

## ОЦЕНКА ВКЛАДА РЕАКЦИИ ( $\alpha, n$ ) В НЕЙТРОННУЮ АКТИВНОСТЬ ОТРАБОТАВШЕЙ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

**И.В. Шаманин\*, М.Е. Силаев\*, С.В. Беденко\*, В.В. Мартынов\*\***

*\*Томский политехнический университет, г. Томск*

*\*\*ФГУП Горно-химический комбинат, г. Железногорск*



Рассмотрена совокупность всех ядерных процессов, протекание которых приводит к образованию поля нейтронного излучения вблизи ОТВС. Определена результирующая удельная нейтронная активность отработанного топлива ВВЭР-1000, обусловленная протеканием ( $\alpha, n$ )-реакцией, спонтанным делением ядер урана и трансурановых элементов. Проведена оценка вкладов ( $\alpha, n$ )-реакции в результирующую удельную нейтронную активность ОТВС ВВЭР-1000 в зависимости от глубины выгорания ядерного топлива.

### СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

При обращении с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) для обеспечения радиационной безопасности, в первую очередь, решаются задачи защиты от потоков высокоэнергетических гамма-квантов, характеризующихся высокой проникающей способностью и интенсивностью. Защита от гамма-излучения ОЯТ автоматически обеспечивает требования защиты от бета- и альфа-излучений, так указанные виды ионизирующих излучений обладают гораздо меньшей проникающей способностью. Этого нельзя сказать о нейтронном излучении (особенно в отношении быстрых нейтронов), для которого материалы, используемые при конструировании защиты от гамма-излучения, фактически являются «прозрачными» [1]. Поэтому, несмотря на то, что интенсивность нейтронного излучения отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) реакторов, работающих на тепловых нейтронах, сравнительно невысока [2], вопросы обеспечения радиационной безопасности в отношении этого вида излучения должны решаться в качестве самостоятельной задачи.

Транспортные контейнеры (ТК), предназначенные для перевозки ОТВС ВВЭР-1000 и используемые для этих целей в настоящее время, были спроектированы для размещения в них ОЯТ, характеризующегося значениями глубины выгорания до 40 МВт-сут/кг [3]. В последние годы эти значения существенно возросли, и в перспективе будут продолжать увеличиваться. Увеличение глубины выгорания при фиксированном значении начального обогащения топлива вызывает рост активности ОЯТ. Возможности ТК обеспечить защиту от составляющей, обусловленной

---

© И.В. Шаманин, М.Е. Силаев, С.В. Беденко, В.В. Мартынов, 2007

гамма-излучением, для ОТВС с повышенным уровнем выгорания пока не вызывают сомнений, т.к. согласно действовавшим нормативным требованиям [4] их проектирование выполнялось с коэффициентом запаса по защите от ионизирующего излучения, равным 2. Под вопросом оказываются возможности ТК серийной конструкции в части обеспечения защиты от нейтронного излучения, поле которого вблизи ОТВС также изменяет свои характеристики в зависимости от глубины выгорания топлива. Поэтому изучение вопроса защиты от нейтронного излучения ОТВС с возросшей глубиной выгорания представляет значительный практический интерес. Для выполнения подобных расчетов особенно важным представляется определение вклада реакции  $(\alpha, n)$ , поскольку концентрация различных альфа-излучателей, образующихся в ОТВС в ходе кампании, находится в непосредственной зависимости от глубины выгорания ядерного материала.

Вклад  $(\alpha, n)$ -реакции в интенсивность нейтронного излучения двуокиси плутония определен, например, в работе [5]. В этой и подобных работах рассматривается протекание реакции  $(\alpha, n)$  на ядрах кислорода. Считается, что альфа-частицы образуются при радиоактивном распаде  $^{239}\text{Pu}$ . В случае ОЯТ перечень актиноидов, испытывающих альфа-распад, более обширен и не ограничен одним лишь  $^{239}\text{Pu}$  или  $^{238}\text{U}$ , что существенно изменяет условия задачи по сравнению с необлученным диоксидом урана или плутония. Целью данной работы являлось проведение оценок вкладов  $(\alpha, n)$ -реакции в интенсивность нейтронного излучения ОТВС ВВЭР-1000 для различных глубин выгорания с учетом всех возможных механизмов образования нейтронов.

