

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ОТ ОБОГАЩЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТОПЛИВА И ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВНОЙ КАМПАНИИ РЕАКТОРОВ

Е.В. Семенов, В.В. Харитонов

НИЯУ МИФИ

115409, г. Москва, Каширское ш., 31



Работа посвящена определению аналитического выражения для оценки глубины выгорания ядерного топлива в зависимости от его обогащения, периодичности перегрузок, теплонапряженности и длительности периода времени между перегрузками топлива (кампании реактора) для разных типов реакторов на тепловых нейтронах. Полученные в работе аналитические выражения для глубины выгорания сравниваются с многочисленными нейтронно-физическими расчетами и экспериментальными данными разных авторов при обогащениях уранового топлива до 10%. Выполнены расчеты топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС с реакторами типа PWR и определена ее чувствительность к изменению глубины выгорания и обогащения топлива, периодичности его перегрузок, а также к рыночным ценам на природный уран, конверсию, обогащение, фабрикации ТВС и обращение с ОЯТ.

Ключевые слова: АЭС, глубина выгорания ядерного топлива, обогащение, периодичность перегрузки тепловыделяющих сборок, кампания реактора, топливная составляющая стоимости электроэнергии.

Для цитирования: Семенов Е.В., Харитонов В.В. Аналитическая зависимость глубины выгорания от обогащения перспективного топлива и параметров топливной кампании реакторов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 94-105. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.08>.

ВВЕДЕНИЕ

Важной энергетической и экономической характеристикой ядерного топлива является так называемая **глубина выгорания** топлива (burnup или **удельная энерговыработка**), влияющая на экономические показатели АЭС [1–5]. С повышением глубины выгорания уменьшается потребность реактора в топливе, сокращается масса отработавшего топлива и объем операций на его транспортировку, увеличивается пе-

© Е.В. Семенов, В.В. Харитонов, 2023

риод работы реактора до перегрузки (т.е. кампания реактора) [1–10]. Современные легководные реакторы типа ВВЭР, PWR, BWR обычно рассчитаны на выгорание уранового топлива около 50–60 МВт·сут/кгU при существующем пределе обогащения 5%. В последние десятилетия наблюдается тенденция к увеличению выгорания топлива в легководных реакторах с одновременным увеличением обогащения свыше 5% и продолжительности работы реактора между перегрузками топлива до 24-х месяцев [1–10]. Разработки новых видов топлива (толерантного топлива), устойчивого к авариям благодаря исключению паро-циркониевой реакции, предполагают увеличение глубины выгорания топлива и изменение его обогащения (по сравнению с двуокисным топливом UO_2) вследствие применения иных материалов топливной матрицы и оболочки твэлов [11–15]. Взаимосвязь глубины выгорания топлива с его обогащением, периодичностью перегрузок, массой топлива в тепловыделяющей сборке (ТВС) и твэлах, а также с другими параметрами активной зоны и ТВС, определяется на основании нейтронно-физических расчетов [1, 2, 5–10]. В работах [5–8] результаты расчетов представлены в виде сеточных диаграмм, отражающих вышеперечисленные взаимосвязи. В работах [8, 9] на основании аппроксимации численных расчетов приведена квадратичная зависимость обогащения топлива от его выгорания и кратности перегрузок. Однако, что любопытно, в литературе не удалось найти аналитических выражений для построения сеточных диаграмм вышеперечисленных взаимосвязей, что необходимо, например, для вариантных расчетов экономических характеристик толерантного ядерного топлива и топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС. Поэтому цель настоящей работы – получить на основании физических принципов аналитическое выражение для оценки глубины выгорания ядерного топлива в зависимости от его обогащения, тепловой напряженности, периодичности и кратности перегрузок, а также определить чувствительность к этим параметрам топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА С ПАРАМЕТРАМИ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА АЭС

Для выявления аналитических возможностей выбора экономически обоснованных параметров топливного цикла АЭС с увеличенной кампанией реактора рассмотрим три подхода к оценке выгорания ядерного топлива.

Во-первых, глубина выгорания уранового топлива B (МВт·сут/кгU) связана с продолжительностью работы реактора T (суток) на тепловой мощности Q до перегрузки N тепловыделяющих сборок (ТВС) известным выражением [1]:

$$B = (Q \cdot T) / (N \cdot M_{\text{ТВС}}) = q \cdot n \cdot T, \quad (1)$$

где $M_{\text{ТВС}}$ – масса урана в каждой ТВС (кгU); $n = N_{\text{АЗ}}/N$ – кратность перегрузок топлива; $N_{\text{АЗ}}$ – количество ТВС в активной зоне. Величину $q = Q/M_{\text{АЗ}}$, где $M_{\text{АЗ}} = N_{\text{АЗ}} \cdot M_{\text{ТВС}}$ – масса топлива в активной зоне реактора, называют удельной тепловой напряженностью топлива (для UO_2 около 40 кВт/кгU), а отношение $N M_{\text{ТВС}}/T = Q/B = P$ представляет собой потребность реактора в топливе (кг/сут или кг/г. в зависимости от используемой размерности B). Как следует из рис. 1, представляющего результаты расчета $N(T, B)$ по формуле (1), в 12-месячной кампании реактора ($T \approx 330$ сут) при перегрузке извлекается 30–50 ТВС в зависимости от заданной глубины выгорания, а в 24-месячном цикле ($T \approx 680$ сут) извлекается свыше 70-ти ТВС.

