

Определение оптимальной глубины выгорания и энергонапряженности ядерного горючего методом расчетных затрат *

Ю. И. Корякин, В. В. Батов, В. Г. Смирнов

В статье на основании применения понятия расчетных затрат дается методика определения экономической эффективности использования ядерного горючего в реакторе. Полученное выражение для топливной составляющей расчетных затрат на производство электроэнергии позволяет проследить совокупное влияние на экономику использования ядерного горючего как стоимости топливной загрузки, так и топливной составляющей себестоимости электроэнергии. На примере реактора типа реактора Белоярской АЭС показано использование данной методики для определения экономического оптимума как глубины выгорания ядерного горючего, так и его энергонапряженности.

Одним из важнейших экономических показателей атомных электростанций является себестоимость отпускаемой электроэнергии, которая вместе с удельной стоимостью АЭС определяет ее экономическую эффективность [1, 2].

В АЭС большой мощности, как известно, топливная составляющая стоимости электроэнергии в настоящее время занимает значительную долю ее полной стоимости и достигает 30—50%. Поэтому всякое снижение топливной составляющей приводит к снижению полной стоимости электроэнергии и повышению экономической эффективности АЭС. Топливная загрузка — наиболее гибкая и динамическая часть реактора, экономические характеристики которой могут непрерывно изменяться и улучшаться не только в течение всего срока эксплуатации реактора, но и в течение его кампании. Один из путей, ведущих к снижению топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС — увеличение глубины выгорания ядерного горючего. Однако достижение этого только за счет увеличения длительности кампании (при постоянной энергонапряженности реактора) может привести к неоправданно длительной задержке ядерного горючего в реакторе (а следовательно, к увеличению длительности топливного цикла) и увеличению стоимости топливной загрузки, вызываемому более высоким начальным обогащением горючего. С другой стороны, при малых глубинах выгорания в величине топливной составляющей неоправданно увеличивается доля

расходов на изготовление твэлов. Следовательно, можно ожидать существования экономического оптимума по глубине выгорания ядерного горючего. В данном случае отыскание оптимума облегчается тем, что при заданных конструктивных и тепловых параметрах реактора глубина выгорания ядерного горючего с хорошей степенью точности является независимым параметром, так как расходы по обеспечению достаточной прочности оболочки твэлов и необходимого запаса компенсирующей способности системы регулирования реактора малы по сравнению со стоимостью топливной загрузки. Учет фактического соотношения указанных экономических факторов приводит лишь к некоторому усложнению расчетов и не меняет общего методического подхода.

По определению топливная составляющая себестоимости электроэнергии представляет собой отношение полных затрат топливного цикла к выработанной полезной электроэнергии

$$C_T = \frac{100}{24} \cdot \frac{G \sum_i c_i}{N_{эл} T_K} \text{ коп/квт} \cdot \text{ч}, \quad (1)$$

где G — загрузка горючего, кг U ; c_i — затраты i -го звена топливного цикла, руб/кг U ; N_T — полезная электрическая мощность, квт; T_K — длительность кампании, сутки.

Поскольку средняя глубина выгорания выражается через

$$B = \frac{N_T T_K}{G} \text{ квт} \cdot \text{сутки/кг } U$$

(или $M \text{ квт} \cdot \text{сутки/т } U$),

где N_T — тепловая мощность реактора, то формулу (1) удобнее записать в виде

$$C_T = \frac{100}{24} \cdot \frac{\sum_i c_i}{B \cdot \eta} \text{ коп/квт} \cdot \text{ч}, \quad (2)$$

где η — к. п. д. нетто атомной электростанции. В формуле (2) среди членов суммы $\sum_i c_i$ лишь разница стоимости горючего начального и конечного обогащений примерно прямо пропорциональна средней величине B (это справедливо, вообще говоря, для реакторов на обогащенном

* Публикуется в порядке обсуждения.

уране, в которых реактивность в течение кампании уменьшается почти точно по линейному закону). Поскольку остальные члены $\sum_1 c_i$ слабо зависят от величины B , то с увеличением последней топливная составляющая уменьшается быстро.