### ИСТОЧНИКИ ОБРАЗОВАНИЯ НЕЙТРОНОВ В ОТВС

Для того, чтобы оценить вклад реакции  $(\alpha, n)$  в нейтронную активность ОТВС, необходимо провести оценку результирующей активности, обусловленной протеканием совокупности всех ядерных процессов в отработавшем ядерном материале.

Нейтроны образуются в ОЯТ благодаря протеканию следующих ядерных реакций.

1). Реакция  $(\gamma, n)$  – пороговая. Для образования нейтронов по этому механизму необходимо наличие гамма-излучения высоких энергий (от 4 до 14 МэВ [6]). Источниками гамма-излучения в ОЯТ являются процессы бета-распада продуктов деления и активации, а также альфа-распада и спонтанного деления ядер урана и образующихся в ходе облучения изотопов трансурановых элементов.

2). Реакция  $(\alpha, n)$  – пороговая. Обусловлена наличием альфа-частиц, образующихся в результате радиоактивного распада ядер урана и трансурановых элементов, присутствующих в ОЯТ. Энергия альфа-частиц, согласно данным [7], лежит в пределах от 4 до 7 МэВ (среднее значение 5,13 МэВ). Альфа-частицы таких энергий способны эффективно взаимодействовать с ядрами, высота кулоновского барьера которых меньше, чем кинетическая энергия альфа-частиц. Из материалов, присутствующих в ОТВС, наиболее вероятно протекание реакции  $(\alpha, n)$  на ядрах кислорода и других легких ядрах-продуктах деления, присутствующих в ОЯТ [8].

3). Спонтанное деление ядер урана и трансурановых элементов, сопровождающееся испусканием нейтронов. Основным источником нейтронов будут являться ядра урана и изотопов трансурановых элементов содержащихся в ОЯТ.

### ОБРАЗОВАНИЕ НЕЙТРОНОВ В ОТВС ПРИ ПРОТЕКАНИИ $(\gamma, n)$ -РЕАКЦИИ

Для большинства ядер пороги фотонейтронных реакций заключены в пределах от 4 до 14 МэВ. Для легких и средних ядер с  $10 \leq A \leq 150$ , присутствующих в ОТВС наиболее вероятно протекание  $(\gamma, n)$ -реакции только на ядрах кислорода,

имеющих сравнительно большую концентрацию в отработавшем топливе [8]. Порог реакции  $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{C}$  равен 16,3 МэВ [8]. Для тяжелых материалов наиболее вероятно протекание  $(\gamma, n)$  реакции на ядрах с  $A \geq 200$  [1, 9]. Порог реакции  $(\gamma, n)$  для этих ядер заключен в пределах от 4 до 7 МэВ [9].

Анализ данных о гамма-излучении, сопутствующем процессам альфа- и бета-распада продуктов деления и активации, присутствующих в ОЯТ, позволяет сделать заключение, что в их спектре практически отсутствует высокоэнергетическая составляющая, превышающая порог реакции на ядрах кислорода и тяжелых ядрах [6, 7].

При спонтанном делении на долю гамма-излучения приходится 7–9 МэВ на один акт деления. Эта энергия уносится обычно в виде 8–10 гамма-квантов. Поэтому на один гамма-квант, в среднем, приходится не более 1 МэВ, что ниже порогов образования нейтронов в  $(\gamma, n)$  реакции для всех указанных ядер. Учитывая низкую (не более 0,4% [10]) вероятность образования гамма-квантов высоких энергий при спонтанном делении тяжелых ядер, можно пренебречь вторичным образованием нейтронов по этому механизму для всех видов нуклидов, содержащихся в ОЯТ.