Во-вторых, еще в 1950-х гг. было введено понятие идеального режима перегрузок топлива, в котором подпитка реактора свежим топливом осуществляется микродозами с перемешиванием по всему объему активной зоны [1, 7, 8]. При кратности перегрузок n достигаемое выгорание B меньше идеального B_{∞} согласно выражению [1, 7, 8]

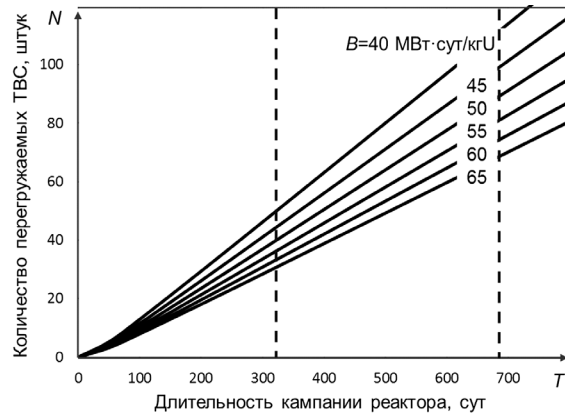


Рис. 1. Зависимость количества перегружаемых ТВС (N , шт.) от длительности кампании реактора (T , сут) и глубины выгорания топлива (B , МВт·сут/кгU) при установленной тепловой мощности реактора $Q = 3200$ МВт, массе топлива в каждой ТВС $M_{\text{ТВС}} = 470$ кгU, количестве ТВС в активной зоне $N_{\text{Аз}} = 163$ и максимальном теоретическом $K_{\text{ИУМ}} = T/(T + \Delta T)$, где $\Delta T = 32$ сут – период простоя реактора для перегрузки и ремонта. Расчет по формуле (1). Штриховые вертикальные линии – границы реальных длительностей работы реактора до перегрузки в 12- и 24-месячных циклах

$$B(n) = B_{\infty} n/(n + 1). \quad (2)$$

Обычно $n = 3-5$, поэтому выгорание составляет 75–83% от идеального.

Исключая n из формул (1) и (2), получаем зависимость выгорания от тепловой напряженности топлива и длительности кампании реактора в виде разности

$$B = B_{\infty} - qT. \quad (3)$$

В-третьих, глубину выгорания можно выразить через массу сгоревших нуклидов за кампанию реактора. Поскольку произведенная за период кампании реактора тепловая энергия $Q = \Delta M_f (E_f/m_f)$ прямо пропорциональна массе сгоревших ядер ΔM_f , практически равной массе продуктов деления, то выражение (1) для глубины выгорания топлива можно привести к виду

$$B = (\Delta M_f/M_5)(M_5/M_T)(E_f/m_f) = (E_f/m_f) (\Delta M_f/M_5)x. \quad (4)$$

В полученном выражении (4) $M_T = N \cdot M_{\text{ТВС}}$ – масса выгружаемого при перегрузке реактора топлива; M_5 – масса урана-235 в свежем топливе, загружаемом в реактор взамен отработавшего в течение кампании реактора; $x = M_5/M_T$ – обогащение свежего топлива; $E_f/m_f = 970$ МВт·сут/кгU – средняя калорийность делящихся нуклидов (урана и плутония) с погрешностью $\pm 1\%$ (при калорийностях урана и плутония согласно данным [16]).

Используя обогащение в %, как это общепринято, выражение (4) можно записать в виде

$$B(\text{МВт·сут/кгU}) = 9,7x(\%)\Delta M_f/M_5. \quad (5)$$

Как видно, глубина выгорания ядерного топлива прямо пропорциональна произведению всего двух переменных параметров: начального обогащения (x , %) и отношения массы сгоревшего топлива (примерно равного массе продуктов деления) к начальной массе делящихся нуклидов (т.е. в свежем загружаемом топливе) $\Delta M_f/M_5$. Сравнивая выражения (5) и (2), получаем очень важное соотношение

$$(\Delta M_f/M_5)(n + 1)/n = B_{\infty} (m_f/E_f)/x. \quad (6)$$

Правая часть этого выражения по определению не зависит от кратности перегрузок. Следовательно, и левая часть не должна зависеть от n , т.е. относительная масса продуктов деления в выгружаемом топливе при перегрузке реактора зависит только от кратности перегрузок $n = N_{\text{Аз}}/N$. Это новый, ранее не известный результат. При-

