_б} = \frac{TR - C_K}{TR - C_б} \cdot \frac{T^K}{T^б} \cdot \frac{(T^б + T_n^б)}{(T^K + T_n^K)} \tag{6}$$

Формула (6) позволяет определить относительную прибыль для различных топливных циклов.

Итак, рассчитаем и проанализируем зависимости относительной себестоимости электроэнергии и относительной совокупной экономической прибыли для различных топливных циклов в зависимости от обогащения топлива, количества загружаемых ТВС, длительности кампании и КИУМ с учетом изменения структуры затрат и длительности ППР и на их основе выскажем предположения по конструированию оптимальных топливных циклов АЭС с ВВЭР.

Проведем анализ эффективности топливных циклов для реакторов ВВЭР-1000. Мы рассматриваем ТВС, используя ряд обогащений топлива от 3.7% до 5.7%, а количество загружаемых ТВС в интервале от 37 до 84 с шагом 6 ТВС.

Для расчетов стоимости ТВС в данной работе использовались их относительные стоимости в зависимости от обогащения. В качестве базового (реперного) варианта

Таблица 1

Основные экономические характеристики топливных циклов ВВЭР-1000

Номера вариантов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Количество загружаемых ТВС, шт.	37	37	43	43	49	49	49	55	55	61	61	67	67	73	73
Среднее обогащение загружаемого топлива, %	4.09	5.24	4.12	5.28	3.72	4.10	5.25	4.12	5.28	4.10	5.26	4.11	5.24	4.16	5.10
Длительность кампании, эфф.сут.	253	324	287	367	287	316	407	349	447	373	479	400	513	433	531
КИУМ, %	79.6	83.4	81.6	85.1	81.6	83.0	86.4	84.4	87.5	85.3	88.2	86.2	88.9	87.1	89.3
Топливная составляющая себестоимости $C_{т,}$ отн.ед.	0.243	0.232	0.251	0.240	0.263	0.259	0.245	0.264	0.252	0.273	0.260	0.280	0.266	0.284	0.273
Удельные затраты на вывоз отработанного топлива $C_{в,}$ отн.ед.	0.040	0.031	0.041	0.032	0.046	0.042	0.033	0.043	0.034	0.044	0.035	0.046	0.035	0.046	0.037
Удельные постоянные затраты $C_{р,}$ отн.ед.	0.432	0.412	0.422	0.405	0.421	0.414	0.398	0.408	0.393	0.403	0.390	0.399	0.386	0.395	0.385
Удельные затраты на ремонт, $C_{р,}$ отн.ед.	0.308	0.240	0.273	0.214	0.270	0.247	0.192	0.225	0.176	0.209	0.163	0.196	0.152	0.180	0.147

мы использовали расчеты топливной составляющей себестоимости электроэнергии (ТСС) в цикле с обогащением загружаемого топлива 3.72%, количеством загружаемых ТВС- 49, длительностью кампании - 287 эфф. суток.

Мы получили зависимости себестоимости электроэнергии от обогащения загружаемого топлива и количества загружаемых ТВС. В качестве базовой длительности ППР принята величина $T_n^{\delta} = 67$ суток.

Рассмотрим зависимости характеристик при $T_n^k = T_n^{\delta}$, т.е. при неизменной длительности ППР. При представлении данных мы будем отмечать способ оценки относительной составляющей затрат на ремонт для различных топливных циклов.

Полученные характеристики топливных циклов повышенной длительности в зависимости от обогащения топлива, количества загружаемых ТВС и их составляющие приведены в табл.1. Все они были получены в относительных единицах, т.е. нормированы на ее значения в базовом варианте, который отмечен жирным шрифтом (№5).

Рассмотрим и проанализируем зависимости себестоимости электроэнергии для различных топливных циклов.

На рис. 1-2 представлены зависимости себестоимости электроэнергии от обогащения топлива при разном количестве загружаемых ТВС для постоянных затрат на

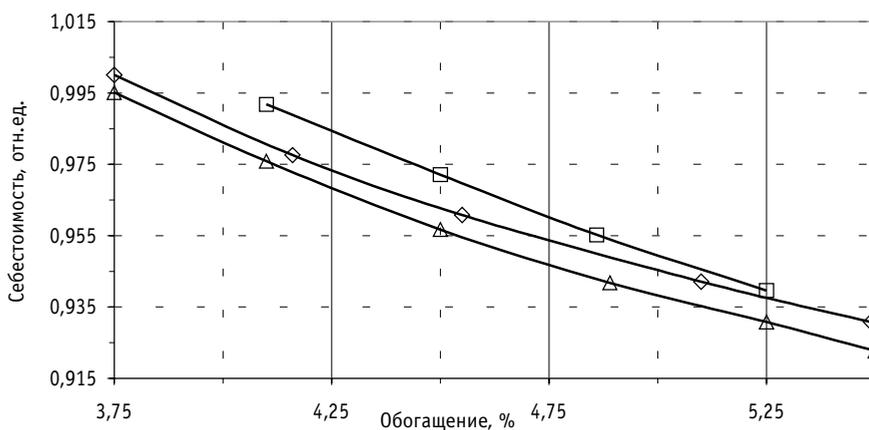


Рис. 1. Зависимость себестоимости электроэнергии от обогащения топлива для разного количества ТВС (C_p^k определяются по формуле (5), $T_n=67$ сут): количество загружаемых ТВС ◇ 73; △ 55; □ 37

