

УДК 621.039.524.44

Содержание трития в теплоносителе реакторов ВВЭР

ГОЛУБЕВ Л. И., ИЛЯСОВ В. М., ЛУРЬЕ А. И., МЕХЕДОВ Б. Н., СУХОТИН Л. Н., АРХИПКИН В. М., ХАМЬЯНОВ Л. П.

Значительные выбросы трития во внешнюю среду, а также трудности его улавливания ввиду широкой распространенности химического аналога — протия — обусловили тот факт, что в последнее время обращается серьезное внимание на проблему образования трития на АЭС.

В работах [3, 4] рассматривалось образование трития в реакциях $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ и $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}(n, n\alpha)^3\text{H}$. Авторы пришли к противоположным выводам о вкладе этих процессов в накопление трития. В работе [6] приведены экспериментальные данные предельных значений концентраций трития в системах водообеспечения отечественных АЭС.

Известно, что источниками трития на АЭС являются реакции тройного деления в топливе, реакции на ^{10}B , протекающие в теплоносителе и органах регулирования, а также реакции на дейтерий и примесном литии, попадающем в теплоноситель с химическими реагентами КОН и H_2BO_3 . Наличие борного регулирования на втором — четвертом блоках НВАЭС позволяет оценивать вклад реакций на боре и выявлять влияние условий водообмена первого контура, а изучение поведения трития в теплоносителе первого блока, имеющего только стержневое регулирование, дает сведения о миграции трития из топлива и бористой стали и о вкладе реакций на дейтерии.

В настоящей работе на основании более полных, чем в работах [3, 4], сведений о сечениях реакций на боре и литии [7] и экспериментальных данных по спектрам нейтронов в активной зоне ВВЭР НВАЭС [8] и концентрациям бора и лития в теплоносителе [5] найдены аналитические зависимости концентрации трития в воде первого контура с учетом протечек и очистки, которые сопоставляются с экспериментальными данными.

Концентрация трития $C_{\text{зН}}$ в воде первого контура реактора объемом $V_{\text{к}}$ имеющего борное регулирование, подчиняется уравнению

$$V_{\text{к}} \frac{dC_{\text{зН}}}{dt} = P_{\text{обР}} - [v_{\text{пр}}(1 - \varepsilon_{\text{пр}}) + v_{\text{оч}}(1 - \varepsilon_{\text{оч}}) + v_{\text{газ}} + \lambda] C_{\text{зН}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{обР}}$ — скорость поступления трития в теплоноситель из реакций на боре ($P_{\text{В}}$) и литии (P_{Li}) в теплоносителе, органах управления и из

реакций тройного деления в топливе; $v_{\text{пр}}$, $v_{\text{оч}}$, $v_{\text{газ}}$ — расходы теплоносителя на протечки, очистку и переход в газовую фазу за счет явления радиолиза; $\varepsilon_{\text{пр}}$ и $\varepsilon_{\text{оч}}$ — эффективность «очистки» от трития (равна отношению концентрации трития в подпиточной и исходной воде); λ — постоянная распада.

Рассмотрим вклад каждого источника трития.

Реакция $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$. Скорость образования трития можно найти из выражения

$$P_{\text{В}} = \frac{4,18 \cdot 10^{-15} \kappa \mu V_{\text{а}} C_{\text{В}} N_0}{A_{\text{В}}} \int_0^{\infty} \varphi(E) \sigma_{\text{В}}(E) dE \quad \text{Ки/сут}, \quad (2)$$

где κ , μ , N_0 и $A_{\text{В}}$ — соответственно содержание ^{10}B в элементе, содержание бора в кислоте, число Авогадро и атомная масса бора; $V_{\text{а}}$ — объем

активной зоны реактора, л; $\int_0^{\infty} \varphi(E) \sigma_{\text{В}}(E) dE$ — активационный интеграл, с^{-1} ; $C_{\text{В}}$ — концентрация борной кислоты, г/л.