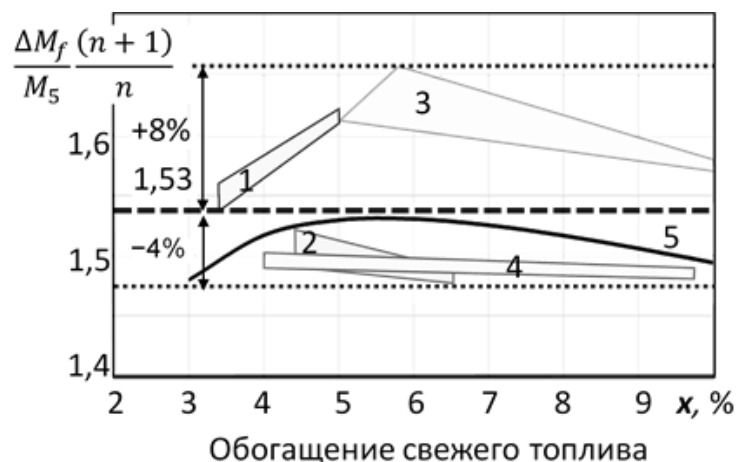


Рис. 2. Зависимость произведения относительной массы продуктов деления (выгоревших нуклидов, $\Delta M_f/M_5$) на функцию кратности перегрузок $(n+1)/n$ при $n = N_{A3}/N$ от обогащения перегружаемых ТВС. Источник: построено авторами по данным сеточных диаграмм [7–10] для реакторов PWR и ВВЭР: 1 – [5], 2 – [6], 3 – [7], 4 – [8], 5 – аппроксимация [8, 9]. Штриховая прямая – расчет по формуле (7). Многоугольники отражают границы сеточных диаграмм, полученных в результате нейтронно-физических расчетов в работах [5–8] для реакторов PWR и ВВЭР

чем, как показано на рис. 2, где приведены результаты нейтронно-физических расчетов выгорания топлива реакторов типа PWR и ВВЭР в широком диапазоне обогащения (3–10%) и кратности перегрузок (1–8) из работ [5–10], обработанные по формулам (5) и (6), левую часть выражения (6) можно считать постоянной величиной 1,53, практически не зависящей ни от обогащения топлива, ни от его выгорания, ни от кратности перегрузок, т.е. можно принять приближенно

$$\Delta M_f/M_5 = 1,53n/(n + 1). \quad (7)$$

Как следует из рис. 2, наибольшие отклонения от зависимости (7) составляют +8,5% и –4%. Разброс множества данных вокруг зависимости (7), не превышающий 8,5%, может быть связан с погрешностями нейтронно-физических расчетов при осреднении величин выгорания и обогащения топлива, поскольку в реальных условиях выгорание топлива неравномерно в активной зоне, применяются ТВС с разным обогащением и даже с распределением обогащения по твэлам в пределах одной ТВС, при перегрузке извлекаются ТВС с разным выгоранием, что требует специального рассмотрения.

Наконец, из выражения (7) при типичных значениях $n=3-5$ следует, что $\Delta M_f/M_5=1,1-1,3$, т.е. сгораемая масса делящихся нуклидов (масса продуктов деления) превышает на 10–30% исходную массу урана-235 в свежем топливе за счет выгорания образующегося плутония, что подтверждается экспериментальными данными [2] (табл. 1).

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СЕТОЧНЫХ ДИАГРАММ ВЫСОКОГО ВЫГОРАНИЯ УРАНОВОГО ТОПЛИВА

Подстановка полученного соотношения (7) в выражение (5) с учетом (1) и (2) дает искомую аналитическую взаимосвязь выгорания топлива с его с обогащением, кратностью перегрузок, тепловой напряженностью и кампанией реактора в виде

$$B(\text{МВт}\cdot\text{сут}/\text{кгU}) = 14,8x(\%)n/(n + 1); \quad B_\infty = 14,8x(\%). \quad (8)$$

$$B(\text{МВт}\cdot\text{сут}/\text{кгU}) = 14,8x(\%) - q(\text{кВт}/\text{кгU})\cdot T(\text{сут})/1000. \quad (9)$$

Расчеты выгорания по формулам (8) и (9) удовлетворительно описывают «сеточные диаграммы» работ [5–9]. На рисунке 3 показано, что линейная зависимость выгорания от обогащения топлива (8) в первом приближении удовлетворительно обоб-

Таблица 1

Влияние обогащения уранового топлива и глубины его выгорания на массу продуктов деления в ОЯТ реактора PWR при перегрузке четверти активной зоны. Источник: расчет авторов величин $\Delta M_f/M_5$ по формуле (4) и $(\Delta M_f/M_5)(n+1)/n$ по формуле (7) из данных [4]

Среднее обогащение по урану-235 загружаемого топлива x , %	Средняя глубина выгорания выгружаемого топлива B , МВт·сут/кгU	Относительная масса продуктов деления в выгружаемом топливе, $\Delta M_f/M_T$, кг/т т.м.	Отношение массы продуктов деления в ОЯТ к массе U-235 в свежем топливе $\Delta M_f/M_5$	Параметр $(\Delta M_f/M_5)(n+1)/n$
3,8	44,9	47	1,23	1,54
4,5	54,3	57	1,27	1,59
5,4	64,1	67	1,24	1,55
6,5	73,8	78	1,2	1,50
7,5	84,0	89	1,19	1,49
8,5	93,7	99	1,16	1,45