### ОБРАЗОВАНИЕ НЕЙТРОНОВ В ОТВС ПРИ СПОНТАННОМ ДЕЛЕНИИ ЯДЕР

Спонтанное деление характеризуется числом мгновенных нейтронов на один акт деления  $\nu$  и средней энергией нейтронов деления  $\bar{E}$ . Основные характеристики нейтронов спонтанного деления (такие как  $\nu$ ,  $\bar{E}$ , интенсивность распада ядерного материала) приведены, например, в [1]. Расчет  $(\nu, \bar{E})$  может быть также выполнен с использованием полуэмпирических соотношений, представленных в работе Ковалева и Ставинского [11].

Удельная интенсивность генерации нейтронов при спонтанном делении ядер урана и трансурановых элементов, присутствующих в ОТВС, в общем виде определяется соотношением:

$$Q_{\text{cn}}(Z) = \sum_{i=1}^n C_i(Z) \cdot A_i^{\text{cn}} \cdot \nu_i^{\text{cn}}, \text{ нейтр./}(с \cdot \text{т(топлива)})), \quad (1)$$

где  $C_i(Z)$  – концентрация  $i$ -го спонтанно делящегося материала, г/т;  $A_i^{\text{cn}}$  – интенсивность распада ядер  $i$ -го ядерного материала при спонтанном делении, дел./(г·с);  $\nu_i^{\text{cn}}$  – число мгновенных нейтронов, которые образуются в одном акте спонтанного деления ядер  $i$ -го ядерного материала, нейтр.;  $Z$  – глубина выгорания ядерного топлива, МВт·сут/т(топлива).

Для определения зависимостей концентраций спонтанно делящихся ядерных материалов  $C_i(Z)$ , содержащихся в ОЯТ, от глубины выгорания, были использованы данные о концентрациях основных долгоживущих актиноидов в отработавшем топливе ВВЭР-1000, приведенных в [12]. Зависимости  $C_i(Z)$  были получены путем аппроксимации указанных данных с помощью полиномов второй степени, степенных и показательных функций. В результате для каждого актиноида (из присутствующих в ОЯТ после 180 сут выдержки) были получены функции, которые имеют различную степень сходимости с приведенными в [12] данными. Примеры таких зависимостей показаны на рис. 1, 2.

В результате анализа сходимости функциональных зависимостей для отдельных делящихся материалов была получена результирующая формула, описывающая с погрешностью, не превышающей 12%, интенсивность генерации спонтанных нейтронов в ОЯТ ВВЭР-1000 в зависимости от глубины выгорания топлива:

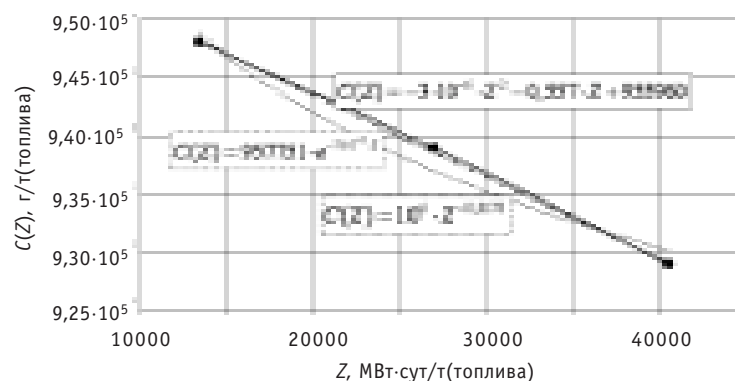


Рис. 1. Зависимость концентрации U-238 от выгорания ядерного топлива с начальным обогащением 4,4%: ● – данные о концентрациях U-238, приведенные в [12]; ..... – степенная аппроксимация; - - - - - экспоненциальная аппроксимация; ——— – полиномиальная аппроксимация