Если использовать данные по сечениям реакции $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ [7] и спектрам быстрых нейтронов в активной зоне реакторов НВАЭС [8], приведенные на рис. 1, то общее количество образованного трития за время t для линейного изменения концентрации бора во времени

$$C_{\text{В}} = C_{\text{В}}^0 + v_{\text{В}} t \quad (3)$$

будет равно

$$a_{\text{зН}} = 1,95 \cdot 10^{-4} W (C_{\text{В}}^0 t + v_{\text{В}} t^2 / 2) \quad \text{Ки}, \quad (4)$$

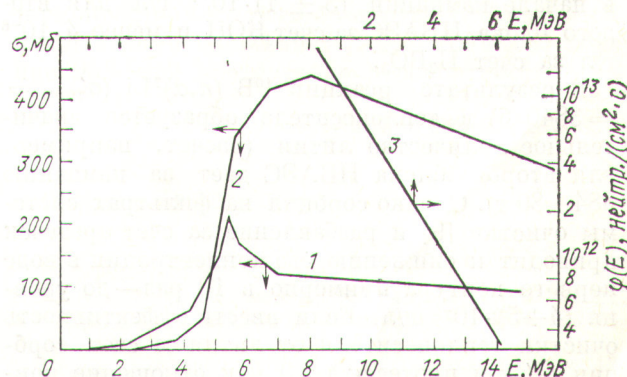


Рис. 1. Зависимость сечений реакций $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ (1) и $^7\text{Li}(n, n\alpha)^3\text{H}$ (2) от энергии нейтронов и спектр нейтронов в активной зоне (3)

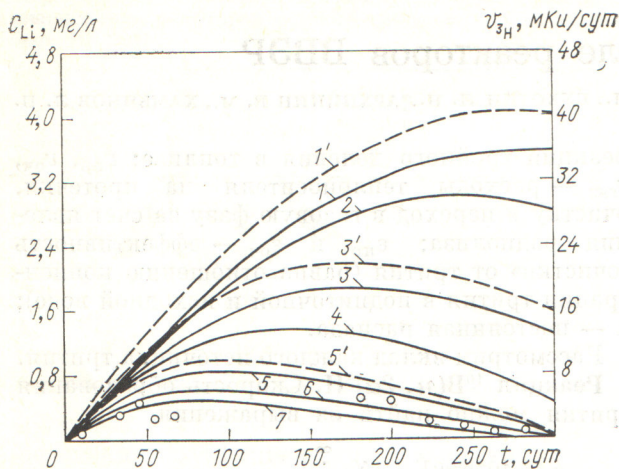


Рис. 2. Зависимость накопления ${}^7\text{Li}$ в воде первого контура (1—7) и скорость образования трития по реакции ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}(n, n\alpha){}^3\text{H}$ (1'—7') при коэффициентах очистки от лития $\beta_2 = 10^{-6}$; 10^{-3} ; $5 \cdot 10^{-3}$; 10^{-2} ; $2 \cdot 10^{-2}$; $3 \cdot 10^{-2}$ и $4 \cdot 10^{-2}$ соответственно (○ — результаты измерений концентрации лития по данным работы [5] на втором блоке НВАЭС)

где W — тепловая мощность реактора, МВт; v_B — скорость изменения концентрации бора.

Например, для кампаний 1975—1976 гг. суммарное количество трития, образованное на втором — четвертом блоках, составляло соответственно 130 ± 30 ; 134 ± 30 и 222 ± 50 Ки при средней электрической мощности 361, 323 и 440 МВт.

Реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ и ${}^7\text{Li}(n, n\alpha){}^3\text{H}$. Естественный литий может попадать в теплоноситель в качестве примеси с химическими реактивами H_3BO_3 и KOH . Оценка его содержания, по данным спектрального анализа, составила, например, для KOH марки ч. д. а (4 ± 1) $\times 10^{-4}$ мас. % и для H_3BO_3 марки о. ч. $1 \cdot 10^{-4}$ мас. %, что соответствует концентрации лития в начале кампании (3 ± 1) $\cdot 10^{-7}$ г/л для второго блока НВАЭС за счет KOH и менее $4 \cdot 10^{-6}$ г/л за счет H_3BO_3 .

