

МЕТОД РАСЧЕТА ЧИСЛА ДЕЛЕНИЙ В РЕАКТОРЕ ВИР-2М ПО ВЫХОДУ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

С. П. Котков, С. О. Табаков, А. В. Шуркаев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Статья поступила в редакцию 06.06.2019, после доработки – 09.08.2019, принята к публикации – 04.10.2019

Описан метод расчета числа делений урана в растворном ядерном реакторе ВИР-2М за длительный период, метод основан на результатах спектроскопического анализа проб топливного раствора. Приведены результаты расчетов по данному методу за период 17 лет. Показано, что в активной зоне ядерного реактора ВИР-2М на 1 МДж выделенной энергии приходится $3,13 \cdot 10^{16}$ делений урана.

Ключевые слова: импульсный реактор, водный раствор уранилсульфата, число делений, продукты деления (ПД), ядерный распад.

A METHOD OF CALCULATING A NUMBER OF FISSIONS IN VIR-2M REACTOR BASING ON THE YIELD OF FISSION PRODUCTS / S. P. KOTKOV, S. O. TABAKOV, A. V. SHURKAEV //

There is described a method of calculating fission number of uranium in VIR-2M solution nuclear reactor during a long period based on the results of spectroscopic analysis of fuel solution samples. The results of calculations performed using this method within the period of 17 years are presented. It is demonstrated that in the core of nuclear reactor VIR-2M for one MJ of released energy there is $3.13 \cdot 10^{16}$ fissions of uranium.

Key words: pulsed reactor, water solution of uranyl sulphate, number of fissions, fission products, nuclear decay.

Введение

Водный импульсный ядерный реактор (ИЯР) ВИР-2М относится к классу аperiodических импульсных реакторов самогасящегося действия «нулевой мощности» и представляет собой растворный вариант ИЯР, отличающийся простотой изготовления и эксплуатации, а также малым количеством делящегося материала, используемого в качестве топлива (в реакторе ВИР-2М всего около 7 кг урана) [1, 2]. Особенности конструкции и эксплуатации реакторов типа ВИР [1] определяются тем, что в них ядерное топливо используется в виде раствора соли – уранилсульфата (UO_2SO_4) – в легкой воде. Топливный раствор (ТР) постоянно находится в герметичном корпусе, при-

дающем топливной композиции компактную геометрическую форму, необходимую для получения интенсивных потоков нейтронов и гамма-квантов, и способном длительное время выдерживать значительные динамические нагрузки, которые возникают при работе реактора в режиме генерации мощных импульсов. Реактор ВИР-2М может работать в двух режимах – импульсном и статическом. Одной из важнейших характеристик любого реактора является энергия, выделенная в активной зоне (АЗ) за время работы реактора на мощности. Общепринятое название такой энергии – энерговыделение. Известно, что при делении одного ядра урана выделяется энергия ~ 200 МэВ [3]. Учитывая, что 1 эВ =

$= 1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж, получается, что выделившейся энергии в 1 МДж соответствует $3,1 \cdot 10^{16}$ делений. Однако часть энергии из АЗ уносится нейтрино, нейтронами и γ -квантами (энергия, уносимая другими частицами, пренебрежимо мала). В растворных реакторах часть энергии расходуется также на образование гремучего газа (ГГ).

Важность контроля энерговыделения на ИЯУ ВИР-2М связана, прежде всего, с обеспечением безопасной работы установки, а именно с отсутствием превышения установленных норм динамических нагрузок на корпус установки во время генерации импульса.

Методы определения энерговыделения в АЗ реактора ВИР-2М

Традиционно на ИЯУ ВИР-2М применяются следующие методы определения энерговыделения:

- по выходу ГГ;
- по активационным индикаторам;
- по температуре корпуса АЗ.

Определение энерговыделения по выходу гремучего газа. Основным методом определения энерговыделения на реакторе ВИР-2М (как и на всех реакторах семейства ВИР) является метод, который базируется на измерении выхода гремучего газа ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$), образующегося вследствие радиолиза воды топливного раствора осколками деления [4]. Энерговыделение E (в МДж) вычисляется по формуле

$$E = \frac{V_{\text{нп}} \Delta P}{G P}, \quad (1)$$

где G – выход ГГ из ТР на единицу выделенной в АЗ энергии при н.у.; $V_{\text{нп}}$ – объем надтопливного пространства корпуса АЗ реактора ВИР-2М; ΔP – разница давления газа в надтопливном пространстве АЗ реактора до и после работы на мощности; P – давление при н.у.