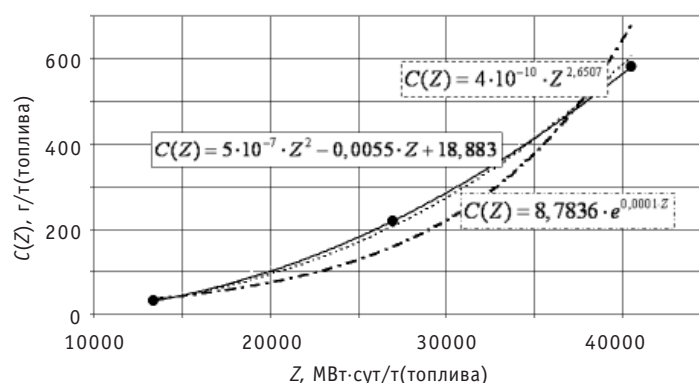


Рис. 2. Зависимость концентрации Pu-242 от выгорания ядерного топлива с начальным обогащением 4,4%: ● – данные о концентрациях Pu-242, приведенные в [12]; ..... – степенная аппроксимация; - - - - - экспоненциальная аппроксимация; ——— – полиномиальная аппроксимация

$$Q_{\text{сп}}(Z) = 7729786,73 - 1966,57 \cdot Z + 0,12 \cdot Z^2 + 0,18 \cdot 10^{-6} Z^{2,6677} + \\ + 0,98 \cdot 10^{-19} Z^{4,5071} + 0,23 \cdot 10^{-13} Z^{4,8479} + 0,89 \cdot 10^{-26} Z^{7,026} + \\ + 0,41 \cdot 10^{-39} Z^{9,3981}, \text{ нейтр./с} \cdot \text{т(топлива)}. \quad (2)$$

Согласно использованным данным, формула (2) справедлива в интервале глубин выгорания от 13420 до 40480 МВт·сут/(т(топлива)) (для времени выдержки ОТВС 180 сут) при начальном обогащении 4,4%. Возможно также проведение экстраполяции в область меньших и больших значений глубины выгорания топлива, однако точность таких вычислений не является определенной в связи с отсутствием экспериментальных данных.

### ОБРАЗОВАНИЕ НЕЙТРОНОВ В ОТВС ПРИ ПРОТЕКАНИИ ( $\alpha$ , n)-РЕАКЦИИ

Потенциально протекание реакции ( $\alpha$ , n) возможно на всех ядрах, присутствующих в ОТВС. Наиболее эффективно данная реакция будет идти на ядрах с высотой кулоновского барьера меньше, чем кинетическая энергия альфа-частиц.

Для легких ядер с  $10 \leq A \leq 50$  величина кулоновского барьера изменяется от 2 до 10 МэВ; для средних ядер с  $50 \leq A \leq 150$  – от 10 до 15 МэВ; для тяжелых ядер с  $150 \leq A \leq 250$  – от 15 до 25 МэВ [13]. Средние и тяжелые ядра имеют высокий кулоновский барьер, величина которого значительно превышает кинетическую энергию  $\alpha$ -частиц, имеющих в ОТВС, с наибольшей энергией  $E_{\alpha}(^{242}\text{Cm}) = 6,13$  МэВ

[7]. Сечение реакции  $(\alpha, n)$  на тяжелых ядрах мало [9].

Из легких ядер в ОТВС в значительных концентрациях присутствует только кислород. Кулоновский барьер для ядер кислорода не превышает 4 МэВ [13].

Таким образом, основным источником образования нейтронов в результате протекания реакции  $(\alpha, n)$  в ОТВС будет являться кислород.

### СЕЧЕНИЕ $(\alpha, n)$ -РЕАКЦИИ НА ЯДРАХ КИСЛОРОДА

Существует несколько подходов определения сечения ядерных реакций [14], два из которых приведены ниже.