В результате реакции ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ ($\sigma'_{\text{терм}} = 3840$ б) в теплоносителе образуется значительное количество лития (расчет, например, для второго блока НВАЭС дает за кампанию 884 ± 80 г). Однако сорбция на фильтрах системы очистки [9] и разбавление за счет протечек приводит к снижению его концентрации в воде первого контура примерно в 10 раз — до уровня $(4 \div 5) \cdot 10^{-4}$ г/л. Если ввести эффективность очистки теплоносителя от лития за счет сорбции ($\epsilon'_{\text{оч}}$) и протечек ($\epsilon'_{\text{пр}}$) как отношение концентраций в подпиточной и исходной воде, то концентрация лития в момент времени t (с уче-

том расхода теплоносителя на протечки $v_{\text{пр}}$ и очистку $v_{\text{оч}}$) будет равна

$$C_{\text{Li}} = \frac{\int_0^\infty \varphi(E) \sigma'_B(E) dE \mu_{\text{ж}} N_0 V_a}{A_B V \beta_2} \times$$

$$\times \left[v_B t + \left(C_B^0 - \frac{v_B}{\beta_2} \right) (1 - e^{-\beta_2 t}) \right] \text{ атом/л,} \quad (5)$$

где β_2 — коэффициент очистки от лития:

$$\beta_2 = [1 - (\epsilon'_{\text{оч}}) v_{\text{оч}} + (1 - \epsilon'_{\text{пр}}) v_{\text{пр}}] / V_K. \quad (6)$$

Тогда скорость образования трития

$$P_{3\text{H}} = \frac{4,18 \cdot 10^{-15}}{A_{\text{Li}}} \int_0^\infty \varphi(E) \sigma_{\text{Li}}(E) dE V_a N_a C_{\text{Li}} \text{ Ки/сут.} \quad (7)$$

Например, для второго блока НВАЭС получим суммарное количество трития за кампанию 7,4 и 2,4 Ки за счет реакции ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}(n, n\alpha){}^3\text{H}$ для коэффициентов очистки $\beta = 10^{-6}$ и 4×10^{-2} сут $^{-1}$ соответственно, что значительно ниже выхода по реакции ${}^{10}\text{B}(n, 2\alpha){}^3\text{H}$. На рис. 2 приведены рассчитанные по выражению (5) зависимости концентрации лития в теплоносителе, экспериментальные данные измеренных концентрации лития [5] и скорости образования трития по реакции ${}^7\text{Li}(n, n\alpha){}^3\text{H}$ для различных β_2 . Из этих данных видно, что кривые 5—7, соответствующие коэффициентам очистки $\beta_2 = (2 \div 4) \cdot 10^{-2}$ сут $^{-1}$, наиболее хорошо описывают экспериментальные результаты.

Количество лития, попадающего в теплоноситель с химическими реактивами (KOH и H_3BO_3), оказалось значительно меньше (чем образующегося по реакции на ${}^{10}\text{B}$), однако более высокое сечение ($\sigma_{\text{терм}} = 943$ б) реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ на термальных нейтронах приводит к соизмеримому с ${}^7\text{Li}$ вкладу ${}^6\text{Li}$ в скорость образования трития в начале кампании, равному $4,3 \cdot 10^{-4}$ Ки/сут (от KOH) и менее $6 \cdot 10^{-3}$ Ки/сут (от H_3BO_3) для естественной концентрации ${}^6\text{Li}$ в литии.

Если считать постоянным соотношение между изотопами лития в течение кампании, то оценка верхнего предела суммарного количества трития от радиогенного и примесного лития будет равна 5 ± 2 Ки для $\beta_2 = 4 \cdot 10^{-2}$ сут $^{-1}$. Однако количество примесей в химических реактивах может колебаться в широких пределах, что должно учитываться в каждом конкретном случае.

Реакции в топливе. По данным [4], подтвержденным нашими расчетами, выход трития из топлива за счет реакции тройного деления ${}^{235}\text{U}$

составляет $1,2 \cdot 10^{-2}$ Ки/[МВт (т.)·сут], что соответствует скоростям образования 9,1; 15,6; 16,3 Ки/сут для первого — четвертого блоков НВАЭС (тепловая мощность 760, 1320, 1375 МВт).

Выход трития в теплоноситель из твэлов составляет только $\sim 0,1\%$ накопившегося в твэлах (по оценке [3]), что обусловлено высокой сорбционной способностью циркониевых оболочек к водороду. Экспериментальным подтверждением этого является низкая $[(3 \div 5) \cdot 10^{-6}$ Ки/л] концентрация трития в теплоносителе первого блока НВАЭС, в котором отсутствует борное регулирование. Это указывает на незначительный выход трития и из стержней СУЗ. Очевидно, определяющий вклад в накопление трития в теплоносителе дает реакция $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ на борной кислоте.

