

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 539.173.84

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-491-496>

Поступила в редакцию 05.06.2018

Received 05.06.2018

А. М. Петровский, Т. Н. Корбут, Э. А. Рудак, М. О. Кравченко*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Республики Беларусь, Минск, Беларусь***УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ОСТАНОВА РЕАКТОРА ВВЭР-1200 ДЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ ПРИ РАСЧЕТЕ АКТИВНОСТЕЙ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ**

Аннотация. Целью исследования являлся анализ влияния распада продуктов деления во время перегрузки топлива, при определении нарабатанной активности продуктов деления в течение топливной кампании реактора ВВЭР-1200. Для расчетов применялась методика на основе аналитического решения задачи Бейтмана в рамках приближения двух делящихся нуклидов. Рассмотрен процесс наработки продуктов деления для стационарной кампании реактора ВВЭР-1200 с учетом периодов останова реактора для перегрузки топлива и без их учета (приближение мгновенной перегрузки). Было установлено, что расчет удельных активностей продуктов деления в моменты останова реактора для перегрузки в приближении мгновенной перегрузки по точности практически не уступает расчетам, учитывающим распад продуктов деления за период перегрузки. Полученные результаты могут быть использованы для существенного упрощения расчетов наработки активностей продуктов деления в ядерных энергетических реакторах.

Ключевые слова: активность продуктов деления, задача Бейтмана, перегрузка топлива, ВВЭР

Для цитирования: Учет влияния останова реактора ВВЭР-1200 для перегрузки при расчете активностей продуктов деления / А. М. Петровский [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №4. – С. 491–496. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-491-496>

A. M. Petrovski, T. N. Korbut, E. A. Rudak, M. O. Kravchenko*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***ACCOUNTING OF THE VVER-1200 OVERLOAD INFLUENCE FOR FISSION PRODUCTS ACTIVITIES CALCULATING**

Abstract. Current work is aimed at the analysis of the fission products decay influence during fuel reloading, when calculating the accumulated fission products activity for the VVER-1200 reactor fuel campaign. The Bateman problem solution based technique was used for calculations, within the framework of the two fissile nuclides approximation. The fission products producing process for the VVER-1200 reactor stationary campaign is considered, taking into account the reactor shutdown periods for refueling and without taking them into account (instant reload approximation). It was shown, that the instant reload approximation for fission products activity calculations gives the similar accurate result, as calculations with taking into account the shutdown periods. The results can be used to significantly simplify the calculations of fission product activity accumulation in nuclear power reactors.

Keywords: fission products activity, Bateman's task, fuel overload, VVER

For citation: Petrovski A. M., Korbut T. N., Rudak E. A., Kravchenko M. O. Accounting of the VVER-1200 overload influence for fission products activities calculating. *Vestsi Natsyonal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 491–496 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-491-496>

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь осуществляется строительство атомной энергетической станции по проекту АЭС-2006 – наиболее современного на сегодняшний день поколения «3+», с реактором типа ВВЭР-1200. По сравнению с предыдущим поколением реакторов типа ВВЭР-1000 была существенно увеличена продолжительность топливной кампании и, как следствие, величина выгорания топлива.

Топливная кампания реакторов типа ВВЭР состоит из длительного периода работы на номинальной мощности (порядка одного года) и периода перегрузки (порядка одного месяца). Данные периоды имеют сопоставимую продолжительность с периодами полураспада многих практически важных продуктов деления (ПД) и определяют характер их наработки.

При останове реактора прекращается наработка ПД за счет деления топливных изотопов и происходит их непрерывный распад. Для ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР время останова примерно на порядок меньше времени работы реактора между перегрузками

(реакторной кампании). Это обстоятельство позволяет существенно упростить расчет активностей ПД в конце каждой реакторной кампании.

Целью данного исследования являлось сравнение результатов расчета наработки активностей ПД с учетом и без учета их распада во время перегрузки топлива. Были рассмотрены активности наиболее важных в практическом отношении ПД: ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{147}Nd .

Топливная кампания в приближении двух делящихся нуклидов. В [1–3] описана методика вычисления удельных активностей (УА) ПД аналитическим методом в приближении двух делящихся нуклидов, которая будет использована в данной работе.