Первый подход состоит в следующем. Механизм образования составного ядра и последующий его распад можно описать при помощи сечения реакции, которое записывается следующим образом [14]:

$$\sigma_{ip} = \sigma_i(c) \cdot \frac{\Gamma_p}{\Gamma} = \pi \lambda_i^2 \sum_{l=0}^{l_c} (2l+1) \xi \frac{\Gamma_p}{\Gamma}, \quad (3)$$

где  $\sigma_i(c) = \pi \lambda_i^2 \sum_{l=0}^{l_c} (2l+1) \xi$  – сечение образования составного ядра;  $\eta_p = \Gamma_p / \Gamma$  – вероятность распада этого ядра с испусканием частицы  $p$ ;  $\Gamma_p$  – парциальная полуширина резонансного уровня, отвечающая испусканию частицы  $p$ ;  $\Gamma$  – полуширина резонансного уровня на половине его высоты;  $\lambda$  – длина волны налетающей частицы;  $l$  – орбитальный момент количества движения налетающей частицы;  $\xi$  – коэффициент прилипания, который (в общем случае) определяется прозрачностью центробежного, ядерного и кулоновского барьеров.

Значение сечения реакции  $(\alpha, n)$  для ядер кислорода в доступных источниках информации найдено не было. Для его расчета необходимо знать вероятность распада составного ядра  $\eta_p$ . Для определения вероятности распада составного ядра  $\eta_p$  необходимы значения полной  $\Gamma$  и парциальной  $\Gamma_p$  ширин резонансного уровня. Расчет полной и парциальной ширин какого-либо резонанса является достаточно сложной задачей, решаемой квантово-механическими методами и связанной с определением квантовой структуры резонансных уровней [14]. Было предложено оценить величину  $\eta_p$  для кислорода с помощью следующего приближенного подхода:

- вероятность распада оценивается для изотопов с экспериментально определенными значениями сечения реакций  $(\alpha, n)$ ;
- в отношении кислорода величина вероятности распада определяется путем линейной интерполяции зависимости  $\eta_p$  от атомного веса.

Согласно данным о сечениях реакций  $(\alpha, n)$ , для легких ядер ( $N, P$ ), приведенным в [8, 14], при энергии альфа-частиц от 4 до 7 МэВ вероятность распада составного ядра составляет величину порядка  $10^{-3}$ . Поэтому для расчета полного сечения взаимодействия на кислороде вероятность распада составного ядра была принята равной  $10^{-3}$ . Расчетное значение полного сечения взаимодействия  $\alpha$ -частиц с ядрами кислорода, таким образом, составляет величину около 0,2 мбарн.

Второй подход основан на использовании экспериментальных данных о выходах ядерных реакций, приведенных, например, в [14, 15]. Выход ядерной реакции  $Y(E)$  является функцией сечения  $\sigma(E)$  и удельной ионизации атомов мишени частицей  $dE/dx$ . Согласно [15]:

$$Y(E) = n \int_0^E \frac{\sigma(E) dE}{\left| \frac{dE}{dx} \right|}. \quad (4)$$

Тогда можно записать

$$\sigma(E) = \frac{1}{n} \cdot \frac{dY}{dE} \cdot \left| \frac{dE}{dx} \right|. \quad (5)$$

Расчетное значение сечения  $(\alpha, n)$  реакции, полученное с помощью (5), составляет 0,25 мбарн.

Найденные двумя способами значения сечений удовлетворительно согласуются между собой. Однако в оценке, сделанной по первому методу, вероятность распада составного ядра была определена с точностью до порядка величины. Поэтому для расчета удельной нейтронной активности ОТВС далее использовался результат расчета сечения  $(\alpha, n)$  реакции, полученный с помощью второго подхода.

### УДЕЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ АКТИВНОСТЬ ОТВС, ОБУСЛОВЛЕННАЯ РЕАКЦИЕЙ $(\alpha, n)$

Удельная интенсивность генерации нейтронов в результате реакции  $(\alpha, n)$  будет определяться из соотношения:

$$A_{\nu, n}(Z) = \Sigma(\alpha, n) \cdot v_{\alpha} \cdot \frac{l \cdot A_{\alpha}(Z)}{V_{\text{топ}}}, \text{ нейтр./}(\text{см}^3 \cdot \text{с}), \quad (6)$$

где  $\Sigma(\alpha, n)$  – макроскопическое сечение реакции  $(\alpha, n)$  на ядрах кислорода,  $\text{см}^{-1}$ ;  $v_{\alpha}$  – скорость альфа-частиц,  $\text{см/с}$ ;  $l$  – среднее время жизни альфа-частиц в ОЯТ,  $\text{с}$ ;  $A_{\alpha}(Z)$  – альфа-активность,  $\text{с}^{-1}$ ;  $V_{\text{топ}}$  – объем, занимаемый топливом,  $\text{см}^3$ .