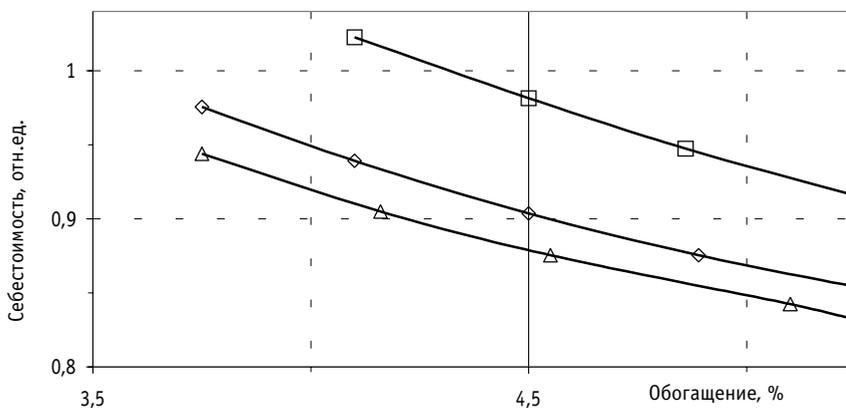


Рис. 2. Зависимость себестоимости электроэнергии от обогащения топлива для разного количества ТВС (C_p^k определяются по формуле (4), $T_n=67$ сут): количество загружаемых ТВС □ 37; ◇ 55; △ 73

ремонт и для затрат, пропорциональных длительности цикла. Видно, что при росте обогащения топлива от 3.75 до 5.0% себестоимость электроэнергии уменьшается на 10% при постоянных затратах на ремонт C_p^k (рис.2) и на 5-6%, если затраты на ремонт C_p^k пропорциональны длительности цикла (рис.1), причем темп снижения себестоимости падает по мере увеличения обогащения топлива.

Таким образом, в зависимости от изменения удельных затрат на ремонт (т.е. от вклада затрат на ремонт в себестоимость), себестоимость электроэнергии при увеличении обогащения уменьшается на 5-10%.

На рис.3 представлены зависимости себестоимости электроэнергии от количества загружаемых ТВС при фиксированном обогащении.

Из анализа зависимостей, представленных на рис.1-3 следует, что происходит снижение себестоимости по мере увеличения обогащения топлива и числа загружаемых ТВС.

Себестоимость электроэнергии с ростом обогащения от 3.75 до 5.0% уменьшается на 10% при постоянных затратах на ремонт и на 5-6%, если затраты на ремонт пропорциональны длительности топливного цикла. При увеличении числа загружаемых ТВС от 37 до 55 шт. (но не более 73) себестоимость практически не изменяется, а увеличение себестоимости происходит только при загрузке более 73 ТВС.

Особо отметим, что при любом формировании топливных загрузок большой длительности необходимо безусловное выполнение требований ядерной безопасности.

Теперь проанализируем зависимости себестоимости электроэнергии от обогащения загружаемого топлива и количества загружаемых ТВС при изменении длительности ППР.

Ясно, что увеличение длительности ППР всегда увеличивает себестоимость электроэнергии. Например, при увеличении длительности ППР от 67 до 97 суток себестоимость растет на 3-6% во всем диапазоне изменения обогащения и количества загружаемых ТВС.

Из наших оценок можно определить как «съедается» выигрыш в себестоимости от увеличения обогащения при увеличении длительности ППР.

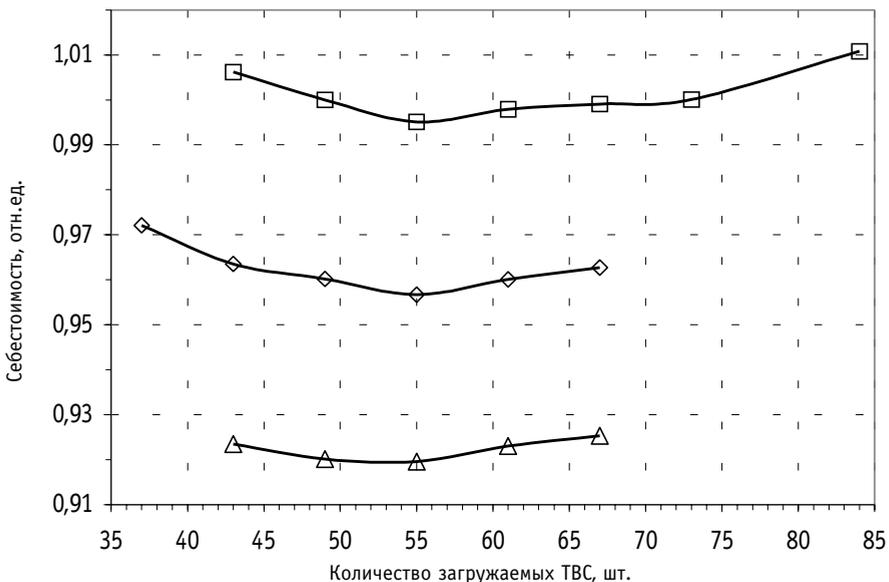


Рис. 3. Зависимость себестоимости электроэнергии от количества загружаемых ТВС для разного обогащения ($T_n=67$ суток): □ 3,75%; ◇ 4,50%; △ 5,65%

Способ формирования топливных циклов большой длительности (например, на сколько увеличить обогащение ТВС или количество загружаемых ТВС при переходе к 18-месячному топливному циклу.) на конкретных энергоблоках можно уточнить и конкретизировать после уточнения зависимости абсолютной стоимости ТВС от обогащения и после уточнения зависимости затрат на ремонт от длительности топливного цикла. Следовательно, необходимо определить

- достаточно точную зависимость реальной абсолютной стоимости ТВС от обогащения;
- как возрастут затраты на проведение ремонта и какая доля из них является постоянной, а какая переменной;
- на сколько возрастет длительность проведения ППР.

