

УДК 621.039.526.003

Исследование области эффективности быстрых реакторов при неопределенности исходных данных

БРАЙЛОВ В. П., МАРТЫНОВА И. А., МУСИНА Г. А.

Одна из важнейших задач, возникающих при оценке перспектив и поиске оптимальных путей развития новой энергетической техники — выявление условий ее эффективности при неопределенности исходных данных (показателей). Поскольку каждому сочетанию значений n показателей (факторов) соответствует точка в n -мерном факторном пространстве, эта задача может быть геометрически интерпретирована как задача нахождения границы (гиперповерхности) между зонами эффективности и неэффективности новой техники в исследуемой области факторного пространства.

В общем случае при большом числе неопределенных факторов нахождение границы эффективности — сложная многомерная задача. Для больших систем, характеризующихся значительным числом объектов и сложными связями между ними, как правило, не удается найти точного аналитического выражения границы эффективности новой техники. Можно только рассчитывать отдельные точки, лежащие на этой границе, задаваясь различными сочетаниями значений факторов с тем чтобы по этим точкам построить некоторую гиперповерхность, приближенно выражающую границу эффективности. Необходимо число расчетных точек и, следовательно, объем расчетов резко возрастают с увеличением размерности факторного пространства, соответствующей числу неопределенных факторов. Поэтому важно для решения поставленной задачи сократить число рассматриваемых факторов, а также рационально планировать расчеты (пространственное расположение расчетных точек).

Основным методом сокращения числа факторов может служить метод агрегирования, при котором несколько факторов объединяются в один комплексный с учетом конкретных особенностей рассматриваемой системы. Выбор комплексного фактора следует считать удачным, если его изменение существенно влияет на эффективность новой техники, а изменения агрегируемых показателей, не приводящие к изменению комплексного фактора, не влияют или слабо влияют на эффективность этой техники (степень указанного влияния определяет погрешность агрегирования).

Введение в расчет приближенной функциональной зависимости между двумя (или более) неопределенными показателями также может рассматриваться как метод сокращения числа факторов. Наконец, можно использовать и прямой способ сокращения, при котором значение неопре-

деленного показателя фиксируется (обычно на среднем уровне), и тем самым он исключается из неопределенных факторов. Очевидно, что такой способ можно использовать только по отношению к показателям, возможные изменения которых слабо влияют на эффективность новой техники. Для выявления несущественных факторов могут оказаться полезными методы теории планирования экспериментов [1], позволяющие определить существенные и несущественные факторы.

В соответствии с этими соображениями была поставлена задача найти граничные условия экономической эффективности быстрых реакторов (БР) при неопределенности исходной информации. Для этого проводились многократные расчеты по детерминированной модели развивающейся системы АЭС [2] с тем, чтобы получить приближенное, достаточно простое аппроксимирующее выражение этих граничных условий. Заметим, что поставленная задача относится к такому направлению исследований, когда изучаются изменения оптимальных решений при различных возможных значениях неопределенных исходных данных, в отличие от другого направления, цель которого — получить определенное решение (при заданном критерии оптимальности) в условиях неопределенности [3].

Проводимые ранее расчеты показали, что экономическая эффективность БР существенно зависит от оценок (прогнозов) исходных данных. При изменении некоторых неопределенных показателей, влияющих на эффективность БР, методом «раскачки», когда поочередно изменяются отдельные показатели в заданных пределах, а остальные остаются на среднем уровне, были получены определенные представления о влиянии отдельных факторов на эффективность БР. Однако такой метод не дает полной картины условий эффективности БР при неопределенности исходных данных: он как бы освещает только ее фрагменты.

Быстрые реакторы были выбраны в качестве объекта исследования, поскольку они являются мощным средством повышения эффективности использования энергетических ресурсов. Быстрые реакторы как новый вид энергетической техники находятся на такой стадии развития, что, с одной стороны, назрела необходимость решать вопросы о целесообразных сроках и масштабах их внедрения в энергетику на широкой промышленной основе, а с другой, остается довольно большая неопределенность показателей БР (а также пока-

зателей, характеризующих условия их работы на перспективу).