Применение выражения только для топливной составляющей стоимости электроэнергии не позволяет оценить экономическую эффективность использования ядерного горючего, поскольку в понятии топливной составляющей не учитывается эффективность затрат на ядерное горючее.

Для определения оптимальной глубины выгорания воспользуемся понятием расчетных затрат [1, 2], что позволяет связать топливную составляющую и экономическую эффективность капиталовложений в топливную загрузку. В таком случае выражение для топливной составляющей расчетных затрат на производство электроэнергии запишется в виде

$$З_{\tau} = C_{\tau} + \frac{pK_{\tau,з}}{8760 \cdot \varphi \cdot N_{эл}} \text{ коп/квт} \cdot \text{ч}; \quad (3)$$

$K_{\tau,з}$ — стоимость топливной загрузки, руб.; φ — коэффициент использования установленной мощности АЭС; 8760 — число часов в году; p — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, %/год (величина, обратная нормативному сроку окупаемости, принимаемому единым для всех расчетов в энергетике и равному восьми годам, что соответствует величине $p = 12,5\%$ /год). Нетрудно видеть, что в общем случае

$$З_{\tau} = \frac{100}{24} \cdot \frac{\sum_1 c_i (1 + pT_i)}{B \cdot \eta}, \quad (4)$$

где T_i — время пребывания горючего в i -м звене топливного цикла.

Время топливного цикла складывается из времени пребывания горючего в реакторе (реакторное время $T_p = \frac{T_k}{\varphi}$) и времени пребывания горючего в остальных частях топливного цикла (времени внешнего топливного цикла), причем с изменением глубины выгорания горючего (при постоянной энергонапряженности) меняется лишь реакторное время, а время внешнего топливного цикла остается без изменения. Поэтому целесообразно оперировать лишь реакторным временем, зафиксировав время внешнего топливного цикла. (Кроме того, при глубоких

выгораниях ядерного горючего часть внешнего цикла может вообще отсутствовать, так как в этом случае экономически оправданным может быть режим использования горючего без регенерации с долговременным его хранением, т. е. режим работы «на выброс».) Часть топливной составляющей расчетных затрат на единицу выработанной полезной электроэнергии, связанная со временем пребывания горючего во внешнем топливном цикле, учитывается при этом в стоимостях соответствующих частей внешнего топливного цикла. (В идеальном случае время внешнего топливного цикла должно стремиться к нулю.) Поскольку далее стоимость транспортировки и химической переработки отработанного горючего мало зависит от глубины его выгорания, то с точностью до постоянной величины* топливную составляющую расчетных затрат на единицу полезной выработанной электроэнергии после некоторых преобразований можно выразить следующим образом:

$$З_{\tau} = C_{\tau} + \frac{pT_k}{2B\eta\varphi} (c_1 + c_2 + c_3), \quad (5)$$

где c_1 — стоимость свежего горючего, руб/кг U; c_2 — стоимость отработанного горючего, руб/кг U; c_3 — стоимость изготовления твэлов, руб/кг U.

Во втором члене правой части выражения (5) в качестве средней стоимости горючего за кампанию принято среднее арифметическое значение стоимостей свежего и отработанного горючего. Такое приближение достаточно оправдано, поскольку выгорание горючего в реакторах на обогащенном уране меняется в зависимости от времени почти точно по линейному закону. Средняя стоимость изготовления горючего, отработанного в реакторе кампанию T_k , принята равной половине его первоначальной стоимости изготовления c_3 , т. е. ценностью осадки твэлов (материалов оболочки, конструктивных деталей и т. д.) после выгрузки из реактора пренебрегается. Строго говоря, оставшийся уран и образовавшийся плутоний, разумеется, не являются единственными ценными материалами облученных твэлов; кроме них после регенерации горючего возможно полезное использование образовавшихся трансплутониевых элементов, осколков деления, а также повторное использование ряда конструктивных деталей тепловыделяющих сборок, головок каналов, материалов оболочки и т. д. Учет все-

* В случаях, когда стоимость отработанного горючего велика, этим членом пренебрегать нельзя.

го этого при конкретном расчете экономических показателей АЭС приводит к некоторому дополнительному снижению топливной составляющей себестоимости электроэнергии.