В [2] показано, что зависимость удельной массы ^{235}U от времени топливной кампании теплового реактора может быть с точностью в несколько процентов аппроксимирована функцией вида

$$m(^{235}\text{U}, t) = [m_0(^{235}\text{U}) + \mu] \cdot e^{-\lambda t} - \mu, \text{ кг/т.} \quad (1)$$

В результате аппроксимации методом наименьших квадратов, с учетом численных данных [4, 5], для реактора ВВЭР-1200 выражение (1) принимает вид

$$m(^{235}\text{U}, t) = 55,25 \cdot \exp(-0,370 \cdot t) - 7,29, \text{ кг/т.} \quad (2)$$

Продифференцировав (2) по времени, а также умножив его на соответствующий коэффициент, получим удельную скорость деления ядер ^{235}U (дел/т·с):

$$P(^{235}\text{U}, t) = P_0 \cdot \exp(-0,370 \cdot t), \quad (3)$$

где $P_0 = 1,659 \cdot 10^{18}$ дел/т·с.

При работе реактора на постоянной мощности на долю остальных делящихся изотопов (это в основном $^{239,241}\text{Pu}$ и ^{238}U) приходится

$$P = P_0 [1 - \exp(-0,370 \cdot t)]. \quad (4)$$

Определяющий вклад дает ^{239}Pu , в свою очередь вклад ^{241}Pu становится ощутимым, начиная примерно с середины топливной кампании. Суммарные выходы продуктов деления ядер ^{239}Pu и ^{241}Pu отличаются незначительно, поэтому без особой погрешности можно считать $P(^{239,241}\text{Pu}, t) \approx P(^{239}\text{Pu}, t)$.

Время в выражениях (1)–(4) изменяется в пределах топливной кампании (времени от первой загрузки тепловыделяющей сборки до ее окончательной выгрузки после всех циклов перегрузок) реактора ВВЭР-1200, которая составляет 4,2 года.

Аппроксимация скорости деления функциями вида (3) и (4) позволяет получить аналитическое решение задачи Бейтмана в виде экспонент. Решение подобного простого вида позволяет существенно упростить анализ результатов.

Аналитический метод расчета активностей продуктов деления. Пусть $P(t)$ – количество актов деления в единицу времени ядер топлива определенного вида (^{235}U , ^{239}Pu и т. д.). В процессе деления происходит наработка продуктов деления с различными массовыми числами. Если не учитывать выгорание, то все радиоактивные превращения происходят без изменения массового числа, за счет β -распадов (такое допущение не вносит существенной погрешности при расчете активностей всех важных в практическом отношении радионуклидов). Таким образом, каждое из радиоактивных ядер может превратиться в одно из соседних ядер-изобар. Кинетика изменения во времени удельных активностей всех членов линейной изобарной цепочки: $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_j \rightarrow \dots \rightarrow A_i$ описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dA_1(t)}{dt} = \lambda_1 y_1^H P(t) - \lambda_1 A_1(t) \\ \frac{dA_2(t)}{dt} = \lambda_2 y_2^H P(t) + \lambda_2 A_1(t) - \lambda_2 A_2(t) \\ \dots \\ \frac{dA_i(t)}{dt} = \lambda_i y_i^H P(t) + \lambda_i A_{i-1}(t) - \lambda_i A_i(t) \end{cases}, \quad (5)$$

где i – текущий номер члена линейной цепочки, λ_i – постоянные распада распада и активность i -го члена изобарной цепочки, y_i – абсолютный независимый выход i -го члена изобарной цепочки.

Система (5) представляет собой задачу Бейтмана. Известно, что данная задача имеет аналитическое решение при скорости деления ядер $P(t)$ определенного вида [6], в частности при постоянной и экспоненциально изменяющейся $P(t)$.