В результате аппроксимации данных, приведенных в [12], установлено, что удельная альфа-активность ОЯТ в зависимости от выгорания топлива может быть определена как

$$Q_{\alpha}(Z) = 81,77 \cdot Z^{2,8442}, 1/(\text{с} \cdot \text{т(топлива)}), \quad (7)$$

где  $Z$  – выгорание топлива,  $\text{МВт} \cdot \text{сут}/(\text{т(топлива)})$ .

Соотношение (7) для удельной альфа-активности с погрешностью не хуже 5% описывает данные, приведенные в [12]. Из (6) и (7) можно определить значение удельной нейтронной активности ОТВС, обусловленной протеканием  $(\alpha, n)$ -реакций на ядрах кислорода:

$$A_{\alpha, n} = 15,17 \cdot 10^{-6} \cdot Z^{2,8442}, \text{ нейтр./}(\text{с} \cdot \text{т(топлива)}). \quad (8)$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчета удельной нейтронной активности ОТВС приведены в табл. 1 и на рис. 3. В таблице приведены также значения доли активности, обусловленной протеканием реакций  $(\alpha, n)$ , в результирующую удельную нейтронную активность ОЯТ.

### ВЫВОДЫ

Основными источниками формирования удельной результирующей нейтронной активности ОТВС являются реакция  $(\alpha, n)$  на ядрах кислорода, нейтроны спонтанного деления ядер урана и трансурановых элементов. Образование нейтронов за счет протекания реакции  $(\gamma, n)$  может не учитываться.

При больших глубинах выгорания основной вклад в нейтронную активность ОТВС обеспечивается за счет спонтанного деления ядер урана и трансурановых элементов, содержащихся в ОЯТ после 180 сут выдержки.

Вклад  $(\alpha, n)$  реакции в результирующую удельную нейтронную активность ОЯТ изменяется от 61 до 24% при глубинах выгорания топлива ВВЭР-1000 от 13420 до 40480  $\text{МВт} \cdot \text{сут}/(\text{т(топлива)})$  и начальном обогащении 4,4%.

Таблица 1

**Нейтронная активность отработавшего ядерного топлива**

$Q_{\alpha n}(Z)$ , нейтр./с-т(топлива)	$A_{\alpha n}(Z)$ , нейтр./с-т(топлива)	$Q_z(Z)$ , нейтр./с-т(топлива)	$Z$ , МВт-сут/т(топлива)	Вклад ( $\alpha, n$ ) реакции, %
$4,48 \cdot 10^6$	$7,62 \cdot 10^6$	$1,21 \cdot 10^7$	13000	63
$9,30 \cdot 10^6$	$1,14 \cdot 10^7$	$2,07 \cdot 10^7$	15000	55
$1,64 \cdot 10^7$	$1,63 \cdot 10^7$	$3,28 \cdot 10^7$	17000	50
$2,65 \cdot 10^7$	$2,24 \cdot 10^7$	$4,89 \cdot 10^7$	19000	46
$4,01 \cdot 10^7$	$2,98 \cdot 10^7$	$6,99 \cdot 10^7$	21000	43
$5,82 \cdot 10^7$	$3,86 \cdot 10^7$	$9,68 \cdot 10^7$	23000	40
$8,19 \cdot 10^7$	$4,89 \cdot 10^7$	$1,31 \cdot 10^8$	25000	37
$1,12 \cdot 10^8$	$6,09 \cdot 10^7$	$1,73 \cdot 10^8$	27000	35
$1,51 \cdot 10^8$	$7,46 \cdot 10^7$	$2,25 \cdot 10^8$	29000	33
$1,99 \cdot 10^8$	$9,02 \cdot 10^7$	$2,89 \cdot 10^8$	31000	31
$2,59 \cdot 10^8$	$1,08 \cdot 10^8$	$3,67 \cdot 10^8$	33000	29
$3,33 \cdot 10^8$	$1,27 \cdot 10^8$	$4,60 \cdot 10^8$	35000	28
$4,23 \cdot 10^8$	$1,49 \cdot 10^8$	$5,72 \cdot 10^8$	37000	26
$5,31 \cdot 10^8$	$1,73 \cdot 10^8$	$7,05 \cdot 10^8$	39000	25
$5,93 \cdot 10^8$	$1,86 \cdot 10^8$	$7,80 \cdot 10^8$	40000	24