Принималось (как и на всех модификациях реакторов семейства ВИР), что выход ГГ из АЗ реактора ВИР-2М на 1 МДж энерговыделения равен примерно 4,5 л.

К недостаткам этого метода можно отнести следующее:

- неполный выход ГГ из ТР в пусках с малым энерговыделением приводит к занижению реально наработанного энерговыделения;
- не учитывается зависимость давления ГГ от температуры ТР;
- иногда происходит полная или частичная рекомбинация ГГ во время импульса;
- величина G , по данным различных источников (справочников), может отличаться на 20 %.

Определение энерговыделения методом активационных детекторов. Количество делений в АЗ любого реактора можно определить по известному соотношению

$$N = \sum_f V \bar{\Phi}_{\text{АЗ}}, \quad (2)$$

где \sum_f – макроскопическое сечение деления в АЗ, м^{-1} ; V – объем АЗ, м^3 ; $\bar{\Phi}_{\text{АЗ}}$ – средний по АЗ флюенс нейтронов, м^{-2} .

Методом активационных индикаторов [5] можно измерить флюенс нейтронов утечки ($\bar{\Phi}$) в определенной (калиброванной) точке,

$$\bar{\Phi} = \frac{A}{\bar{\sigma}}, \quad (3)$$

где A – активационный интеграл; $\bar{\sigma}$ – среднее микроскопическое сечение для данного индикатора в калиброванной точке, м^2 .

Полагая, что флюенс нейтронов утечки пропорционален среднему по АЗ флюенсу нейтронов, можно записать

$$\bar{\Phi}_{\text{АЗ}} = k \bar{\Phi}, \quad (4)$$

где k – коэффициент неравномерности.

Таким образом соотношение (2) можно переписать в следующем виде:

$$N = \sum_f V k \frac{A}{\bar{\sigma}}, \quad (5)$$

или

$$E = KA, \quad (6)$$

где K – коэффициент перевода активационного интеграла в энерговыделение, МДж.

К недостаткам этого метода можно отнести следующие факторы:

- необходимость проведения предварительной калибровки для установления коэффициента K ;

Очевидно, что соотношение для изменения числа атомов первично образовавшегося продукта деления в импульсе ИЯУ ВИР-2М имеет вид

$$\frac{dN_0(t)}{dt} = -\lambda_0 N_0(t), \quad (8)$$

$$N_0(t_0) = \omega_0 N_0^f, \quad (9)$$

$$\lambda_0 = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}, \quad (10)$$

где λ_0 – постоянная распада первичного ПД; $T_{1/2}$ – период полураспада; ω_0 – кумулятивный выход первичного ПД; $N_0(t)$ – число атомов первичного ПД в момент времени t ; $N_0(t_0)$ – число атомов первичного ПД в начальный момент времени t_0 ; N_0^f – число делений в импульсе, произошедших в начальный момент времени t_0 .

Полагая, что деление произошло мгновенно, соотношения (8) и (9) можно записать следующим образом:

$$N_0(t) = \omega_0 N_0^f e^{-\lambda_0 t}. \quad (11)$$

Для N независимых импульсов (статик) выражение (11) для числа атомов первичных ПД в момент времени τ , когда происходит измерение, примет вид

$$N_0(\tau) = \omega_0 \sum_{i=1}^N N_i^f e^{-\lambda_0(\tau-t_i)}, \quad (12)$$

где t_i – момент времени i -го пуска ИЯУ.

Соответственно, измеряемая объемная активность (в момент времени τ) продукта деления после серии N независимых импульсов будет определяться как

$$A_0(\tau) = \frac{\lambda_0 \omega_0}{V_{A3}} \sum_{i=1}^N N_i^f e^{-\lambda_0(\tau-t_i)}, \quad (13)$$

где V_{A3} – объем ТР ИЯУ ВИР-2М (104 л).