В приближении двух делящихся нуклидов скорости деления топливных изотопов описываются выражениями (3), (4). Деление ядер плутония (4) можно условно представить в виде двух процессов: деление с постоянной скоростью P_0 , а также деление с экспоненциально изменяющейся скоростью $P_0 \cdot \exp(-0,370 \cdot t)$. Тогда задача о наработке продуктов деления сводится к решению системы (5) для трех различных $P(t)$, а результирующие активности будут представлены суммой этих решений:

$$A_i(X_i, t) = A_i(X_i, {}^{235}\text{U}, t)^\beta + A_i(X_i, {}^{239}\text{Pu}, t) - A_i(X_i, {}^{239}\text{Pu}, t)^\beta, \quad (6)$$

где верхний индекс β означает, что данное решение соответствует $P(t)$ с экспоненциальной зависимостью. Аналитические выражения для слагаемых в правой части (6) имеют следующий вид [1]:

$$A_i(X_i, {}^{239}\text{Pu}, t) = b_i({}^{239}\text{Pu}) + \sum_{j=1}^i C_{i,j}({}^{239}\text{Pu}) \cdot e^{-\lambda_j t}, \quad (7)$$

$$b_i({}^{239}\text{Pu}) = P_0 \cdot \sum_{j=1}^i y_j^{\text{H}}({}^{239}\text{Pu}), \quad (8)$$

$$C_{i,j}({}^{239}\text{Pu}) = C_{i-1,j}({}^{239}\text{Pu}) \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_i - \lambda_j}, \quad i \neq j, \quad (9)$$

$$C_{11}({}^{239}\text{Pu}) = -b_1({}^{239}\text{Pu}), \quad C_{22}({}^{239}\text{Pu}) = -b_2({}^{239}\text{Pu}) - C_{21}({}^{239}\text{Pu}), \quad (10)$$

$$C_{33}({}^{239}\text{Pu}) = -b_3({}^{239}\text{Pu}) - C_{32}({}^{239}\text{Pu}) - C_{31}({}^{239}\text{Pu}).$$

В случае экспоненциального вида $P(t)$:

$$A_i(X_i, {}^{235}\text{U}, t)^\beta = b_i({}^{235}\text{U})^\beta \cdot e^{-\lambda t} + \sum_{j=1}^i C_{i,j}({}^{235}\text{U})^\beta \cdot e^{-\lambda_j t}, \quad (11)$$

$$b_i({}^{235}\text{U})^\beta = P_0 \cdot \sum_{k=1}^i y_k^{\text{H}}({}^{235}\text{U}) \prod_{j=k}^i \frac{\lambda_j}{\lambda_j - \lambda}, \quad (12)$$

$$C_{i,j}({}^{235}\text{U})^\beta = C_{i-1,j}({}^{235}\text{U})^\beta \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_i - \lambda_j}, \quad i \neq j, \quad (13)$$

$$C_{11}({}^{235}\text{U})^\beta = -b_1({}^{235}\text{U})^\beta; \quad C_{22}({}^{235}\text{U})^\beta = -b_2({}^{235}\text{U})^\beta - C_{21}({}^{235}\text{U})^\beta, \quad (14)$$

$$C_{33}({}^{235}\text{U})^\beta = -b_3({}^{235}\text{U})^\beta - C_{32}({}^{235}\text{U})^\beta - C_{31}({}^{235}\text{U})^\beta.$$

Для ${}^{239}\text{Pu}$ выражения (11)–(14) выглядят аналогично. С учетом (6)–(14) можно записать общее решение:

$$A_i(t) = b_i({}^{239}\text{Pu}) + \left[b_i({}^{235}\text{U})^\beta - b_i({}^{239}\text{Pu})^\beta \right] \cdot e^{-\lambda t} + \sum_{j=1}^i \left[C_{i,j}({}^{239}\text{Pu}) + C_{i,j}({}^{235}\text{U})^\beta - C_{i,j}({}^{239}\text{Pu})^\beta \right] \cdot e^{-\lambda_j t}. \quad (15)$$

При оценке УА в отработавшем топливе интерес могут представлять нуклиды со временем жизни порядка нескольких часов, суток или лет. При этом нуклиды, живущие значительно меньше рассматриваемого интервала времени, можно исключить из рассмотрения, добавив их независимые выходы к следующим членам изобарной цепочки. После этого система (5) обычно сокращается до одного-двух уравнений.