В таком случае решение уравнения (1) имеет вид

$$C_{\text{т}} = C_{\text{т}}^0 e^{-(\lambda + \beta_1)t} + \frac{1,95 \cdot 10^{-4} W}{(\lambda + \beta_1) V_{\text{к}}} \times \\ \times \left[v_{\text{вт}} + \left(C_{\text{в}}^0 - \frac{v_{\text{в}}}{\lambda + \beta_1} \right) (1 - e^{-(\lambda + \beta_1)t}) \right] \text{ Ки/л, (8)}$$

где $C_{\text{т}}$ — концентрация трития в теплоносителе в начале кампании;

$$\beta_1 = \frac{1}{V_{\text{к}}} [v_{\text{пр}} (1 - \varepsilon_{\text{пр}}) + v_{\text{оч}} (1 - \varepsilon_{\text{оч}}) + v_{\text{газ}}] \quad (9)$$

коэффициент «очистки» от трития. Концентрацию трития в воде первого контура измеряли методом жидких сцинтилляторов после очистки исходных проб дистилляцией.

На рис. 3 приведены результаты расчетов по формуле (8) с учетом изменений мощности реактора при запуске и экспериментальные данные для второго блока, откуда видно, что концентрация трития вначале увеличивается, затем достигает $\sim 10^{-4}$ Ки/л и в конце кампании спадает до первоначального уровня $(1,5 \div 2) \cdot 10^{-5}$ Ки/л. Наиболее подходящий коэффициент очистки от трития $2,7 \cdot 10^{-2}$ сут $^{-1}$, что находится в хорошем соответствии с данными по водообмену первого контура. Некоторое превышение экспериментальных результатов над расчетом в конце кампании вызвано ростом концентрации трития в подпиточных водах, в качестве которых используется смесь дистиллята теплоносителя с дебалансными водами.

Таким образом, результаты расчетов и экспериментов позволяют сделать следующие выводы.

1. Основным источником накопления трития в теплоносителе реакторов с борным регулиро-

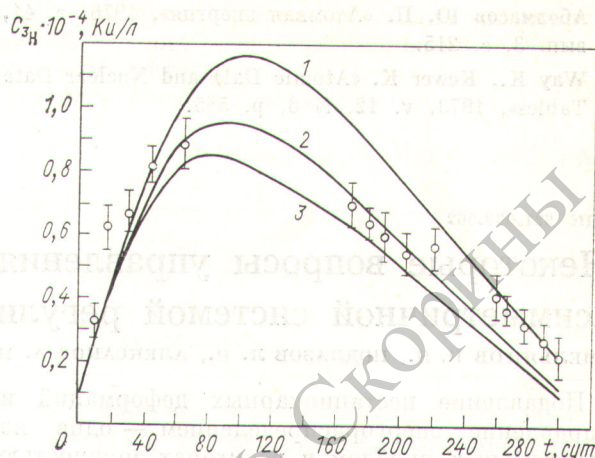


Рис. 3. Зависимость концентрации трития по реакции $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ для коэффициентов очистки $\beta_1 = 2,2 \cdot 10^{-2}$; $2,7 \cdot 10^{-2}$; $3 \cdot 10^{-2}$ (1—3) в первом контуре второго блока НВАЭС (○ — эксперимент)

ванием является реакция $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ на борной кислоте, дающая за кампанию 90—140 и 170—240 Ки для второго и четвертого блоков НВАЭС при номинальной мощности (95%-ная достоверная вероятность).

2. Вклад от реакций на ^6Li , на ^7Li , тройного деления и на ^{10}B (в стержнях СУЗ) в общую тритиевую активность теплоносителя составляет $15 \pm 8\%$ при 95%-ной достоверной вероятности. Однако вклад может быть и выше при увеличении примесей ^6Li .

3. Изучение динамики накопления трития от времени в теплоносителе показывает, что максимальная концентрация $\sim 10^{-4}$ Ки/л достигается через три месяца после начала кампании. Изменение концентрации трития в теплоносителе удовлетворительно описывается уравнениями с учетом водообмена первого контура. Коэффициент очистки от трития за счет разбавления теплоносителя второго блока НВАЭС подпиточными водами составляет $(2,2 \div 3,0) \cdot 10^{-2}$ сут $^{-1}$ при 95%-ной достоверной вероятности.