Разделим данное соотношение на общее число делений в реакторе, произошедших за N импульсов (статик),

$$N^f = \sum_{i=1}^N N_i^f. \quad (14)$$

Получаем соотношение

$$\frac{A_0(\tau)}{N^f} = \frac{\lambda_0 \omega_0 \sum_{i=1}^N N_i^f e^{-\lambda_0(\tau-t_i)}}{V_{A3} N^f}. \quad (15)$$

Энерговыведение в активной зоне реактора ВИР-2М пропорционально числу делений, поэтому

$$k_i = \frac{N_i^f}{N^f} = \frac{E_i}{E}, \quad (16)$$

где E_i – энерговыведение в i -м импульсе, E – сумма энерговыведений за N импульсов.

Подставляя данное выражение в (15), получим

$$N_f(\tau) = \frac{A_0(\tau) V_{A3}}{\lambda_0 \omega_0 \sum_{i=1}^N k_i e^{-\lambda_0(\tau-t_i)}}. \quad (17)$$

Пробы ТР из АЗ реактора ВИР-2М берутся с некоторой периодичностью, число делений за время между взятиями проб определяется следующим соотношением (суммирование в знаменателе формулы производится по импульсам, произведенным в период времени между взятием проб раствора):

$$N_f(\Delta\tau) = \frac{A_0(\tau^{\text{тек}}) - A_0(\tau^{\text{пред}}) e^{-\lambda_0 \Delta\tau}}{\lambda_0 \omega_0 \sum_{i=1}^N k_i e^{-\lambda_0(\tau-t_i)}} V_{A3}, \quad (18)$$

где $A_0(\tau^{\text{пред}})$ – активность, измеренная при взятии проб в предыдущий период; $\tau^{\text{тек}}$ – момент времени измерения активности текущей пробы; $\tau^{\text{пред}}$ – момент времени измерения активности предыдущей пробы; $\Delta\tau = \tau^{\text{тек}} - \tau^{\text{пред}}$ – разница времени при измерении активностей $A_0(\tau^{\text{тек}})$ и $A_0(\tau^{\text{пред}})$.

Рассматриваемое время $\Delta t_i = \tau - t_i$ для конкретного ПД бралось не более 6,7 периодов его полураспада ($\Delta t_i^{\text{max}} \leq 6,7 T_{1/2}$). В этом случае величина $e^{-\lambda_0 \Delta t_i} = 0,0096$, т. е. в расчетах не учитывались импульсы, которые давали вклад в активность на момент измерения менее 0,96 % от изначальной (в момент генерации импульса). Суммарное энерговыведение при этом также бралось только за это время.

Результаты расчетов числа делений по измеренной активности ТР

В соответствии с соотношением (18) были проведены расчеты числа делений за период с 2000 по 2017 гг. Пробы для анализа состояния ТР брались в 2000, 2006, 2011, 2015 и 2017 гг. В расчетах использовались константы [6], приведенные в табл. 1.

Объем ТР принимался равным 104 ± 1 л.

В табл. 2 и 3 приведены результаты расчетов числа делений за период 2000–2017 гг. В таблицах также указано суммарное энерговыделение за рассматриваемый период.

При проведении расчетов использовались следующие приближения:

– погрешность измерения активности равна 10 %;

– погрешность времени между двумя измерениями активностей Δt принималась равной одним суткам;

– энерговыделение по выходу ГГ определено с погрешностью 20 %;

– время от i -го импульса до момента измерения активности продукта деления определено с точностью $\Delta t_i = 1$ сут.

Для вычисления коэффициентов k_i (см. формулу (16)) использовались значения E_i , определенные по относительной методике определения энерговыделения.

Таблица 1

Результаты расчетов числа делений за период 2000–2017 гг.

ПД	Период полураспада ($T_{1/2}$), день	Постоянная распада (λ_0), c^{-1}	Кумулятивный выход ПД (ω_0), отн. ед.
$^{95}_{40}\text{Zr}$	64,02	1,25E-07	0,062
$^{141}_{58}\text{Ce}$	32,5	2,47E-07	0,060
$^{144}_{58}\text{Ce}$	284,9	2,82E-08	0,060
$^{103}_{44}\text{Ru}$	39,26	2,04E-07	0,030
$^{106}_{44}\text{Ru}$	373,6	2,15E-08	0,0038
$^{140}_{56}\text{Ba}$	12,8	6,27E-07	0,063

Таблица 2

Результаты расчетов числа делений за период 2000–2011 гг.