Чтобы определить границу зоны эффективности БР, нужно условиться, какие результаты расчета по модели означают, что БР эффективны, а какие — нет. Например, можно считать, что отдаление начала ввода БР за пределы некоторого критического срока означают их неэффективность. Этот срок может быть примерно определен с учетом мероприятий по подготовке массового ввода БР. Принципиально наиболее правильно определять границу эффективности БР по экономическому эффекту от их внедрения в систему, т. е. по разности приведенных затрат в оптимальные системы АЭС без БР и с БР. Признаком (условием) границы эффективности в этом случае является равенство указанного эффекта его критическому значению. При таком подходе обеспечивается единство показателя (критерия), по которому оптимизируется система АЭС и определяется граница эффективности БР, поскольку в обоих случаях используется один и тот же показатель — приведенные затраты.

Помимо двух признаков границы эффективности рассматривается также третий признак, опирающийся на показатель критической суммарной мощности БР в оптимальной структуре АЭС. Из сопоставления расчетов по трем признакам сделан вывод о том, что наиболее правильным является выбор границы по критическому экономическому эффекту от внедрения БР. В дальнейшем приводятся результаты и даются рекомендации по выбору границы эффективности только по этому признаку.

В работе сопоставляются два способа агрегирования показателей топливного цикла БР. Первый способ базируется на таком известном показателе, как время удвоения БР (T_y). В течение этого времени происходит удвоение количества ядерного топлива в условной изолированной системе быстрых реакторов-размножителей вместе с обслуживающим ее комплексом предприятий внешнего топливного цикла (ВТЦ), обеспечивающим переработку, хранение и транспортировку топлива. Таким образом, этот показатель является комплексным физическим показателем, характеризующим способности указанной системы (БР + ВТЦ) к расширенному воспроизводству топлива. Время удвоения будем определять по формуле

$$T_y = 0,693 \frac{(\alpha_n + 0,5\alpha)(\alpha_c/\alpha_n + T_n)}{\alpha - 0,032}, \quad (1)$$

полученной из известного выражения для определения времени удвоения [4] с небольшими упрощениями, погрешность от которых мала — менее 1% (здесь α_c , α_n — загрузка и ежегодная

подпитка топлива; T_n — длительность внешнего топливного цикла).

В качестве альтернативы времени удвоения рассмотрен другой комплексный фактор $\bar{\alpha}$ — удельный приведенный расход плутония БР, который также зависит от показателей топливного цикла. Однако эта зависимость носит иной характер. Этот фактор представляет собой удельный расход плутония БР, рассчитанный с учетом возврата переработанного топлива и разновременности потребления и производства топлива по следующей формуле:

$$\bar{\alpha} = E\alpha_n + \alpha_n(1+p)^{-0,5t_n} - \alpha_n(1+p)^{-(0,5t_n + T_n)}, \quad (2)$$

где E — коэффициент эффективности капиталовложений; p — норматив приведения затрат*; α_n — удельная начальная загрузка плутония, г Pu/кВт; t_n — время между перегрузками топлива, год.

Выражение (2) получено исходя из следующих соображений. Разновременность загрузки и возврата топлива учитывается по тем же законам, что и разновременность денежных затрат и доходов. Возврат топлива представляется как отрицательный расход. Начальная загрузка производится в середине года, предшествующего началу эксплуатации реактора (АЭС). Режимы с условно-постоянными ежегодными подпиткой и возвратом (α_n) начинаются соответственно через $0,5 t_n$ и $0,5 t_n + T_n$ после начала эксплуатации. Величина $\bar{\alpha}$, как и T_y , характеризует способности БР к расширенному воспроизводству топлива. При этом топливо (плутоний) рассматривается как экономическая категория — продукт (ресурс), ранние затраты (или производство) которого более весомы, чем поздние. Эту величину можно интерпретировать как стоимость расходуемого БР плутония (за вычетом возврата) при постоянной во времени цене.