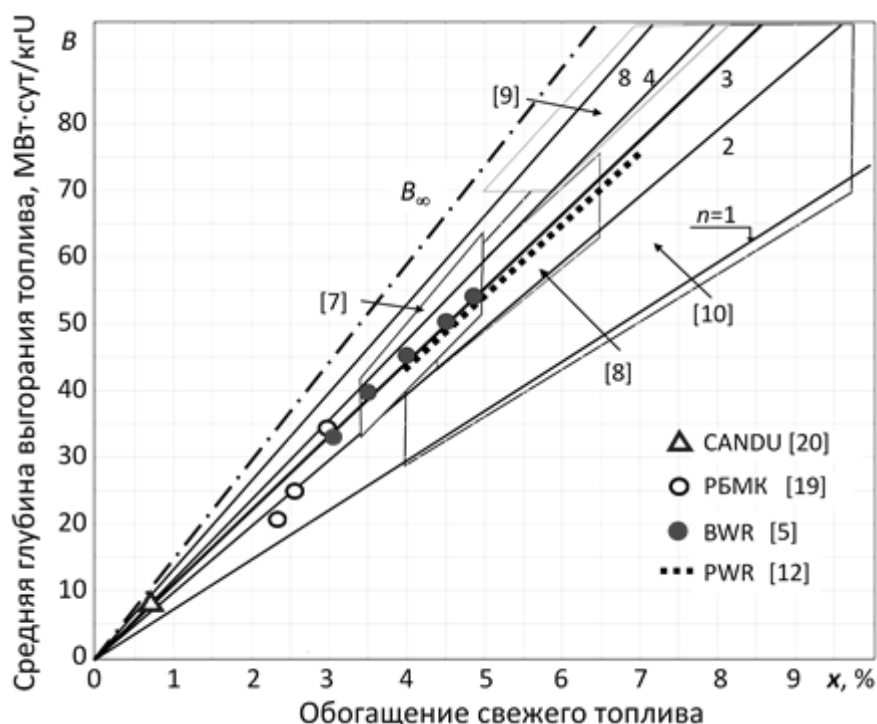


Рис. 3. Взаимосвязь средней глубины выгорания (B , МВт·сут/кгU), обогащения (x , %) и кратности перегрузок ($n \geq 1$) уранового топлива разных реакторов на тепловых нейтронах. Источник: построено авторами по экспериментальным и расчетным данным из [2–8, 17, 18]. Прямые линии – расчет по формуле (8) для разных $n=1-8$. Многоугольники отражают границы сеточных диаграмм, полученных в результате нейтронно-физических расчетов в работах [5–8] для реакторов PWR и ВВЭР

щает данные практически для всех типов тепловых реакторов, включая CANDU, РБМК, ВВЭР, PWR и ВВЭР (с топливом UO_2), т.е. в широком диапазоне параметров топливно-го цикла: обогащение от 0,711 до 10 % и кратность перегрузки от $n=1$ до 8 независи-

мо от тепловой напряженности топлива. Штрихпунктирная прямая, представляющая идеальное выгорание (вторая из формул 8), расположена выше всех расчетных и экспериментальных данных, как и следовало ожидать.

Как следует из выражения (9) и рис. 4, при заданных величинах обогащения свежего топлива (x) и кампании реактора (T) выгорание снижается с ростом тепловой напряженности топлива. Сеточные диаграммы для выгорания топлива строят путем совмещения рис. 3 и 4.

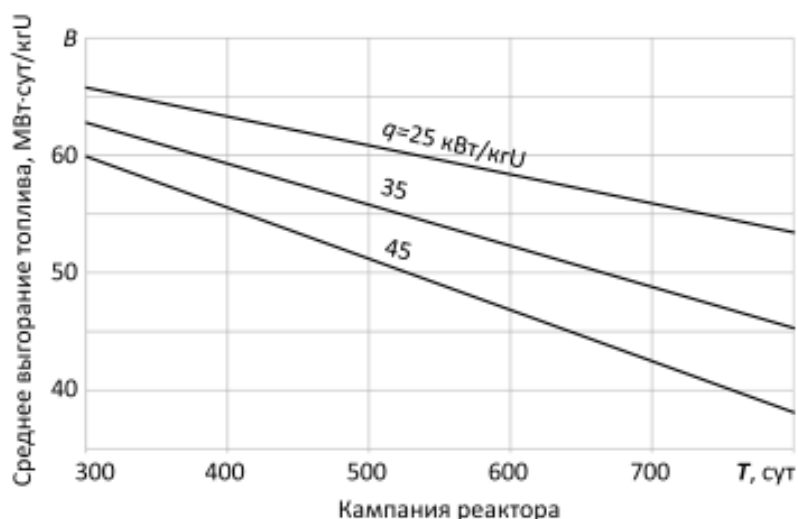


Рис. 4. Зависимость среднего выгорания топлива (B , МВт-сут/кгU) от кампании реактора типа PWR (T , суток) и тепловой напряженности топлива ($q=25-45$ кВт/кгU) при обогащении $x=4,95\%$. Расчет по формуле (9)

Таким образом, впервые полученные в работе выражения (7)–(9) позволяют аналитически оценивать зависимость глубины выгорания ядерного топлива от его обогащения, кратности перегрузок (или числа выгружаемых ТВС), кампании реактора (периода времени между перегрузками) и тепловой напряженности топлива, что необходимо для построения сеточных диаграмм как удобного инструмента выбора параметров топливного цикла.