ПД	2000–2006			2006–2011		
	Рассматриваемый период (Δt_i^{\max}), день	Энерговыделение (E), ГДж	Количество делений (N_f), $\times 10^{20}$ дел.	Рассматриваемый период (Δt_i^{\max}), день	Энерговыделение (E), ГДж	Количество делений (N_f), $\times 10^{20}$ дел.
$^{95}_{40}\text{Zr}$	429 \pm 1	8,2 \pm 1,5	2,0 \pm 0,4	429 \pm 1	6,2 \pm 1,1	2,1 \pm 0,4
$^{141}_{58}\text{Ce}$	218 \pm 1	4,4 \pm 0,8	1,6 \pm 0,3	218 \pm 1	3,4 \pm 0,6	1,1 \pm 0,2
$^{144}_{58}\text{Ce}$	1909 \pm 1	28,8 \pm 5,2	8,0 \pm 1,6	1787 \pm 1	23,4 \pm 4,2	6,9 \pm 1,4
$^{103}_{44}\text{Ru}$	263 \pm 1	5,1 \pm 0,9	1,9 \pm 0,4	263 \pm 1	4,4 \pm 0,8	1,4 \pm 0,3
$^{106}_{44}\text{Ru}$	–	–	–	1787 \pm 1	23,4 \pm 4,2	7,6 \pm 1,5

Результаты расчетов числа делений за период 2013–2017 гг.

ПД	2013–2015			2015–2017		
	Рассматриваемый период (Δt_i^{\max}), день	Энерговыделение (E), ГДж	Количество делений (N_f), $\times 10^{19}$ дел.	Рассматриваемый период (Δt_i^{\max}), день	Энерговыделение (E), ГДж	Количество делений (N_f), $\times 10^{19}$ дел.
$^{95}_{40}\text{Zr}$	429 \pm 1	1,8 \pm 0,3	7,1 \pm 1,4	429 \pm 1	4,4 \pm 0,8	13,0 \pm 2,6
$^{141}_{58}\text{Ce}$	218 \pm 1	1,1 \pm 0,2	4,1 \pm 0,8	218 \pm 1	2,1 \pm 0,4	5,9 \pm 1,2
$^{144}_{58}\text{Ce}$	729 \pm 1	3,1 \pm 0,6	10,1 \pm 2,0	706 \pm 1	6,3 \pm 1,1	15,9 \pm 3,2
$^{103}_{44}\text{Ru}$	263 \pm 1	1,3 \pm 0,2	4,6 \pm 0,9	263 \pm 1	2,3 \pm 0,4	6,6 \pm 1,3
$^{106}_{44}\text{Ru}$	729 \pm 1	3,1 \pm 0,6	11,4 \pm 2,3	706 \pm 1	6,3 \pm 1,1	16,5 \pm 3,3
$^{140}_{56}\text{Ba}$	–	–	–	86 \pm 1	1,4 \pm 0,3	3,6 \pm 0,7