Проведем теперь сравнение топливных циклов по совокупной прибыли для случая, когда затраты на ремонт пропорциональны сумме $T^k + T_n^k$. Примем, что тариф на энергию на 15% больше себестоимости базового варианта.

Ясно, что зависимости относительной прибыли от обогащения, количества загружаемых ТВС, длительности кампании и КИУМ являются почти зеркальным отражением подобных зависимостей для себестоимости.

Для анализа возьмем базовый вариант, длительность которого около 290 суток, и сравним его с вариантом длительностью около 390 суток при $T_n^k = T_n^6 = 67$ суток. Их себестоимости практически одинаковы, а прибыль во втором варианте на 4% больше, чем в базовом. Отметим, однако, что это имеет место только в случае малых отличий себестоимостей топливных циклов при их большой разнице в длительности, в противном случае выигрыш не наблюдается.

Из рис. 4 видно, что прибыль всегда возрастает с ростом обогащения и уменьшается при увеличении длительности ремонта.

На рис.5 приведена прибыль для разного количества загружаемых ТВС для обогащения 3.75%. Видно, что она примерно постоянна в интервале загружаемых ТВС 55-75; при большем или меньшем их числе она снижается.

В заключение работы отметим влияние на экономику топливного цикла продле-

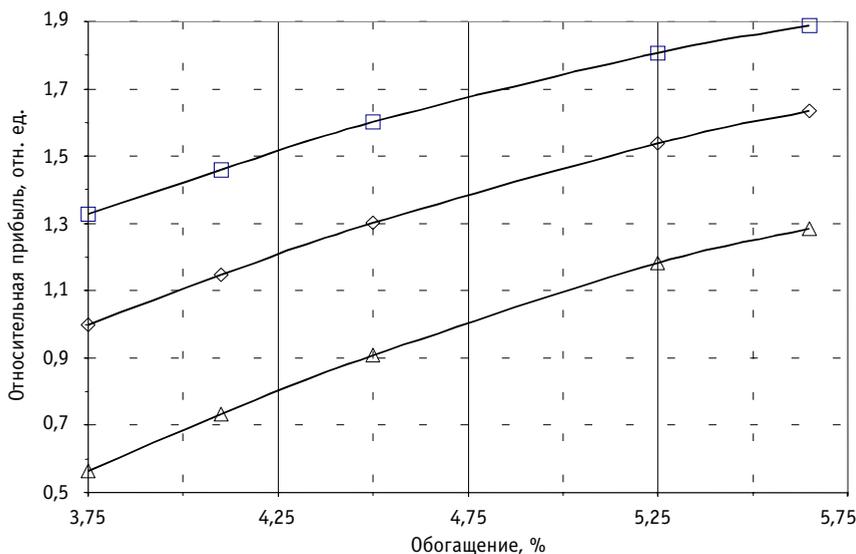


Рис. 4. Зависимость прибыли от обогащения топлива при разных длительностях ППР (загружаются 49 ТВС, C_p^k определяются по формуле (5)): □ 47 сут; ◇ 67 сут; △ 97 сут

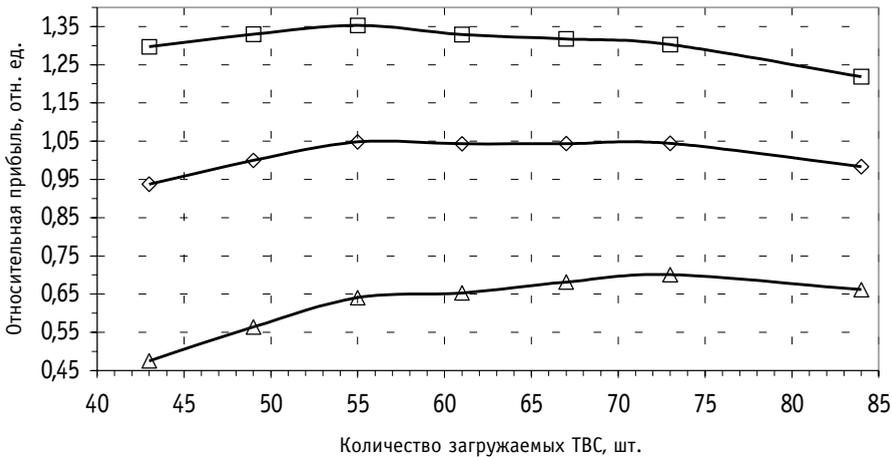


Рис. 5. Зависимость прибыли от количества загружаемых ТВС при разных длительностях ППР (обогащение 3.75%, C_p^k определяются по формуле (5)): □ 47 сут; ◇ 67 сут; △ 97 сут

ния работы на мощностном эффекте реактивности. Приведем оценку для базового варианта при неизменной длительности ППР и при постоянных затратах на ремонт.

Работа в каждую кампанию на мощностном эффекте реактивности в течение 30 эфф.суток при снижении мощности до 70% от номинальной увеличивает длительность каждой кампании на 13 эфф.суток или на 18 календарных суток.

Расчет дает следующие результаты по сравнению с базовым вариантом:

- топливная составляющая себестоимости уменьшается на 4%;
- удельные затраты на вывоз отработанного топлива также уменьшается на 4%, однако их вклад в себестоимость значительно меньше;
- удельные затраты на ремонт уменьшаются на 4%;
- удельные постоянные затраты увеличиваются на 0.6%, однако их вклад в себестоимость раза в 2 больше, чем ТСС.