Зависимость (5) позволяет оценить влияние глубины выгорания горючего и длительности кампании (т. е. задержки горючего в реакторе) на экономику использования различных видов горючего. На рис. 1 показана относительная зависимость топливной составляющей расчетных затрат для двух видов ядерного горючего

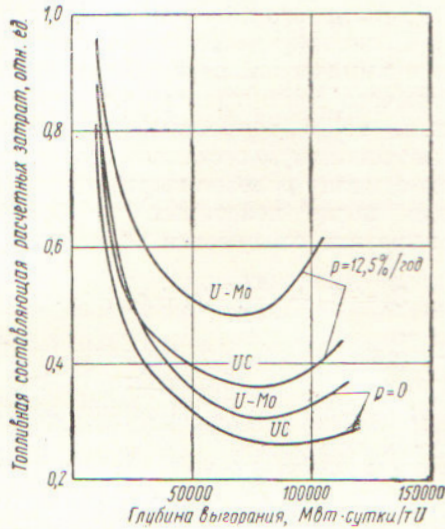


Рис. 1. Изменение топливной составляющей расчетных затрат в зависимости от глубины выгорания ядерного горючего в реакторе типа реактора Белоярской АЭС.

реактора типа реактора Белоярской АЭС (U — Мо и UC) и для различных коэффициентов окупаемости p (нормативного — 12,5% и равного нулю). В последнем случае топливная составляющая расчетных затрат превращается в обычную топливную составляющую себестоимости электроэнергии. Кривые рис. 1 построены по результатам расчетов на электронной машине изотопного состава горючего с учетом частичных перегрузок, принятых согласно работе [3] равными 0,4 загрузки реактора, стоимостей горючего и заводских затрат на изготовление рабочих каналов.

Кривые рис. 1 имеют четко выраженные экономические оптимумы глубин выгорания горючего. При этом оптимумы для кривых с $p = 0$ объясняются характером зависимости стоимости обогащенного урана от процента его обогащения. Из рисунка также следует, что проектируемое в настоящее время значение глубины выгорания для реактора Белоярской АЭС

с горючим из сплава U — Мо, используемым в первой загрузке, еще относительно далеко от значений экономических оптимумов глубины выгорания ядерного горючего. Можно также видеть, что переход на горючее из монокарбида урана вследствие существенного улучшения баланса нейтронов в реакторе позволит уменьшить на 15—20% как топливную составляющую, так и топливную составляющую расчетных затрат, хотя и требует достижения довольно значительных глубин выгорания (50 000—60 000 Мвт·сутки/т U).

На основании выражения (5) на рис. 2 построены относительные зависимости топливной составляющей расчетных затрат от глубины выгорания горючего (в качестве горючего принят сплав U — Мо) при различных значениях его энергонапряженности (5—60 Мвт/м U) для одной и той же тепловой мощности реактора типа реактора Белоярской АЭС и без учета частичных перегрузок. Другими словами, рис. 2 показывает влияние стоимости всей топливной загрузки и времени нахождения горючего в реакторе на экономику использования горючего.

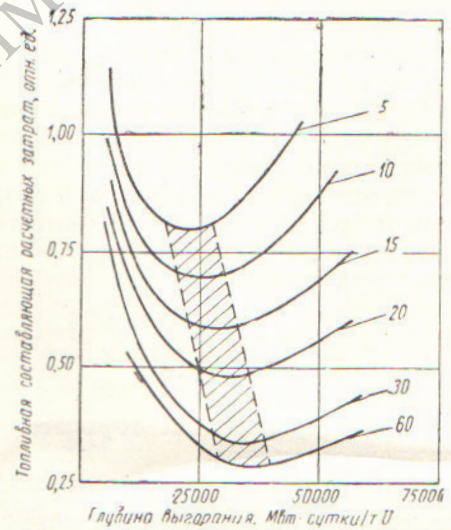


Рис. 2. Зависимость топливной составляющей расчетных затрат от глубины выгорания ядерного горючего для различных значений энергонапряженности и одной и той же мощности реактора (область оптимумов заштрихована).