Решение (15) позволяет определить значения УА ПД в зависимости от времени топливной кампании без учета времени останова при перегрузке топлива. Иначе говоря, предполагается, что перегрузки происходят мгновенно. В [2] показано, что (15) при расчете УА ПД в реакторе РБМК-1000 показывало высокую точность, отличаясь от результатов более точных численных расчетов методом Монте-Карло не более чем на 2 %.

Учет перегрузок топлива. Продолжительность перегрузки ядерного топлива для ВВЭР-1200 составляет 15–25 сут. В качестве расчетного авторами настоящей статьи использовано наибольшее значение $\Delta t_{\text{п}} = 25$ сут.

Установившаяся топливная кампания реактора ВВЭР-1200 составляет 4,2 года и разделена на четыре реакторных кампании по $\tau = 1,05$ года каждая.

Для каждого цикла перегрузки $k = 1 \div 4$, выражения (3), (4) примут вид:

$$P(^{235}\text{U}, t) = P_0 \cdot \exp[-0,370 \cdot (t + (k - 1) \cdot \tau)], \quad (3^*)$$

$$P(^{239}\text{Pu}, t) = P_0 \cdot [1 - \exp(-0,370 \cdot (t + (k - 1) \cdot \tau))]. \quad (4^*)$$

После ввода обозначения $a(k) = \exp[-(k - 1) \cdot \tau]$ получим:

$$P(^{235}\text{U}, t) = P_0 \cdot a(k) \cdot \exp(-0,370 \cdot t), \quad (3^{**})$$

$$P(^{239}\text{Pu}, t) = P_0 \cdot [1 - a(k) \cdot \exp(-0,370 \cdot t)]. \quad (4^{**})$$

В каждом цикле, начиная со второго, активность ПД будет определяться наработкой за счет деления топлива, описываемой (3^{**}) и (4^{**}), и распадом ПД, оставшихся после перегрузки.

Решение (15), определяющее наработку ПД для каждого цикла k , примет вид

$$A_i(t)_k = b_i(^{239}\text{Pu}) + a(k) \cdot [b_i(^{235}\text{U})^\beta - b_i(^{239}\text{Pu})^\beta] \cdot e^{-\lambda t} + \sum_{j=1}^i [C_{i,j} (^{239}\text{Pu}) + a(k) \cdot C_{i,j} (^{235}\text{U})^\beta - a(k) \cdot C_{i,j} (^{239}\text{Pu})^\beta] \cdot e^{-\lambda_j t}. \quad (15^*)$$

Распад топлива для всех рассмотренных ПД будет описываться простой экспонентой

$$A(X, t > t_0) = A(X, t_0) \cdot e^{-\lambda(X)(t-t_0)}. \quad (16)$$

Результаты расчетов. Для наиболее важных в практическом отношении ПД: ^{89}Sr , ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{147}Nd – представим результаты расчетов УА с учетом перегрузок и без них в виде графиков (рис. 1–4). Интервалы самих перегрузок на графиках не показаны. Среди имеющих высокую практическую значимость нуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs характеризуются очень большим периодом полураспада, поэтому за время перегрузки будет распадаться незначительная часть, в силу данного обстоятельства графики для них в данной статье не приводятся.

Заключение. Значения УА ПД, рассчитанные с учетом перегрузки и без нее практически, совпадают в моменты окончания реакторных кампаний. Небольшие расхождения наблюдаются для изотопов с периодами полураспада, сравнимыми с продолжительностью реакторной кампании (нуклиды ^{106}Ru и ^{144}Ce). Это позволяет использовать аналитические выражения УА ПД (15), справедливые при расчетах для всей топливной кампании, без необходимости усложнять расчеты учетом распада ПД во время перегрузок.