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ НА ТОПЛИВНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ ПРИВЕДЕННОЙ СТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ АЭС

Топливная составляющая Y_T (руб./кВт-ч) эксплуатационных затрат АЭС включает в себя затраты на производство ТВС и обращение с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и пропорциональна потребности реактора в топливе P (кг/г.)

$$Y_T = P(C_{\text{ТВС}} + C_{\text{ОЯТ}}) = PC_{\text{ЯТЦ}} \quad (10)$$

Величину $C_{\text{ЯТЦ}} = C_{\text{ТВС}} + C_{\text{ОЯТ}}$ можно назвать стоимостью ядерного топливного цикла (открытого или закрытого) в расчете на 1 кг урана (или тяжелых металлов) в топливе (руб./кг т.м.), включающей в себя стоимость ТВС $C_{\text{ТВС}} = C_x + C_f$ и стоимость обращения с ОЯТ $C_{\text{ОЯТ}}$. Величины C_x и C_f – стоимость обогащенного урана и фабрикация ТВС; P – среднегодовая потребность реактора в топливе (кг/г.), определяемая отношением среднегодовой тепловой мощности реактора Q (МВт) к средней глубине выгорания топлива B (МВт-сут/кг) согласно (1):

$$P = 365 \cdot Q / B = E / (24\eta B), \quad (11)$$

где $E = W \cdot \Delta t \cdot \text{КИУМ}$ – среднегодовое количество проданной электроэнергии (МВт-ч/г.); W – установленная электрическая мощность энергоблока, МВт; Δt – чис-

ло часов в году (8760 час/г.); $Q=W \cdot \text{КИУМ}/\eta$ – тепловая мощность реактора при КПД-брутто η . В выражениях (11) числовые коэффициенты 365 и 24 учитывают число суток в году и часов в сутках в соответствии с общепринятыми размерностями исходных величин. Так для современных реакторов типа PWR при типичных параметрах $W = 1200$ МВт, $\eta = 34\%$, $B = 55$ МВт·сут/кгU, КИУМ = 0,85 ежегодная потребность в топливе составляет $P \approx 20$ т/г.

Отношение топливных затрат к проданной электроэнергии Y_T/E представляет собой топливную составляющую стоимости электроэнергии (приведенной стоимости электроэнергии $LCOE$ – Levelized Cost Of Electricity) [19]:

$$LC_T = Y_f/E = P(C_{TBC} + C_{OЯТ})/E = (C_{TBC} + C_{OЯТ})/(24\eta B). \quad (12)$$

Если выгорание измеряется в МВт·сут/кгU, то LC_T выражается в единицах руб./МВт·ч.

Для оценки затрат на производство заменяемых ТВС с массой топлива P (кг/г.) и обогащением x нужно знать потребляемые при этом массу природного урана F (кг/г.) и работу разделения изотопов урана R (ЕРР/г.), определяемые стандартными выражениями [19]

$$F = P(x - y)/(c - y); \quad R = P\Phi(x) + D\Phi(y) - F\Phi(c); \quad (13)$$

$$\Phi(z) = (1 - 2z)\ln(1/z - 1); \quad z = x, y, c, \quad (14)$$

где $D = (F - P)$ – масса отвалного урана с массовой концентрацией y урана-235, $c = 0,711\%$ – массовая концентрация урана-235 в природном уране; $\Phi(z)$ – разделительный потенциал. В итоге для себестоимости ТВС (в расчете на 1 кг т.м.), включающей в себя затраты на покупку природной окиси-закиси урана и ее конверсию в гексафторид урана, на работу разделения изотопов урана, утилизацию отвала и фабрикацию ТВС, получаем выражение

$$C_{TBC} = C_F(x - y)/(c - y) + C_R[\Phi(x) + \Phi(y)(x - c)/(c - y) - \Phi(c)(x - y)/(c - y)] + C_D(x - c)/(c - y) + C_\Phi, \quad (15)$$

в котором $C_F = C_{U308} + C_{UF6}$ – цена гексафторида природного урана; C_{U308} , C_{UF6} , C_D – цена природного урана (в форме закиси-окиси), конверсии закиси-окиси в гексафторид урана и утилизации обедненного гексафторида урана (отвала) в расчете на 1 кг металлического урана (руб./кг); C_R – цена работы разделения (руб./ЕРР). Из выражения (15) следует, что при заданном обогащении топлива x и определенных ценах (C_F , C_R , C_D , C_Φ) себестоимость ТВС зависит только от глубины отвала разделительного производства y , причем существует оптимальная глубина отвала y_0 , при которой себестоимость ТВС минимальна. Величина y_0 зависит только от отношения цен $(C_F + C_D)/C_R$ [19]. Так при $(C_F + C_D)/C_R = 1$ имеем $y_0 = 0,228\%$; при $(C_F + C_D)/C_R > 1$ выгодно экономить на природном уране, поэтому $y_0 < 0,228\%$; при $(C_F + C_D)/C_R < 1$ выгодно экономить на работе разделения, поэтому $y_0 > 0,228\%$. По данным АО «Атомэнергпром» [20] за последние пять лет рыночные котировки на природный уран (в форме гексафторида) приблизительно вдвое превышают котировки на работу разделения, что дает оптимальную глубину отвала $y_0 = 0,16-0,19\%$. В 2011 г. рыночные цены на уран и обогащение находились на своих исторических пиках: $C_{U308} = 148$ \$/кг, $C_R = 149$ \$/ЕРР [20] (табл. 2). После аварии на АЭС «Фукусима» ядерная энергетика во всем мире оказалась под серьезным давлением, что привело к долгосрочному падению рыночных цен, которые достигли минимума в 2017–2018 гг.: $C_{U308} = 57$ \$/кг, $C_R = 36$ \$/ЕРР (табл. 2). Из выражения (15) следует также, что себестоимость обогащенного урана почти линейно возрастает с ростом обогащения топлива, а значит, и с ростом глубины его выгорания.