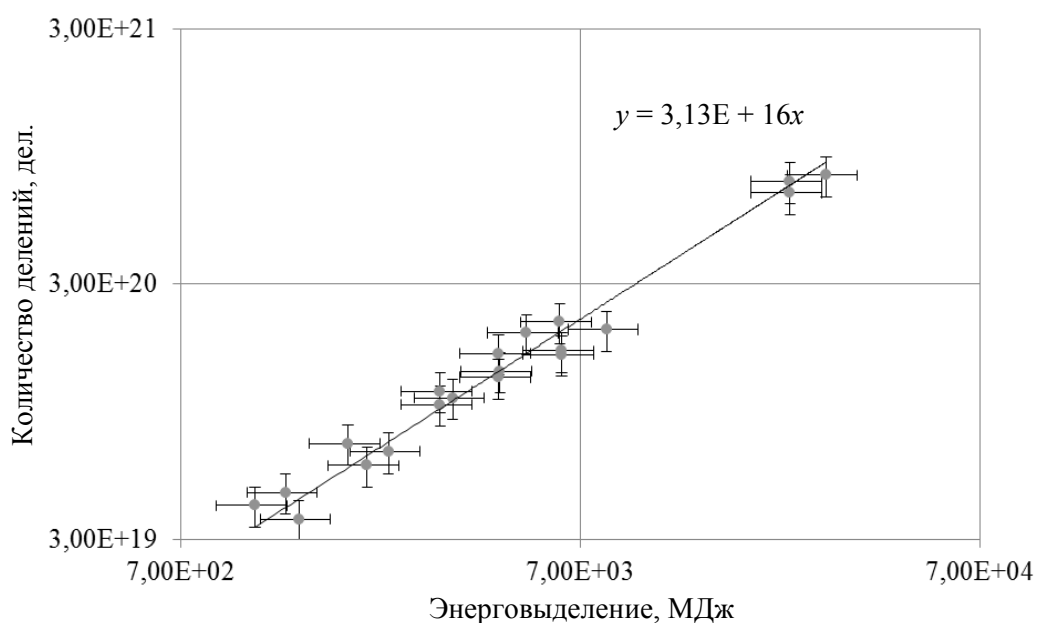


График зависимости числа делений, рассчитанных по измеренной активности различных ПД, от энерговыделения, определенного по выходу ГГ

По полученным результатам была построена зависимость числа делений, рассчитанных по измеренной активности различных ПД, от энерговыделения, определенного по выходу ГГ. График зависимости представлен на рисунке. Данная зависимость аппроксимировалась прямой, тангенс угла наклона которой равен количеству делений в АЗ ИЯР ВИР-2М на 1 МДж выделенной энергии. Определенное таким образом значение составило $3,13 \cdot 10^{16}$ дел./МДж.

Заключение

В работе рассмотрен метод по определению энерговыделения в АЗ ИЯР ВИР-2М по выходу ПД. Данный метод основан на спектроскопическом анализе проб ТР и пересчете измеренной активности различных ПД в количество делений. Расчет проводился по активности шести продуктов деления: $^{95}_{40}\text{Zr}$; $^{141}_{58}\text{Ce}$; $^{144}_{58}\text{Ce}$; $^{103}_{44}\text{Ru}$; $^{106}_{44}\text{Ru}$; $^{140}_{56}\text{Ba}$. Описанным методом удалось рассчитать чис-

ло делений в реакторе ВИР-2М за периоды времени: 2000–2006, 2006–2011, 2013–2015, 2015–2017 гг. С помощью метода определения энерговыделения по выходу ГГ и метода по определению количества делений получено число делений урана на 1 МДж выделенной в АЗ ИЯР ВИР-2М энергии, равное $3,13 \cdot 10^{16}$ дел./МДж, что практически равно теоретически рассчитанному значению в $3,1 \cdot 10^{16}$ дел./МДж.

Описанный метод можно применять для оценки числа деления в импульсных реакторах как за большой период времени (порядка нескольких десятков лет), так и для оценки числа делений за достаточно короткий (несколько суток) период времени. Кроме того, данный метод может служить для калибровки относительных методик определения энерговыделения на импульсных ядерных установках.

Список литературы

1. Колесов В. Ф. Апериодические импульсные реакторы. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999. 1032 с.

2. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеев А. С., Мельников С. Ф., Левицкий И. В., Маслов Г. Н., Павловская Л. М., Самодуров Л. А., Гладков В. С. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. Вып. 3. С. 3–15.

3. Лукин А. В. Основы физики импульсных ядерных реакторов. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2005, 438 с.

4. Boyle J. W., Hochanadel C. J., Sworsky T. J., Ghormley J. A., Kieffer W. F. The Decomposition of Water by Fission Recoil Particles // Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Т. 7. Ядерная химия и действие излучения. – Женева, 1955. С. 700–707.

5. Нефедов Ю. Я., Пунин В. Т. Методы диагностики параметров высокоинтенсивных импульсных источников ионизирующих излучений: Курс лекций. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010. 125 с.

6. Грешилов А. А., Колобашкин В. М., Дементьев С. И. Продукты мгновенного деления ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu в интервале 0-1 ч. Справочник. – М.: Атомиздат, 1969. 104 с.

Контактная информация –

Котков Сергей Павлович,
начальник группы эксплуатации
установок (комплексов) ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 4, с. 99–105.