В результате получаем уменьшение в относительной себестоимости около 2%, а увеличение в относительной прибыли около 4% при относительном тарифе 1.5 (при небольшом тарифе, например, 1.15 увеличение относительной прибыли будет большее, т.к. сама прибыль для базового варианта будет меньшей). Отметим, что КИУМ при этом уменьшается на 0.5%.

Из данного анализа следует, что работа на мощностном эффекте реактивности выгодна, несмотря на незначительное снижение КИУМ, т.к. АЭС получает большую прибыль, поэтому в дальнейшем целесообразно рассмотреть (технически и экономически) возможность работы на мощностном эффекте реактивности в течение 50-60 суток.

ВЫВОДЫ

1. Из приведенных результатов следует, что при формировании топливных загрузок большой длительности за счет увеличения обогащения топлива и увеличения количества загружаемых ТВС происходит значительное увеличение топливной составляющей себестоимости электроэнергии за счет увеличения числа загружаемых ТВС и незначительное ее снижение за счет увеличения обогащения ТВС.

2. КИУМ растет с увеличением обогащения топлива и количества загружаемых ТВС; при этом темп роста КИУМ замедляется с увеличением обогащения и количества загружаемых ТВС.

3. При увеличении обогащения ТВС от 3.8 до 5.0% себестоимость электроэнергии уменьшается на 5%. При увеличении числа загружаемых ТВС от 55 до 73 штук себестоимость практически не изменяется (изменение менее 1%), увеличение себестоимости происходит лишь при загрузке менее 55 ТВС и более 73 ТВС (если затраты на ремонт прямо пропорциональны длительности топливного цикла, а длительность ППР не изменяется). В этом случае сначала целесообразно определить максимально возможное обогащение (по соображениям безопасности оно должно быть не выше 5%), а затем количество загружаемых ТВС из диапазона 55-73.

Анализ становится более сложным, если длительность проведения ППР увеличивается при увеличении длительности кампании топливного цикла.

4. Если затраты на ремонт пропорциональны сумме длительности кампании и длительности ППР, то, например, при переходе от топливного цикла с обогащением 3.8% и загрузкой 49 ТВС к топливному циклу с обогащением 4.5% и загрузкой 73 ТВС получаемое снижение себестоимости за счет увеличения обогащения в 4% (в этом диапазоне изменения загружаемых ТВС себестоимость практически не изменяется от количества загружаемых ТВС) «съедается» при увеличении длительности ППР с 67 до 100 суток.

Литература

1. *Синев Н.М.* Экономика атомной энергетики - М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. *Маргулова Т.Х.* Экономичность и безопасность атомных электростанций. - М.: Высшая школа, 1984.
3. *Шевелев Я.В., Клименко А.В.* Эффективная экономика ядерного топливно-энергетического комплекса. - М.: РГГУ, 1996. - 734 с.
4. *Орлов В.И., Маханько А.С. и др.* Повышение КИУМ и эффективность топливоиспользования на АЭС с ВВЭР: Межд. научн.-техн. конф. «Безопасность и эффективность атомной энергетики». - М.: ВНИИАЭС, «Машмир», 2002. - С. 56-57.

Поступила в редакцию 7.08.2002



**70 лет со дня рождения ректора
Брянского государственного техничес-
кого университета заслуженного дея-
теля науки и техники РФ,
д.т.н., профессора
Буглаева Владимира Тихоновича**

В.Т. Буглаев родился 18 июля 1932 г. в г.Брянске. В 1956 г. закончил Брянский институт транспортного машиностроения по специальности «Турбинострое-ние» и начал работу инженером-исследователем на Ленинградском металлическом заводе. С 1957 г. ра-ботает в БИТМ (ныне Брянский государственный тех-нический университет), последовательно занимая

должности инженера, начальника научно-исследовательского сектора, доцента, за-ведующего кафедрой. В 1971 г. В.Т. Буглаев назначен проректором института по на-учной работе, с 1979 г - ректором, одновременно возглавляя кафедру «Турбины и теп-лоэнергетика».

Под руководством Владимира Тихоновича БИТМ превратился в многопрофильный технический университет, осуществляющий подготовку бакалавров, магистров и спе-циалистов высшего профессионального образования.

За последние пять лет под руководством В.Т. Буглаева по научным программам Минобразования России выполнено 9 проектов, направленных на совершенствова-ние региональной системы профессионального образования.

За 45-летний период научно-педагогической деятельности профессором В.Т. Буг-лаевым опубликовано около 300 работ, среди которых 9 монографий и 5 межвузов-ских сборников трудов под его научной редакцией, проведено более 20 выступле-ний с докладами на международных научно-технических конференциях европейских государств.

Он является автором 45 зарегистрированных изобретений и патентов, направлен-ных на совершенствование конструкций различных энергетических установок (их теп-лообменных аппаратов), часть из которых внедрены в промышленность с реальным экономическим эффектом.

В течение многих лет проф.В.Т. Буглаев возглавляет Совет ректоров вузов Брянс-кой области, деятельность которого направлена на совершенствование и развитие системы высшего профессионального образования, внедрение современных форм и методов в образовательный процесс.

В.Т. Буглаев является крупным ученым в области тепло- и массообмена, повыше-ния экономичности, долговечности и надежности элементов энергетических паро- и газотурбинных установок, компрессоров, нагнетателей, мощных судовых дизелей, регенеративных теплообменных аппаратов.

В.Т. Буглаевым создана научная школа: под его руководством 15 аспирантов и соискателей защитили кандидатские диссертации.