Таблица 2

Историческая динамика рыночных цен на природный уран, услуги по конверсии и обогащению урана, расчетной себестоимости обогащенного урана ($x = 4,95\%$). Источник: составлено авторами на основе данных [20]

Параметр	2011 г.	2018 г.	2021 г.
Цена окиси-закиси урана $C_{U_2O_8}$, \$/кгU	148	65	91
Цена конверсии C_{UF_6} , \$/кгU	11	10	19
Цена гексафторида урана C_F , \$/кгU	159	75	110
Цена работы разделения C_R , \$/EPP	149	36	55
Оптимальная глубина отвала y_0 , %	0,220	0,155	0,158
Себестоимость обогащенного урана C_x , \$/кгU	2772	1002	1496

Таблица 3

Влияние глубины выгорания уранового топлива на стоимостные характеристики ЯТЦ. Источник: составлено авторами по данным [2] для высоких и низких рыночных цен на природный уран и работу разделения по данным табл. 2

Глубина выгорания B , МВт·сут/кгU		45	55	65	75	85	95
Стоимость фабрикация ТВС C_Φ , \$/кгU		300	330	360	390	420	450
Стоимость транспортировки ОЯТ $C_{ТР}$, \$/кгU		230	280	330	380	430	480
Стоимость инкапсуляции и удаления ОЯТ $C_{уд}$, \$/кгU		610	745	880	1015	1150	1290
Стоимость обращения с ОЯТ $C_{OЯТ} = C_{ТР} + C_{уд}$, \$/кгU		840	1025	1210	1395	1580	1770
Обогащение топлива* x , %		3,9	4,6	5,6	6,5	7,3	8,2
Себестоимость обогащенного урана** C_x , \$/кгU	2011 г.	2090	2545	3200	3800	4330	4940
	2018 г.	760	920	1150	1360	1540	1750
Себестоимость ТВС $C_{ТВС} = C_x + C_\Phi$, \$/кгU	2011 г.	2390	2875	3560	4190	4750	5390
	2018 г.	1060	1250	1510	1750	1960	2200
Топливная составляющая стоимости электроэнергии АЭС***, LC_T , \$/МВт·ч	2011 г.	8,8	8,7	9,0	9,1	9,1	9,2
	2018 г.	5,2	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
* Расчет по формуле (8) при $n = 3,63$							
** Расчет по формуле (16) при $C_D = 7$ \$/кгU							
*** Расчет по формуле (13) при КПД АЭС $\eta = 34\%$							

Стоимости фабрикация ТВС и обращения с ОЯТ в меньшей степени определяются рыночными котировками, но могут зависеть от глубины выгорания (обогащения) топлива. Так по данным [2], приведенным в табл. 3, при увеличении глубины выгорания топлива PWR с 35 до 95 МВт·сут/кгU стоимость фабрикация ТВС C_Φ возрастает с 300 до 450 \$/кгU, а стоимость обращения с ОЯТ $C_{OЯТ}$ – с 840 до 1770 \$/кгU практически пропорциональна выгоранию. Такая закономерность объясняется ростом затрат на фабрикацию ТВС в связи с увеличением уровня радиоактивности обогащенного урана и затрат на обращение с ОЯТ с повышенным содержанием продуктов деления в ОЯТ с высокой глубиной выгорания. Если принять эти данные, то, согласно расчетам

по вышеприведенным формулам (табл. 3), топливная составляющая стоимости электроэнергии АЭС слабо изменяется в диапазоне 8,7–9,2 \$/МВт·ч при высоких рыночных ценах на природный уран и работу разделения (2011 г.) и в диапазоне 5,1–5,2 \$/МВт·ч при низких рыночных ценах (2018 г.). Наблюдается слабо выраженный минимум стоимости электроэнергии в окрестности выгорания 55 МВт·сут/кгU. Такая закономерность обусловлена практически линейной зависимостью числителя формулы (12) от выгорания топлива (см. табл. 3).

Важно отметить, что, согласно приведенным результатам, рыночные цены на природный уран и работу разделения оказывают существенно большее влияние на топливную составляющую стоимости электроэнергии по сравнению с влиянием выгорания топлива (и, соответственно, обогащения топлива).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены новые аналитические выражения (8), (9) для оценки глубины выгорания ядерного топлива в зависимости от его обогащения, периодичности перегрузок топлива, длительности кампании реактора и удельной теплонапряженности топлива в широком диапазоне изменения этих параметров (без учета ограничений со стороны физико-химических процессов при высоких выгораниях) применительно к тепловым реакторам. Показано, что глубина выгорания ядерного топлива прямо пропорциональна произведению всего двух параметров: обогащения загружаемого при перегрузке топлива и отношения массы сгоревшего топлива (\approx массы продуктов деления) к массе делящихся нуклидов в загружаемом топливе согласно выражению (4). Причем последнее отношение ($\Delta M_f/M_5$) зависит практически только от кратности перегрузок и изменяется в пределах 1,0–1,5. Полученные аналитические выражения для оценки выгорания удобны применительно к вариативным экономическим, теплофизическим, прочностным и иным расчетам топливных загрузок реактора с различными длительностями циклов (12–24 мес.) и обогащениями топлива (до 10%), включая разрабатываемое толерантное топливо.

Показано, что глубина выгорания топлива практически линейно увеличивается с ростом обогащения в рассмотренном диапазоне от 0,7 до 10% при заданной кратности перегрузок, согласно выражению (8), и линейно уменьшается с ростом кампании реактора (периода времени между перегрузками) при заданном обогащении топлива согласно выражению (9).