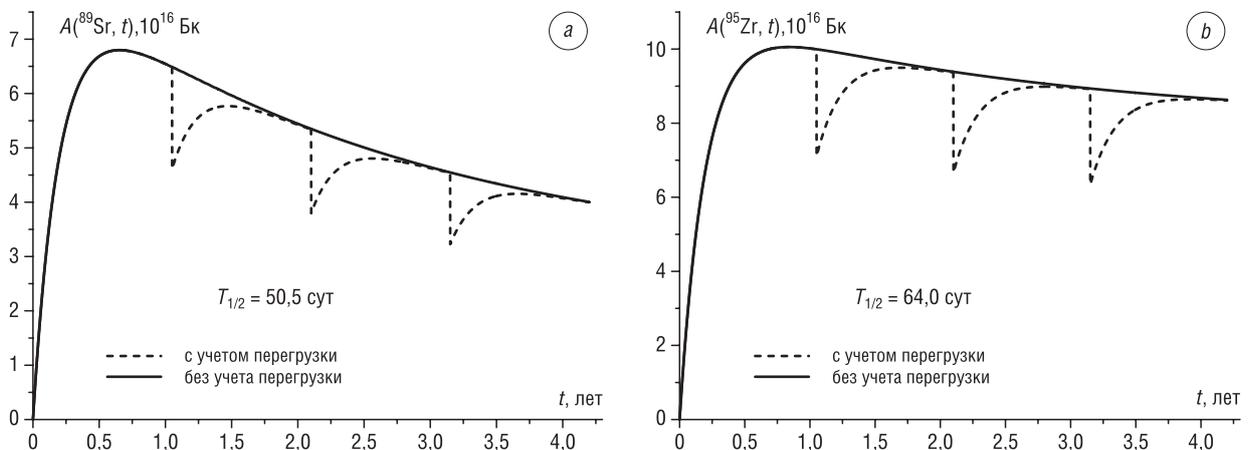


Рис. 1. Зависимости удельной активности ^{89}Sr (a) и ^{95}Zr (b) от времени с учетом перегрузки и без нее
 Fig. 1. ^{89}Sr (a) and ^{95}Zr (b) activity dependence on time with and without instant reload approximation

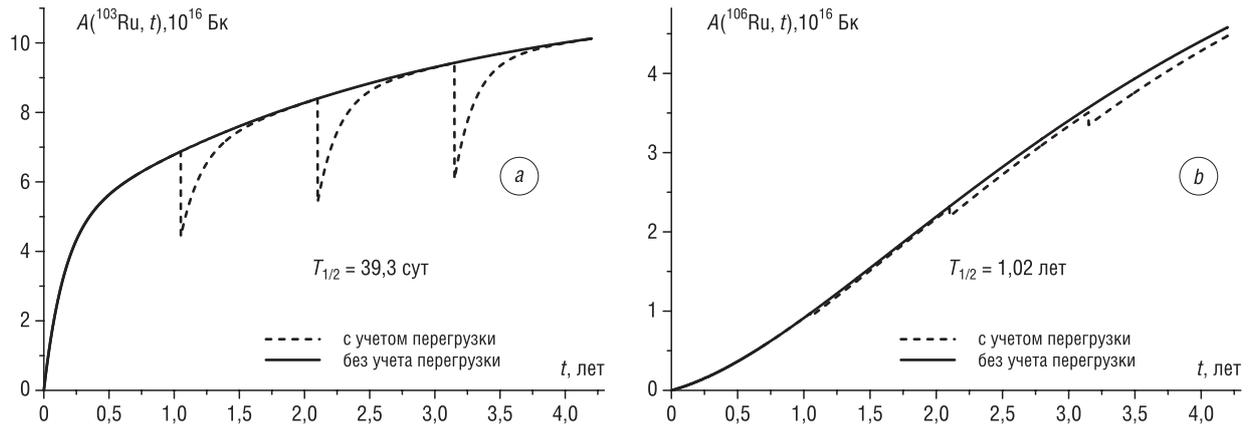


Рис. 2. Зависимости удельной активности ^{103}Ru (a) и ^{106}Ru (b) от времени с учетом перегрузки и без нее
 Fig. 2. ^{103}Ru (a) and ^{106}Ru (b) activity dependence on time with and without instant reload approximation