За заслуги в подготовке инженерных и научно-педагогических кадров, вклад в развитие науки В.Т.Буглаев награжден орденом Трудового Красного знамени (1986г.), орденом Почета (2001 г), ему присвоены почетные звания «Заслуженный деятель науки и техники РФ» (1987г), «Почетный работник газовой промышленности РФ» (1995г). «Почетный работник высшего профессионального образования РФ» (2001г). В.Т.Буглаев является Почетным гражданином г.Брянска, он избран академиком ряда отраслевых Международных академий.

**20 сентября 2002 г. исполнилось
70 лет заслуженному деятелю науки
и техники РФ, д.т.н., профессору
Владиславу Алексеевичу
Острейковскому**



В начале 50-х гг. молодой лейтенант Острейковский, окончивший Ленинградскую Краснознаменную военно-воздушную инженерную академию им. А.Ф. Можайского по специальности «Эксплуатация самолетов и авиадвигателей», едет служить в элитный стратегический полк дальней авиации. Позже, во время работы в Пермском высшем военном командно-инженерном училище ракетных войск он в 1964 году защищает кандидатскую диссертацию и становится начальником кафедры эксплуатации специальной техники. В эти годы формируется область его научных интересов: надежность сложных технических систем.

В 1975 г. полковник В.А. Острейковский переезжает в Обнинск, где становится во главе факультета кибернетики Обнинского филиала МИФИ, а еще через несколько лет (в 1981 г.) – заведующим кафедрой автоматизированных систем управления. Здесь В.А. Острейковский продолжает свои исследования в области теории надежности применительно к «обнинской» тематике – атомным станциям. Эта проблема легла в основу его докторской диссертации, защищенной в 1984 г.

Созданная В.А. Острейковским на кафедре АСУ атмосфера способствовала научному и административному росту его учеников. Воспитанниками его кафедры являются нынешний ректор ИАТЭ Н.Л. Сальников, ректор ФРИДАС А.А. Сотников, деканы ИАТЭ А.В. Антонов и О.М. Гулина, нынешний заведующий кафедрой АСУ А.Н. Анохин. Помимо основной тематики, В.А. Острейковский способствует развитию на кафедре научных исследований в области инженерной психологии и астрономии. Родоначалники этих исследований – В.Н. Абрамова и Н.В. Куликова уже много лет сами возглавляют свои кафедры.

Более двух десятилетий В.А. Острейковский входит в Президиум учебно-методической комиссии по специальности 220200 – Автоматизированные системы обработки информации и управления. В 1997 г. он открывает специальность 220200 – АСОИУ в Сургутском государственном университете, где и становится заведующим кафедрой информатики и вычислительной техники. За несколько лет своего существования его сургутская кафедра не только сформировала устойчивый педагогический потенциал, но и развернула ряд интереснейших научных исследований в области медицинской кибернетики, на базе которых был создан диссертационный совет.

Сегодняшние научные интересы В.А. Острейковского охватывают широчайший спектр кибернетических проблем: математические методы кибернетики, теория надежности, информатика, теория катастроф, медицинская кибернетика, эргономика. В общей сложности им подготовлено 22 кандидата и 7 докторов наук, опубликовано более 350 печатных работ, среди которых 12 монографий, учебники по теории систем, информатике, эксплуатации атомных станций и теории надежности, 70 учебных пособий. Он – академик Международной академии информатизации, награжден 9 правительственными наградами.

Редколлегия журнала, друзья, коллеги и ученики поздравляют Владислава Алексеевича с юбилеем и желают ему здоровья, творческого вдохновения, процветания многогранного таланта, успехов во всех начинаниях и новых достойных учеников.



**17 июля 2002 г.
исполнилось 65 лет
старейшему сотруднику
Обнинского института атомной
энергетики,
заведующему кафедрой общей и
специальной физики,
профессору, д.ф.-м.н.,
Юрию Александровичу Коровину**

Весь жизненный путь Юрия Александровича тесно связан с ИАТЭ. В 1966 г. после окончания аспирантуры Московского государственного университета Ю.А.Коровин начинает трудиться в тогда еще Обнинском филиале МИФИ. За время работы он прошел весь путь от ассистента до профессора. Талантливый педагог, авторитетный ученый, прекрасный организатор, много лет он является экспертом МАГАТЭ, участником международных проектов в области контроля за нераспространением делящихся материалов. Юрий Александрович рос вместе с институтом, им воспитана целая плеяда ученых - докторов и кандидатов наук, его работы и труды его учеников имеют известность и признание.

В 1990 г., когда институт вступил в период перестройки всего учебного процесса, Ю.А.Коровин стал первым проректором института по учебной работе и в течение свыше десяти лет сделал немало для укрепления авторитета нашего института. Под его руководством и при его же непосредственном участии проходили процессы создания новых специальностей, концепции многоступенчатого образования, открытие новых кафедр и пр.

Отраслевая лаборатория «ПУСК», которая успешно работает в области новых ядерно-энергетических технологий, была создана Ю.А.Коровиным и он является бессменным ее научным руководителем. Сотрудники лаборатории успешно работают в научных центрах Италии и Японии, принимают активное участие в жизни международного научного сообщества. Опубликовано более 200 работ (в том числе и за рубежом). Только за последние несколько лет под руководством Ю.А. Коровина были защищены пять кандидатских и две докторских диссертации.

Орден «Знак почета»-признание заслуг Юрия Александровича.

Редколлегия журнала и сотрудники института сердечно поздравляют Юрия Александровича с юбилейной датой и желают творческих успехов во всем многообразии его интересов. Здоровья и благополучия!