Результаты расчета коэффициентов в аппроксимирующих выражениях для двух вариантов агрегирования показателей топливного цикла с помощью T_y и $\bar{\alpha}$ показали, что погрешности во втором варианте агрегирования существенно меньше и в то же время аппроксимирующие выражения проще. Это дает основание предпочесть этот вариант.

При агрегировании технико-экономических показателей в один комплексный фактор, с помощью которого можно объединить большое число технико-экономических показателей БР, следует исходить из приближенного показателя сравнительной эффективности энергетических объектов — удельных приведенных затрат, исключив

* Согласно работе [5], в наших расчетах нормативы E и p приняты одинаковыми ($E = p = 0,12$). Однако в методике исследования предусматривается возможность их различия ($E \neq p$), что возможно, если следовать работе [6].

из них те факторы (составляющие затраты), которые были выделены ранее в отдельные показатели для более точного их учета. В связи с этим в качестве комплексного фактора примем разность удельных приведенных затрат в АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами, рассчитываемых на основе следующих положений и допущений. Из приведенных затрат в АЭС с тепловыми реакторами исключим стоимость природного урана, так как ее неопределенность учитывается отдельно.

В экономический комплексный фактор не будем включать затраты на закупку или выручку от продажи плутония по следующим причинам. Указанные затраты (выручка) определяются объемом потребления (производства) плутония и его ценой, неопределенность объемов потребления и производства плутония БР учитывается через неопределенность показателей топливного цикла БР, агрегируемых в комплексный неопределенный фактор, а неопределенность показателей топливного цикла тепловых реакторов считается незначительной, и поэтому эти показатели задаются однозначно.

Необходимость учета неопределенности цены плутония, потребляемого в течение расчетного периода, отпадает, поскольку при системном подходе, реализуемом с помощью используемой модели, плутоний выступает в качестве внутреннего продукта, вырабатываемого и потребляемого внутри системы, и факторы, влияющие на цену плутония и ее неопределенность (цена урана, показатели топливного цикла, стоимость химической переработки отработавшего топлива и др.), учитываются непосредственно.

Таким образом, та роль, которую выполняют затраты (выручка) на закупку (продажу) плутония, учитываемые в удельных приведенных затратах при локальном приближенном сравнении объектов, осуществляется более полно на основе системного подхода. Издержки производства будем рассчитывать для базового режима работы АЭС, поскольку этот режим является определяющим при исследовании граничных условий эффективности БР.

Так, при малой экономической эффективности (вблизи границы зоны) БР могут быть конкурентоспособными лишь в базовом режиме, и только при существенном повышении их экономической эффективности также и в полупиковом режиме. С учетом этого экономический комплексный фактор может быть записан следующим образом:

$$\Delta Z = E [\Delta K' + g_a a_a^n + (g_{т.з} + g_{б.з}) a_z^n - g_t (a_{т.н}^{об} + a_t^n) + \Delta c' + \frac{g_a}{T_a} (a_a^n + a_a^x) + \left(\frac{g_{т.з}}{T_a} + \frac{g_{б.з}}{T_{б.з}} \right) (a_z^n + a_z^x) - \frac{g_t}{T_t} (a_{т.н}^{об} + a_t^n + a_t^x)], \quad (3)$$

где $\Delta K'$ — разность удельных капиталовложений (без топлива) в АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами, у. е./кВт*; $\Delta c'$ — разность удельных издержек производства (без топлива) в АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами, у. е./кВт·год; $g_a, g_{т.з}, g_{б.з}$ — удельная масса топлива в активной зоне, торцевом и боковом экранах БР, кг/кВт; g_t — удельная масса топлива в тепловых реакторах, кг/кВт; a_a^n, a_z^n, a_t^n — удельные затраты на изготовление топлива (ТВЭЛов) для активной зоны, экранов БР и тепловых реакторов, у. е./кВт; a_a^x, a_z^x, a_t^x — удельные затраты на химическую переработку топлива, выгруженного из активной зоны, экранов БР и тепловых реакторов, у. е./кг; $a_{об.н}, a_{об}$ — удельные затраты на обогащение топлива начальной загрузки и загрузки в стационарном режиме работы тепловых реакторов, у. е./кг; $T_a, T_{б.з}, T_t$ — длительность кампании в активной зоне, боковом экране БР и в тепловых реакторах.