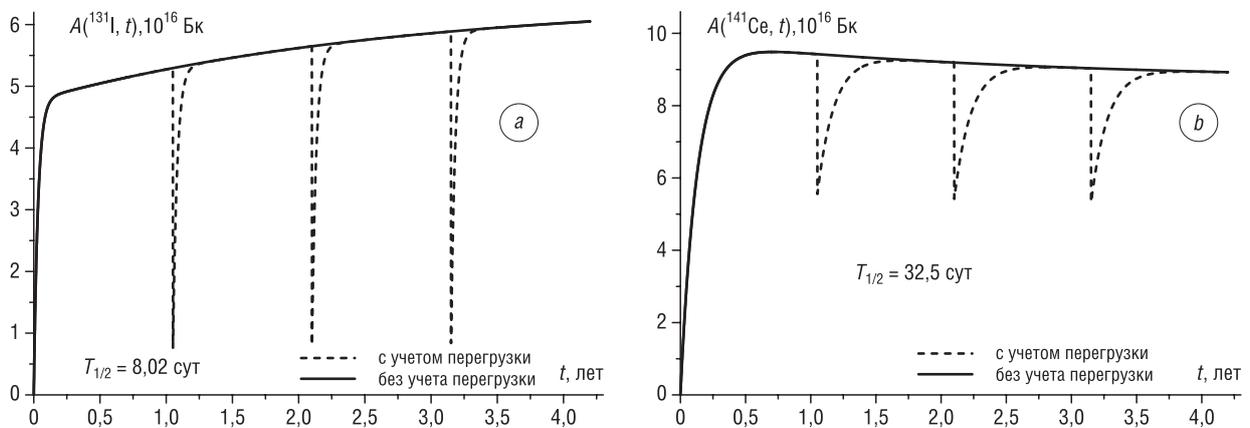


Рис. 3. Зависимости удельной активности ^{131}I (a) и ^{141}Ce (b) от времени с учетом перегрузки и без нее
 Fig. 3. ^{131}I (a) and ^{141}Ce (b) activity dependence on time with and without instant reload approximation

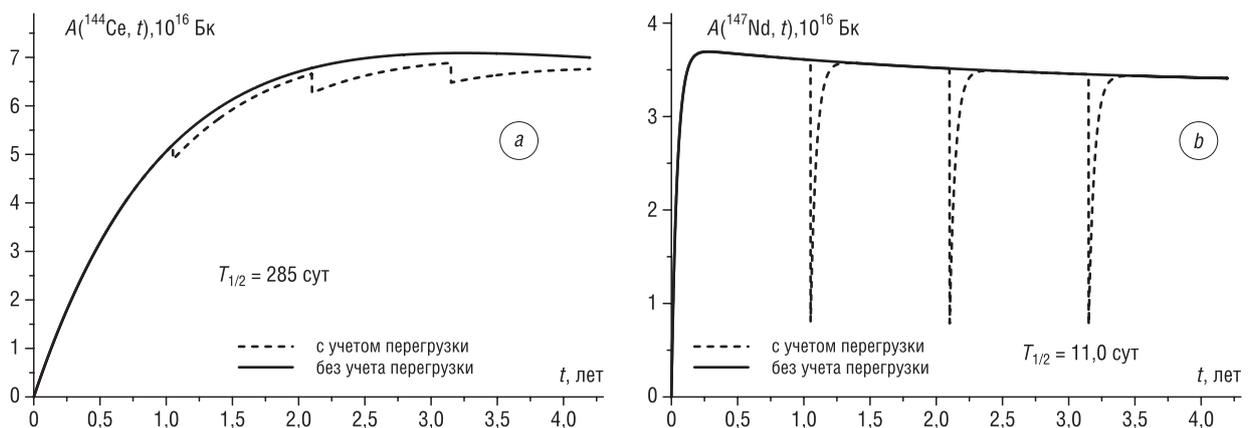


Рис. 4. Зависимости удельной активности ^{144}Ce (a) и ^{147}Nd (b) от времени с учетом перегрузки и без нее
 Fig. 4. ^{144}Ce (a) and ^{147}Nd (b) activity dependence on time with and without instant reload approximation

Очевидно, что подобный характер будет наблюдаться и для других типов тепловых реакторов, для которых время останова и время реакторной кампании имеют схожие величины, в частности для реактора ВВЭР-1000.