**5 августа 2002 г.
исполнилось 65 лет
заведующему кафедрой
«Автоматика, контроль
и диагностика ЯЭУ»
Обнинского государственного
университета
атомной энергетики,
д.т.н., профессору, академику,
заслуженному деятелю науки
РФ, почетному работнику
высшего образования России
Адолфу Ивановичу Трофимову**



Адолф Иванович после окончания Томского политехнического института в 1964 г. работал на Сибирской АЭС.

Его педагогическая деятельность началась в 1968 г. в Томском политехническом институте. С 1986 г. он работает в ОИАТЭ проректором по научной работе, а с 1990 г. – заведующим кафедрой. Он читает ведущие курсы студентам специальностей «Электроника и автоматика физических установок» и «Приборы и методы контроля качества и диагностики».

Им написано более 20 монографий и учебных пособий по автоматике, контролю и диагностике АЭС. Он является автором научного открытия.

Научная деятельность А.И. Трофимова связана, главным образом, с разработкой первичных измерительных преобразователей и информационно-вычислительных систем для контроля технологических параметров и диагностики оборудования АЭС. В частности, под его руководством разработана автоматизированная многофункциональная система контроля параметров технологических каналов ЯЭУ с реакторами типа РБМК. Им организовано также научное направление по созданию солнечных преобразователей. Под его руководством разработана федеральная программа развития возобновляемых источников энергии, которая отмечена международной наградой «Факел Бирмингама».

А.И. Трофимов является действительным членом РАЕН, членом президиума РАЕН и председателем отделения «Физико-технические проблемы энергетики».

Научная и научно-педагогическая деятельность А.И. Трофимова связана с атомной энергетикой. Он является участником ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС.

Отмечая неординарную работоспособность и коммуникабельность А.И. Трофимова, редколлегия журнала, друзья и коллеги поздравляют юбиляра и желают ему долгой плодотворной деятельности, прекрасного сибирского здоровья и реализации всех творческих замыслов, а также личного счастья и удач.

ABSTRACTS OF THE PAPERS**УДК 621.039.586**

Modeling of Corium Components Stratification at Severe Accident \ M.V. Kachtcheev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 11 pages, 4 illustrations. – References, 13 titles.

The closed model of the stratification named a homogeneous and diffusion mathematical model of corium interaction with reactor vessel has been proposed. Heterogeneous mathematical model of corium interaction with reactor vessel under severe accident has been developed. The analysis of a possibility of its application for description of the corium components stratification has been made. According to the results of calculations a notable stratification of the mixture is observed. It is shown that the complete stratification, accepted in a number of publications, is impossible. Assumption of complete stratification is idealization, but it can be considered as an extreme, limiting occurrence.

УДК 621.039.54

Simulation of Thermomechanical Behaviour of Fuel Assemblies in the WWER-1000 Reactor Core \ 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. – 5 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.

A description is given for calculating the thermomechanical behaviour of fuel assemblies in the WWER-1000 reactor core. Input data is acquired both by measurement of the in-core FSA bowing during planned refueling as well as by neutronics and thermohydraulic calculations. Approximations, implemented to acquire complete input data needed, and calculation findings are presented. Typical results of the thermomechanics of the core are offered to depict in-core FSAs set bowing taking into account inter-FSAs interaction during their bending due to operation load impact.

УДК 621.039.54

Computational Simulation of Thermomechanical Behaviour of the WWER-1000 Reactor Core under Loss-of-Coolant Accidents \ 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. – 7 pages, 3 illustrations. – References, 4 titles.

Computation philosophy and components for calculating the thermomechanical behaviour of fuel assemblies (FSAs) in the WWER-1000 reactor core under loss-of-coolant accidents (LOCA), accompanied by structure temperature rise, are outlined. Situations with applied external loads (loading by a spring unit and by inter-FSAs interaction forces) are reviewed for elastic and viscous/plastic structure straining, induced softening under elevated temperature and accelerated thermal creep. The problem is featured by non-isothermal loading mode, therefore dedicated computation procedures should be implemented. The FSAs straining is analyzed within a set contributing to the reactor core; inter-FSAs interaction is taken into consideration [1, 2, 3].

УДК 621.039.54

The Procedure for Calculating Seismic Impact on THE WWER-1000 Reactor Core \ 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. – 8 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 6 titles.

Simulating calculation procedure and findings for straining the WWER-1000 reactor core under horizontal seismic impact are presented. Major statements, based on a linear-spectral method, are outlined. 3-D calculation of straining the in-core FSAs set has been carried out by implementing the RENDEZVOUS-S code.

УДК 621.039.586

Analysis of Failure of a Fast Reactor Runaway in Approach of Zero Lifetime of Prompt Neutrons \ N.M. Kadjuri; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 5 pages, 2 illustrations. – References, 2 titles.

The estimations of the limit introducing of reactivity ρ_m conducting to destruction of fuel in approach of zero lifetime of prompt neutrons are carried out.

УДК 536.24:621.039.553.34

Influence of Geometrical Parameters of Surface Spheroidal Elements and the Scheme of Their Arrangement on Heat Efficiency of Heat-Exchange Plate Surface \ V. T. Buglaev, A.A. Anisin; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 11 pages, 5 illustrations. – References, 11 titles.

The research results of heat-aerodynamic characteristics of heat-exchange profile plate surface experimental patterns with different geometrical parameters of flow sections of adjustable passages are given and their heat efficiency is estimated.

УДК 621.039.6

Magnetohydrodynamic Resistance Reduction by Forming Oxide Electroinsulated Coatings on Channels with Heavy Liquid Metal Coolants of TOKAMAK Reactor \ A.V. Beznosov, S.S. Pinaev, M.A. Kamnev, A.V. Nazarov, P.V. Romanov; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 3 pages, 1 table, 1 illustration. – References, 8 titles.