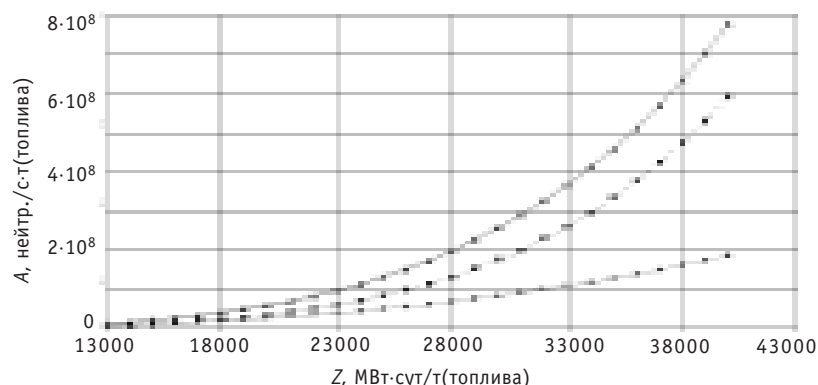


Рис. 3. Нейтронная активность отработавшего ядерного топлива:  $\blacklozenge$  – удельная нейтронная активность, обусловленная протеканием реакций ( $\alpha, n$ ) на ядрах кислорода;  $\blacksquare$  – удельная нейтронная активность, обусловленная спонтанным делением ядер урана и актиноидов, присутствующих в ОТВС;  $\blacktriangle$  – результирующая нейтронная активность ОТВС

**Литература**

1. Горбачев В.М., Замятин Ю.С., Лбов А.А. Взаимодействие излучения с ядрами тяжелых элементов и деление ядер: Справочник. – М.: Атомиздат, 1976. – 464 с.
2. Горохов А.К., Драгунов Ю.Г., Лунин Г.Л., Новиков А.Н., Цофин В.И., Ананьев Ю.А. Обоснование нейтронно-физической и радиационной частей проектов ВВЭР. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 496 с.
3. Коломцев Ю.В., Омельчук В.В., Пыткин Ю.Н., Андрущенко С.А., Голощапов С.Н., Попов Н.И., Авдеев В.А. Повышение эффективности топливоиспользования и совершенствование систем обращения с ядерным материалом на АЭС с ВВЭР-440. – СПб., 2000. – 232 с.
4. Санитарные правила СП 2.6.1.799-99. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99)/Гигиенические нормативы. – М.: Центр санитарно-эпидеми-



ологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 2000.

5. Дулин В.В., Забродская С.А. О вкладе (а, п) реакции в интенсивность нейтронного излучения двуокиси плутония//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – №4.

6. Стародубцев С.В. Полное собрание научных трудов (в 6-ти т.) (Ред. коллегия: Б.П. Константинов председатель). Отв. ред. тома чл.-корр. АН УЗССР Б. Бегжанов). Т.3. Кн. 3.: «Фан», 1971 – 472 с.

7. Схемы распадов радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения: Публикация 38 МКРЗ: Ч. 2. Кн. 1 (пер. с англ.). – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 432 с.

8 Таблицы физических величин: справочник/ Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006с.

9. Справочник по ядерной физике (пер. с англ.)/Под ред. Л.А. Арцимовича. – М.: Физматгиз, 1963. – 632 с.