Выводы данной статьи носят универсальный характер независимо от методики расчетов и могут быть использованы при вычислении УА ПД другими методами, как аналитическими, так и численными.

Список использованных источников

1. Ячник, О. И. Статистический анализ отношений активностей радионуклидов в ядерном топливе и аварийных реакторных выпадениях: дис. ... канд. физ.-мат. наук / О. И. Ячник. – Минск, 2010. – 147 л.
2. Бурак, А. О. Аппроксимация зависимостей концентраций нуклидов от времени простыми аналитическими функциями / А. О. Бурак, А. Н. Еремина, Э. А. Рудак // Атомная энергия. – 2003. – Т. 94, № 6. – С. 432–438.
3. Бурак, А. О. Расчет масс и активностей нуклидов в активной зоне реактора РБМК: феноменологическая теория наработки масс и активностей продуктов активации ядер топлива / А. О. Бурак, П. А. М. Наполеау, Э. А. Рудак. – Минск, 2001. – 14 с. – (Препринт / Ин-т физики Нац. акад. наук Беларуси; № 732).
4. Petrovskiy, A. M. Analytical Ways of Determining the Activity of Fission Products in the Core of a VVER-1200 Reactor and Their Applications / A. M. Petrovskiy, Ed. A. Rudak, T. N. Korbut // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. – 2018. – Vol. 82, № 10. – P. 1335–1341. <https://doi.org/10.3103/S1062873818100179>
5. Петровский, А. М. Аналитические методы расчета удельных активностей в активной зоне реактора ВВЭР-1200 / А. М. Петровский, Э. А. Рудак, Т. Н. Корбут // Ядерная физика и инжиниринг. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 118–122. <https://doi.org/10.1134/S207956291702018X>
6. Bateman, H. Solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations / H. Bateman // Proc. Cambridge Philos. – 1910. – Vol. 15, № 5. – P. 423–427.

References

1. Yachnik O. I. *Statistical analysis of the ratios of radionuclide activities in nuclear fuel and emergency reactor deposition*. Minsk, 2010. 147 sheets (in Russian).
2. Burak A. O., Eremina A. N., Rudak E. A. Approximation by simple analytical functions of the nuclide concentrations time dependence. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2003, vol. 94, no. 6, pp. 432–438 (in Russian).
3. Burak A. O., Napoleau P. A. M., Rudak E. A. *Calculation of masses and activities of nuclides in the RBMK reactor core: phenomenological theory of the mass production and activity of the fuel nuclei activation products*. Minsk, 2001. 14 p. (in Russian).
4. Petrovskiy A. M., Rudak Ed. A., Korbut T. N. Analytical Ways of Determining the Activity of Fission Products in the Core of a VVER-1200 Reactor and Their Applications. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2018, vol. 82, no. 10, pp. 1335–1341. <https://doi.org/10.3103/S1062873818100179>
5. Petrovskiy A. M., Rudak Ed. A., Korbut T. N. Activities of Fission Products in the Core of a WVER-1200 Reactor. *Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear Physics and Engineering], 2017, vol. 8, no. 2, pp. 118–122 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S207956291702018X>
6. Bateman H. Solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations. *Proceedings of the Cambridge Philosophical*, 1910, vol. 15, no. 5, pp. 423–427.

Информация об авторах

Петровский Андрей Михайлович – младший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Республики Беларусь (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: andysopl@gmail.com

Корбут Тамара Николаевна – кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Республики Беларусь (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tamara.korbut@gmail.com

Рудак Эдуард Аркадьевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией № 18 физики ядерных реакторов, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Республики Беларусь (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rubin@sosny.bas-net.by

Кравченко Максим Олегович – младший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Республики Беларусь (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: m.kravch@sosny.bas-net.by

Information about the authors

Andrei M. Petrovski – Junior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andysopl@gmail.com

Tamara N. Korbut – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Deputy General Director for Research, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tamara.korbut@gmail.com

Eduard A. Rudak – D. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory no. 18 of Nuclear Reactor Physics, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rubin@sosny.bas-net.by

Maksim O. Kravchenko – Junior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m.kravch@sosny.bas-net.by