The article includes experimental data received in investigations of magnetohydrodynamic resistance reduction by forming oxide electroinsulated coatings on internal surfaces of channels of tokamak blanket and divertor.

УДК 556.555.8

⁹⁰Sr Contamination of Water Ecosystems in Bryansk Regions Damaged after Chernobyl Accident \ M.N. Katkova, Ya.I. Gaziev, G.I. Petrenko, A.M. Polukhina; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 6 pages, 3 tables, 2 illustrations. .

In 1997-1999 the monitoring of water ecosystems in Bryansk regions contaminated after Chernobyl fallout have been conducted. In the framework of these investigations the present ⁹⁰Sr level in water bodies was evaluated. Taking into accounts the obtained result the basic conclusions and recommendations for their future use were done.

УДК 631.42

Distribution of ¹³⁷Cs on "grain-size" fractions in soils at the 30 km restricted zone around Chernobyl NPP \ S.M. Rudaya, O.V. Chistik, I.I. Matveenko; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 8 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 8 titles.

The results of investigation of ¹³⁷Cs distribution on "grain-size" fractions in soils contaminated by Chernobyl catastrophe products are presented. The mathematical description of radiocaesium distribution on fractions >0,01 mm, 0,01-0,001 mm, <0,001 mm is given. Is shown that "grain-size" and mineralogy composition of researched soils substantially determines a sorption of a radionuclide on soil particles and influences vertical migration.

УДК 574:621.039.542.4

Ecological Aspects of Mass Production of Motor Fuels from Brown Coals and Heavy Petroleum Residuals by Hydrogenation with the Use of Nuclear Technologies \ G.I. Sidorov, V.M. Poplavsky, A.A. Kritchko, A.S. Maloletnev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 10 pages, 5 tables. – References, 28 titles.

Issues on ecology with large-capacity production of motor fuels from coal and heavy petroleum residues were discussed. In Russia an efficient universal technology has been developed for coal reprocessing into motor fuel by hydrogenation under low hydrogen pressure of 6-10 MPa, instead of 20-30 MPa in foreign processes. The most significant increase in efficiency of coal reprocessing can be achieved with the use of highly reliable, environmentally safe nuclear reactors of BN type as part of industrial complex for power supply and intensification of technological process of synthetic liquid fuel production. This will allow to improve sharply ecological situation in mining areas and coal reprocessing sites.

УДК 574.4.631

Ecological risk assessment. 2. Estimation of exposition at definition of risk in agrosphere \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, 1 table. – References, 10 titles.

In this article are considered the general principles of an estimation of exposition of animals and plants at hit in ecosystems of chemical substances or radionuclides.

The main ways and points of influence of chemical or radioactive substances in agrosphere, ways of distribution of chemical and radioactive substances, a route of influence are described.

УДК 621.039.54

The analysis of the VVER reactor characteristics for prolonged duration fuel cycles \O.G. Gerasimchuk, V.I. Orlov, V.F. Ukraintsev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 7 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 2 titles.

Loading factors and characteristics of fuel using were derived and analyzed in fuel cycles of prolonged duration such as fuel campaign duration; burn up; natural uranium expenditure; specific portion of electricity cost price in dependency of fuel enrichment and quantity of loaded fuel assemblies.

УДК 621.039.54

The analysis and prediction of the VVER reactors fuel cycle economical characteristics \O.G. Gerasimchuk, V.I. Orlov, V.F. Ukraintsev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 9 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 4 titles.

The main economical characteristics of fuel cycle are derived and analyzed such as: the prime cost of electricity and cumulative economical profit while producing electricity on the VVER reactors depending on enrichment of fuel, number of loading fuel assemblies, duration of campaign and loading factor, and with account of modification of costs structures. On their basis the forecasts on an intrusion of optimum fuel cycles of prolong duration for the VVER reactor are made.

НАШИ АВТОРЫ

Анисин А.А. – к.т.н., доцент кафедры «Турбины и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета.

Безносков А.В. – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Атомные и тепловые станции» Нижегородского государственного технического университета.

Буглаев В.Т. – д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Турбины и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета, Заслуженный деятель науки и техники РФ.

Газиев Я.И. – к.ф.-м.н., зав. лабораторией отдела ядерной геофизики НПО «Тайфун»,

Герасимчук О.Г. – в 1988 закончил Обнинский институт атомной энергетики 2001г. Закончил Московский экономико-финансовый институт. В 1986 г. – участник ликвидации аварии на ЧАЭС, с 1993 – в концерне «Росэнергоатом», помощник заместителя технического директора.

Камнев М.А. – магистр кафедры «Атомные и тепловые станции» Нижегородского государственного технического университета.

Каткова М.Н. – научный сотрудник НПО «Тайфун». Область научных интересов: радиэкология объектов окружающей среды, экологический мониторинг объектов окружающей среды.

Кашеев М.В. – к.т.н., с.н.с. расчетно-теоретической лаборатории ГНЦ РФ-ФЭИ. Закончил Московский инженерно-физический институт в 1986 году. Автор и соавтор более 50 научных работ. Область научных интересов: безопасность АЭС, расчетно-теоретический анализ тяжелых аварий в РБН и на АЭС с ВВЭР.

Кричко А.А. – д. т. н., профессор, гл. научн. сотр. Московского института горючих ископаемых.

Малолетнев А.С. – д. т. н., профессор, зам. директора Московского института горючих ископаемых.

Матвеев И.И. – начальник Республиканского центра радиационного контроля и мониторинга окружающей среды.