10. Глушков Е.С., Демин В.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Хрулев А.А. Тепловыделение в ядерном реакторе/Под ред. Н.Н. Пономарева-Степного. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 160 с.

11. Ковалев В.П., Ставинский В.С. //ЖЭТФ. – 1961. – 41, 1304.

12. Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Ружанский П.А., Сидоренко В.Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник. – М.: Энергоатомиздат. 1983. – 384с.

13. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. – Киев: Наукова думка, 1975. – 415 с.

14. Сегре Э. Экспериментальная ядерная физика. – Т. 2. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. – 493 с.

15. Гордеев И.В., Кардашев Д.А, Малышев А.В. Ядерно-физические константы: Справочник (2-е изд.). – М.: Госатомиздат, 1963. – 507с.

Поступила в редакцию 13.12.2006



enrichment process. These difficulties can become practically insuperable depending on  $^{232}\text{U}$  concentration.

#### **УДК 621.039.54**

*Exploring of Non-Wasted Fuel Cycle of the Ball-Poured Core of the Sodium-Cooled Fast Reactor* \ G.B. Usynin, A.A. Kravchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References – 4 titles.

The calculation of the non-wasted fuel cycle of the ball-poured fast reactor is presented. This fuel cycle contains two types of the reprocessing of the fuel – full and particular. By the full reprocessing pyroprocessing and other chemical operations are used. By the particular reprocessing, only physical and mechanical, and the part of the gas and flying fusion products are extracted.

#### **УДК 621.039.543.6**

*The Input of an  $(\alpha, n)$  Reaction Estimation to an Integral Neutron Intensities of WWER-1000 Spent Fuel* \ I.V. Shamanin, M.E. Silaev, S.V. Bedenko, V.V. Martynov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages, 1 table, 3 illustrations. – References – 15 titles.

All nuclear processes resulting to neutron generation within a spent fuel are examined. Total neutron intensity per weight unit of WWER-1000 spent fuel caused by  $(\alpha, n)$  reactions and spontaneous fissions of uranium and transuranium nucleus proceeding were determined. Inputs of  $(\alpha, n)$  reactions to entire neutron intensity of WWER-1000 spent fuel was estimated according with his burn-up degree.

#### **УДК 621.039.553.34**

*Analysis of Possible Types of Natural Convection Flows in a Closed Circuit* \ Yu.M. Ashurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 11 pages, 7 illustrations. – References – 5 titles.

The paper is devoted to the analysis of the possible types and mechanisms of occurrence of natural convection flows of a single-phase incompressible liquid in a closed circuit. It has been shown that alongside of a common-circuit coolant natural circulation the local closed circuits of natural circulation can exist in some parts of the circuit. The conditions of occurrence of local natural circulation of the coolant in horizontal and vertical parts of the closed circuit and principles of a superposition of the common-circuit and local natural circulation are described.

#### **УДК 621.039.534**

*Experimental Research of the Processes Accompanying Emergency Receipt of Organic Connections (oil) to the Lead-Bismuth and Lead Heat-Carrier* \ A.V. Beznosov, I.V. Karatushina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 1 table, 6 illustrations.

Results of experimental and theoretical researches of the processes accompanying emergency receipt of organic connections – oil from the back sealing system of a shaft and circulating pumps bearings of lead-bismuth and lead heat-carrier power contours of nuclear reactors, thermonuclear reactors and accelerating-control systems are presented.

#### **УДК 621.039.534**

*Results of Simultaneous Dissolution of  $\text{UO}_2$  and  $\text{ZrO}_2$  by Molten Zircaloy* \ A.M. Svyatkin, V.V. Tikhomirov, V.V. Yakovlev, V.P. Smirnov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 1 table, 8 illustrations. – References – 6 titles.

Based on the experimental examination performed at RIAR rates of  $\text{ZrO}_2$  and  $\text{UO}_2$  dissolution by molten Zircaloy at 2100 and 2200°C were estimated. A high-temperature facility for specimen testing has been developed; experiments and post-testing examinations of the obtained compositions were carried out. The results were introduced into the experimental data array of the SVECHA calculation