Показано также, что топливная составляющая стоимости электроэнергии АЭС с реакторами типа PWR слабо чувствительна к изменению выгорания топлива, но гораздо более чувствительна к изменению рыночных цен на природный уран, конверсию и работу разделения (т.е. к изменению стоимости обогащенного урана).

Литература

1. *Горохов А.К., Драгунов Ю.Г., Лунин Г.Л.* Обоснование нейтронно-физической и радиационной частей проектов ВВЭР: монография. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 496 с. ISBN 5-94628-189-5.
2. Very High Burn-ups in Light Water Reactors. – OECD/NEA, 2006. – 138 p. ISBN 92-64-02303-8.
3. Categorization of used nuclear fuel inventory in support of a comprehensive national nuclear fuel cycle strategy. – Tennessee: Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2012. – 98 p.
4. Impact of High Burnup Uranium Oxide and Mixed Uranium–Plutonium Oxide Water Reactor Fuel on Spent Fuel Management. IAEA Nuclear Energy Series. No. NF-T-3.8. – Vienna: IAEA, 2011. – 99 p.
5. *Jatuff F.E.* High Burnup Fuel Technical and Economical Lessons Learned at SWISS Nuclear Power Plants / Proceedings of a Technical Meeting Held in Buenos Aires, 26–29 November 2013. – Vienna, IAEA, 2016. – PP. 125–138.

6. Семченков Ю., Павловичев А., Чибиняев А. Близость к сценарию. Перспективы эволюционного развития топлива ВВЭР // Атомная энергетика России. – 2011. – № 10. – С. 25–29.
7. Nuclear fuels. A Nuclear Energy Division Monograph. Commissariat a l'energie atomique, Paris, 2009. – 150 p.
8. Zhiwen Xu. Design Strategies for Optimizing High Burnup Fuel in Pressurized Water Reactors / Ph.D. dissertation // Massachusetts Institute of Technology, 2003. – 305 p.
9. Future of Nuclear Power. An Interdisciplinary MIT Study. – Massachusetts Institute of Technology, 2003. – 180 p. ISBN 0-615-12420-8.
10. Burns J.R., Hernandez R., Terrani R.A., Nelson A.T., Brown N.B. Reactor and fuel cycle performance of light water reactor fuel with ²³⁵U enrichments above 5%. // Annals of Nuclear Energy. – 2020. – № 142. – PP. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107423>.
11. State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. – OECD/NEA, 2018. – 372 p.
12. Ian Younker, Massimiliano Fratoni. Neutronic and Economic Evaluation of Accident Tolerant Fuel Concepts for Light Water Reactor // Advances in Nuclear Fuel Management V (ANFM 2015). – Topical Meeting ANFM. – 2015. – P. 1-13.
13. Семенов Е.В., Харитонов В.В. Микроэкономика повышения безопасности АЭС на основе толерантного топлива // Микроэкономика. – 2021. – № 5. – С. 49-61. DOI: <https://doi.org/10.33917/mic-5.100.2021.49-61>.
14. Курьин А. В., Киркин А. М., Каримов А. З., Маковский С. В. О подходах к регулированию безопасности применения толерантного ядерного топлива // Ядерная и радиационная безопасность. – 2021. – № 4 (102). – С. 14–23.
15. Bin Zhang, Pengcheng Gao, Tao Xu, Miao Gui, Jianqiang Shan. Performance evaluation of Accident Tolerant Fuel under station blackout accident in PWR nuclear power plant by improved ISAA code // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – V. 54. – PP. 2475–2490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.01.024>.
16. Глушков Е. С., Демин В. Е., Пономарев-Степной Н. Н., Хрулев А. А. Тепловыделение в ядерном реакторе. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 160 с.
17. Канальный ядерный реактор РБМК / Под ред. Ю. М. Черкашова. – ГУП НИКИЭТ, 2006. – 632 с.
18. Seung-Woo, Lee, Dong-Keun Cho, Jong-Won Choi, Heui-Joon Choi. Burnup and Source Term Analyses for a CANDU Spent Fuel // Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting. – 2007. – P. 183–184.
19. Харитонов В. В., Косолапова Н. В., Ульянин Ю. А. Прогнозирование эффективности инвестиций в многоблочные электростанции // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2018. – Т. 7. – № 6. – С. 545–562.
20. Годовые отчеты АО «Атомэнергопром» за 2011–2021 гг. Электронный ресурс: <https://atomenergoprom.ru/ru/invest/annual/> (дата доступа 16.04.2023).

Поступила в редакцию 18.04.2023 г.

Авторы

Семенов Евгений Вадимович, старший преподаватель,

E-mail: evsmv@bk.ru

Харитонов Владимир Витальевич, профессор, доктор физико-математических наук,

E-mail: vvkharitonov@mephi.ru

UDC: 621.039.54, 621.039.516.22

Analytical Dependence of the Burnup on the Enrichment of Prospective Fuel and the Parameters of the Fuel Campaign of Reactors

Semenov E.V., Kharitonov V.V.