Назаров А.В. – магистр кафедры «Атомные и тепловые станции» Нижегородского государст-

венного технического университета. Область научных интересов: физика радио-активных атмосферных аэрозолей, пути миграции радионуклидов в окружающей среде.

Орлов В.И. – закончил МИФИ в 1976 г. С 1976 г. работает в ФГУДП ВНИИАЭС, ныне нач. отдела научно-технического сопровождения эксплуатации АЭС с ВВЭР.

Петренко Г.И. – к.х.н., старший науч. сотрудник отдела ядерной геофизики НПО «Тайфун» Область научных интересов: методы радиохимического анализа проб окружающей среды, пути миграции радионуклидов в окружающей среде.

Пинаев С.С. – аспирант кафедры «Атомные и тепловые станции» Нижегородского государственного технического университета.

Полухина А.М. – инженер отдела ядерной геофизики НПО «Тайфун». Область научных интересов: методы радиохимического анализа проб окружающей среды.

Поплавский В.М. – д. т. н., профессор, зам. генерального директора ГНЦ РФ-Физико-энергетического института им. А.И.Лейпунского.

Романов П.В. – к.т.н., Министерство по атомной энергии РФ.

Рудая С.М. – аспирантка Международного государственного экологического университета им. А.Д. Сахарова.

Сидоров Г.И. – ведущий инженер ГНЦ РФ-Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского.

Сынзыныс Б.И. – д.б.н., профессор кафедры экологии ИАТЭ. Область научных интересов: экологические проблемы комбинированного действия тяжелых металлов и радиации на растения и животных; оценка риска техногенного воздействия на экосистемы.

Фесенко Е.С. – студентка 3 курса кафедры экологии ИАТЭ. Область научных интересов: вопросы математического моделирования в экологии.

Чистик О.В. – д.с.-х.н., профессор Международного государственного экологического университета им. А.Д. Сахарова.

OUR AUTHORS

Anisin A.A. - Cand. Sci. (Engineering), Associated Professor of the department "Turbines and Heat Power Engineering" of Bryansk State Technical University.

Beznosov A.V. – Dr.Sci. (Engineering), Professor, RF Honored Scientist, AIE Academician, Head of the «Nuclear and Thermal Plant» Department of the Nizhny Novgorod State Technical University.

Buglaev V.T. – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the department "Turbines and Heat Power Engineering" of Bryansk State Technical University, Honoured Scientist of the Russian Federation.

Chistik O.V. – Dr. Sci. (Agricultural), Professor of the International Sakharov Environmental University.

Fesenko Eu.S. – the third level student of Ecology Department of the INPE. Scientific interests: questions of mathematical modeling in ecology.

Gaziev Ya.I.– Cand. Sci. (Phys.-Math.), head of laboratory of the nuclear geophysics department of the research-and-production association "Typhoon". Scientific interests: physics of radioactive atmospheric aerosol, radionuclid migration in the environment.

Gerasimchuk O.G.- graduated from the Obninsk institute of nuclear power engineering 1988, graduated from the Moscow Economical-financial institute In 2001. In 1986 was the participant of liquidation of the Chernobil Accident, from 1993- in the Rosenergoatom concern, the assistant of the deputy Technical director.

Kachtcheev M.V. – Cand. Sci. (Engineering), graduated from Moscow State Physics and Engineering Institute in 1986, senior researcher of calculational and theoretical laboratory of the Institute of Physics and Power Engineering (IPPE). The author of more than 50 publications. Scientific interests: safety of NPPs, calculational and theoretical analysis of severe accidents within fast reactors and at NPPs with VVER.

Kamnev M.A. – Post-graduate student of the «Nuclear and Thermal Plant» Department of the Nizhny Novgorod State Technical University.

Katkova M.N. – researcher of the research-and-production association "Typhoon". Scientific

interests: radioecology, ecological monitoring of the environment objects.

Kritchko A.A. – Dr. Sci. (Engineering), Professor, General Researcher, Moscow Research Institute of Combustible Fossils.

Maloletnev A.S. – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy Director, Moscow Research Institute of Combustible Fossils.

Matveenko I.I. – head of the Republican Center Radiation Control and Environmental Monitoring.

Nazarov A.V. – Post-graduate student of the «Nuclear and Thermal Plant» Department of the Nizhny Novgorod State Technical University.

Orlov V.I. - graduated from the Moscow Engineering Physics Institute in 1976. From 1976 working in the All -Russia research institute on exploitation of nuclear power plants (VNIIAES), head of department of scientific monitoring of VVER NPP operation.

Petrenko G.I.– Cand.Sci. (Chemistry), senior researcher of the nuclear geophysics department of the research-and-production association "Typhoon". Scientific interests: methods of the radiochemical analysis of samples, radionuclid migration in the environment.

Pinaev S.S. – Post-graduate student of the «Nuclear and Thermal Plant» Department of the Nizhny Novgorod State Technical University.

Polukhina A.M. – engineer of the nuclear geophysics department of the research-and-production association "Typhoon". Scientific interests: methods of the radiochemical analysis of sample

Poplavsky V.M. – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy Director, SSC RF - Institute of Physics and Power Engineering.

Romanov P.V. – Cand.Sci. (Engineering), Minatom RF.

Rudaya S.M. – post-graduated student of the International Sakharov Environmental University.

Sidorov G.I. – Leading Researcher, SSC RF- Institute of Physics and Power Engineering.

Synzynys B.I. – Dr. Sci (Biology), Professor of the Ecology Department of the INPE. Scientific interests: a complex action of heavy metals and radiation on plants and animals; risk assessment.