Поступила в Редакцию 30.1.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геденов Л. И., Трусов А. Г., «Атомная техника за рубежом», 1973, № 12, с. 22.
2. Юзгин В. С., Явелов Б. Е. Там же, № 10, с. 22.
3. Langecker K., Graupe H. «Kernenergie», 1972, Bd 15, N 5, S. 165.
4. Ray I. «Reactor and Fuel Proc. Techn.», 1968, v. 12, N 1, p. 19.
5. Аболмасов Ю. П., Голубчикова И. Г., Самойлова Т. А. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 1, с. 52.

6. Аболмасов Ю. П. «Атомная энергия», 1976, т. 41, вып. 3, с. 215.
7. Way K., Kewer K. «Atomic Data and Nuclear Data Tables», 1973, v. 12, N 6, p. 585.
8. Ломакин О. С. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 1, с. 34.
9. Плотников И. М. и др. В кн.: Десятилетний опыт эксплуатации Нововоронежской АЭС. Нововоронеж, 1974, с. 132.

УДК 621.039.562

Некоторые вопросы управления ядерным реактором асимметричной системой регулирования

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ПОДЛАЗОВ Л. Н., АЛЕКСАНДРОВ А. Н., ПАНИН В. М.

Подавление нестационарных деформаций и управление энергораспределением — одна из центральных проблем в реакторах мощностью ~1000 Мвт (эл.) [1]. Наиболее широко распространены метод решения задач управления, основанный на принципе локального регулирования [2].

В теоретическом плане исследуются системы управления, основанные на изменении пространственно-динамических свойств энергораспределения за счет введения так называемых асимметричных внешних обратных связей [3—5]. Таким способом обеспечивается устойчивость энергораспределения, которое в отсутствие внешних обратных связей существенно неустойчиво [4]. При этом необходимое количество обратных связей определяется не степенью неустойчивости объекта, а пространственной размерностью задачи (например, для стабилизации неустойчивой одномерной модели реактора достаточно одной асимметричной обратной связи). Основная цель данной работы — исследование практических аспектов действия асимметричного регулятора и его отличие от локального принципа регулирования.

Асимметричная система регулирования

В основу исследования положена одномерная модель пространственной нейтронной кинетики с единственной внутренней мощностью обратной связью k_{oc} , описанной дифференциальным уравнением первого порядка. Стационарное энергораспределение дано в виде

$$\Phi_0(x) = \text{const}, \quad 0 \leq x \leq 1.$$

Для выявления общих закономерностей и упрощения задачи рассмотрим случай, когда постоянная времени обратной связи намного больше постоянных времени запаздывающих нейтронов. Уравнения динамики для отклонений

переменных имеют вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + k_{oc} + k_p = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial k_{oc}}{\partial t} = \kappa_{oc} \varphi - k_{oc}, \quad (2)$$

где k_p учитывает регулирующее воздействие. За единицу времени принимается постоянная времени обратной связи. В качестве управляющего воздействия для асимметричного регулятора берется отклонение нейтронного потока в точке, не совпадающей с местом расположения регулирующего стержня. Предполагая, что постоянная времени системы регулирования пренебрежимо мала по сравнению с временем развития неустойчивости, запишем уравнение для k_p в виде

$$k_p = -\alpha_1 \delta(x - x_1) \varphi |_{x=x_2}, \quad (3)$$

где $\alpha_1 > 0$ — коэффициент передачи регулятора; x_1 — точка приложения регулирующего воздействия; x_2 — месторасположение датчика системы.

Используя преобразования Лапласа, уравнение (1) с учетом (2) и (3) можно записать в виде

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\kappa_{oc}}{s+1} \varphi - \alpha_1 \delta(x - x_1) \varphi |_{x=x_2} = 0. \quad (4)$$

Используя разложение $\varphi(x, s) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{2} A_i(s) \times \cos(i\pi x)$, получим следующую систему уравнений:

$$\left[(i\pi)^2 - \frac{\kappa_{oc}}{s+1} \right] A_i + \frac{2\alpha_1}{\gamma_i} \cos(i\pi x_1) \cdot \sum_{j=0}^{\infty} A_j' \cos(j\pi x_2) = 0, \quad (5)$$

где $\gamma_k = \begin{cases} 2, & \text{если } k=0; \\ 1, & \text{если } k \neq 0. \end{cases}$