MEPhI,

31 Kashirskoye Sh., 115409 Moscow, Russia

ABSTRACT

The paper is devoted to the definition of an analytical expression for estimating the burnout depth of nuclear fuel depending on its enrichment level, the periodicity of fuel overloads, heat intensity and the duration of the time period between fuel overloads (reactor campaign) in a wide range of changes in key parameters for different types of thermal neutron reactors. The analytical expressions obtained in the work for the burnout depth are compared with numerous neutron physics calculations and experimental data from different authors for uranium fuel enrichment up to 9%. Calculations of the fuel share of the cost of electricity of nuclear power plants with PWR type reactors have been performed and its sensitivity to changes in the depth of burnout and enrichment of fuel, the frequency of its overloads, as well as to market prices for natural uranium, conversion, enrichment, fabrication of fuel assemblies and SNF handling has been determined.

Key words: NPP, nuclear fuel burnup, enrichment, frequency of overload of fuel assemblies, reactor campaign, fuel share of the cost of electricity.

For citation: Semenov E.V., Kharitonov V.V. Analytical Dependence of the Burnup on the Enrichment of Prospective Fuel and the Parameters of the Fuel Campaign of Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 3, pp. 94-105; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.08> (in Russian).

REFERENCES

1. Gorokhov A.K., Dragunov Yu.G., Lunin G.L., Novikov A.N., Cofin V.I., Anan'ev Ju.A. Validation of the Neutron-Physical and Radiation Parts of VVER Designs. Moscow. IKTs Akademkniga Publ., 2004, 496 p. (in Russian).
2. Very High Burn-ups in Light Water Reactors. OECD/NEA, 2006, 138 p. ISBN 92-64-02303-8.
3. Categorization of used nuclear fuel inventory in support of a comprehensive national nuclear fuel cycle strategy. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2012, 98 p.
4. Impact of High Burnup Uranium Oxide and Mixed Uranium-Plutonium Oxide Water Reactor Fuel on Spent Fuel Management. IAEA Nuclear Energy Series. No. NF-T-3.8. IAEA, 2011, 99 p.
5. Jatuff F.E. High Burnup Fuel Technical and Economical Lessons Learned at SWISS Nuclear Power Plants. Proc. of a Technical Meeting Held in Buenos Aires, 26–29 November 2013. Vienna. IAEA Publ., 2016, pp. 125–138.
6. Semchenkov Yu., Pavlovich A., Chibinyaeva A. Proximity to the scenario. Prospects for evolutionary development of VVER fuel. *Atomnaya energetika Rossii*. 2011, no. 10, pp. 25–29 (in Russian).
7. Nuclear fuels. A Nuclear Energy Division Monograph. Commissariat a l'energie atomique, Paris, 2009. – 150 p.
8. Zhiwen Xu. Design Strategies for Optimizing High Burnup Fuel in Pressurized Water Reactors / Ph.D. dissertation // Massachusetts Institute of Technology, 2003. – 305 p.

9. Future of Nuclear Power. An Interdisciplinary MIT Study. – Massachusetts Institute of Technology, 2003. – 180 p. ISBN 0-615-12420-8.
10. Burns J.R., Hernandez R., Terrani R.A., Nelson A.T., Brown N.B. Reactor and fuel cycle performance of light water reactor fuel with ^{235}U enrichments above 5%. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2020, – no. 142, pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107423>.
11. State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. – OECD/NEA, 2018. – 372 p.
12. Ian Younker, Massimiliano Fratoni. Neutronic and Economic Evaluation of Accident Tolerant Fuel Concepts for Light Water Reactor // *Advances in Nuclear Fuel Management V (ANFM 2015)*. – Topical Meeting ANFM. – 2015, – pp. 1– 13.
13. Semenov E.V., Kharitonov V.V. Microeconomics of improving the safety of nuclear power plants based on using of accident tolerant fuel. *Mikroekonomika*. 2021, no. 5, pp. 49–62 (in Russian).
14. Kuryndin A.V., Kirkin A.M., Karimov A. Z., Makovsky S. V. On approaches to regulating the safety of the use of tolerant nuclear fuel. *Nuclear and radiation safety*. 2021, no. 4 (102), pp. 13-23 (in Russian).
15. Bin Zhang, Pengcheng Gao, Tao Xu, Miao Gui, Jianqiang Shan. Performance evaluation of Accident Tolerant Fuel under station blackout accident in PWR nuclear power plant by improved ISAA code // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2022. – v.54, – pp. 2475-2490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.01.024>.
16. Glushkov E.S., Demin V.E., Ponomarev-Stepnoj N.N., Hrulev A.A. Heat generation in a nuclear reactor. *Energoatomizdat Publ*, 1985, 160 p. (in Russian).
17. RBMK channel nuclear reactor. Moscow. GUP NIKIET Publ., 2006, 632 p. (in Russian)
18. Seung-Woo, Lee, Dong-Keun Cho, Jong-Won Choi, Heui-Joon Choi. Burnup and Source Term Analyses for a CANDU Spent Fuel. *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*. 2007, pp. 183 – 184.
19. Kharitonov V.V., Kosolapova N.V., Uljanin Yu.A. Analytical Forecasting of Investment Performance in Multi-Unit Power Plants. *Bulletin of the NRNU MEPHI*, 2018, v. 7, no. 6, pp. 545–562 (in Russian).
20. Annual reports of JSC Atomenergoprom for 2011–2021. Available at: <https://atomenergoprom.ru/ru/invest/annual/> (accessed Apr.16, 2023) (in Russian).

Authors

Evgeny V. Semenov, Senior Lecturer,

E-mail: evsmv@bk.ru

Vladimir V. Kharitonov, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: vvkharitonov@mephi.ru