Из рис. 2 следует, что влияние энергонапряженности на экономику использования горючего в реакторе довольно велико: для одной и той же мощности при увеличении энергонапряженности горючего с 5 Мвт/м U (что примерно соответствует энергонапряженности реак-

тора первого блока Белоярской АЭС) до 60 Мвт/м U , т. е. при уменьшении единовременной загрузки в 12 раз топливная составляющая расчетных затрат уменьшается в три раза, а оптимум сдвигается вправо. Можно также видеть, что оптимумы значений энергонапряженности достигают насыщения. В реакторе типа реактора Белоярской АЭС величину энергонапряженности целесообразно поднимать выше $50-60 \text{ Мвт/м U}$, так как технические трудности достижения таких удельных мощностей весьма велики, а выигрыш в значении топливной составляющей при дальнейшем увеличении энергонапряженности относительно мал.

Практическое удорожание изготовления твэлов при переходе к большим значениям глубины выгорания приведет к некоторому смещению полученных (см. рис. 1) оптимальных значений глубины выгорания влево.

Таким образом, использование зависимости (5) для топливной составляющей расчетных затрат на производство электроэнергии позволяет проследить влияние как стоимости топливной загрузки, так и глубины выгорания ядерного горючего на экономику его использования в реакторе и выбрать наиболее экономичный режим его работы.

Поступила в Редакцию 2/IV 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений в новую технику в народном хозяйстве СССР. М., Госпланиздат, 1960.
2. Основные методические положения технико-экономических расчетов в энергетике. М., Гостехиздат, 1959.
3. Е. И. Гришанин и др. «Атомная энергия», 10, 565 (1961).

УДК 621.039.562

Области устойчивости контура регулирования холодного реактора

Павел Штирский

(Научно-исследовательский институт энергетики, ЧССР, Прага)

Дается анализ областей устойчивости контура регулирования реактора нулевой мощности при изменении настроек регулятора и среднего времени жизни мгновенных нейтронов. Показано, как влияет на область устойчивости аппроксимация кинетики реактора двумя эквивалентными группами запаздывающих нейтронов.

Постановка задачи

Схема контура регулирования реактора для заданной плотности нейтронов показана на

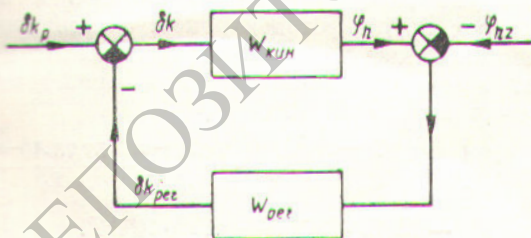


Рис. 1. Схема контура регулирования:

δk_p — возмущение реактивности реактора; δk — реактивность реактора; $W_{кин}$ — передаточная функция реактора в выражениях Лапласа; ϕ_n — относительное отклонение плотности нейтронов от номинального значения; ϕ_{nz} — отклонение плотности нейтронов от заданного значения; $W_{рег}$ — передаточная функция регулятора; $\delta k_{рег}$ — компенсирующая способность регулирующего стержня.

рис. 1. В линейном приближении регулируемая величина ϕ_n в преобразованиях Лапласа при возмущениях ϕ_{nz} и δk_p может быть задана уравнением

$$\bar{\phi}_n = \frac{W_{рег} W_{кин} \bar{\phi}_{nz} + W_{кин} \bar{\delta k}_p}{1 + W_{рег} W_{кин}} \quad (1)$$

Передаточная функция кинетики реактора в линейном приближении для m групп запаздывающих нейтронов определяется выражением

$$W_{кин} = \frac{\bar{\phi}_n}{\delta k} = \frac{1}{T_0 p + \sum_{i=1}^m \frac{\mu_i \tau_i p}{\tau_i p + 1}} = \frac{\beta_m p^m + \beta_{m-1} p^{m-1} + \dots + \beta_0}{p (\alpha_m p^m + \alpha_{m-1} p^{m-1} + \dots + \alpha_0)} \quad (2)$$

где T_0 — среднее время жизни мгновенных нейтронов; μ_i — вклад i -й группы запаздывающих нейтронов в коэффициент размножения; τ_i — среднее время жизни радиоактивных ядер i -й группы; p — постоянная преобразования Лапласа.

Предположим, что динамические свойства регулятора соответствуют последовательно