В качестве показателей, характеризующих стоимость природного урана, используются цены урана по источникам Π_i ($i = 1, \bar{J}$). Вместе с ресурсами урана по источникам цены Π_i определяют зависимость (в виде ступенчатой линии) цены от объема добытого урана $\Pi = f(G)$, которая отражает рост цены урана по мере истощения более дешевых месторождений. Нельзя однозначно определить, какой окажется зависимость в действительности. Неопределенность этой зависимости является следствием неопределенности соответствующих геологических прогнозов, а также неполноты имеющейся информации. Будем считать, что данная неопределенность может быть выражена с помощью заданных диапазонов возможных значений цен по источникам: $\underline{\Pi}_i \leq \Pi_i \leq \bar{\Pi}_i$ (здесь $\underline{\Pi}_i$ и $\bar{\Pi}_i$ — нижний и верхний пределы возможных значений цены). Тогда для всех источников в самом оптимистическом прогнозе $\Pi_i = \underline{\Pi}_i$, а при пессимистическом $\Pi_i = \bar{\Pi}_i$.

Примем, что прогнозы, находящиеся между пессимистическим и оптимистическим, образуются путем одновременного и пропорционального (относительно соответствующих диапазонов) изменения цен сразу во всех источниках, т. е.

$$\frac{\Pi_i - \underline{\Pi}_i}{\bar{\Pi}_i - \underline{\Pi}_i} = \dots = \frac{\Pi_i - \underline{\Pi}_i}{\bar{\Pi}_i - \underline{\Pi}_i}, \quad (4)$$

где $\underline{\Pi}_{iср}$ — среднее значение цены в i -м источнике.

Выполнение условия (4) означает введение в расчет $(J-1)$ функциональных связей между Π_i ($i = 1, \dots, J$), что позволяет уменьшить

* В качестве условной (денежной) единицы (у.е.) в работе была принята 1/200 доля удельных капиталовложений (на кВт) АЭС с реакторами типа ВВЭР.

число независимых факторов также на $J - 1$. В качестве независимого фактора может быть выбран любой из Π_i . Однако для удобства выполнения расчетов согласно рекомендациям теории планирования экспериментов выразим отношение (4) через некоторый дополнительный показатель C_y с помощью линейной зависимости и получим

$$\Pi_i = \Pi_{icp} + \Delta \Pi_i C_y. \quad (5)$$

Показатель C_y характеризует уровень цен на уран. Нетрудно убедиться, что при $C_y = -1, 0, +1$ цены урана по источникам, определяемые по выражению (5), соответственно принимают минимальные, средние и максимальные значения. Таким образом, используя выражение (5), можно варьировать цены на уран по источникам в заданных пределах путем изменения показателя уровня цен $-1 \leq C_y \leq +1$, обеспечивая при этом выполнение условия (4).

Диапазон возможных значений параметров БР, рассматриваемых в качестве неопределенных (варьируемых) показателей, был выбран по данным ИАЭ им. И. В. Курчатова. Расчетные точки выбирали с учетом рекомендаций теории планирования экспериментов: в качестве основных (базовых) были приняты точки, соответствующие полным факторным экспериментам (в трех уровнях) в пространстве независимых факторов C_y и $\bar{\alpha} (T_y)$. Эти точки образуются путем всех возможных сочетаний крайних и средних значений факторов C_y и $\bar{\alpha} (T_y)$. Кроме того, рассчитывались дополнительные точки, получаемые на основе базовых путем таких изменений исходных показателей топливного цикла, которые не меняют значения общего их комплексного показателя ($\bar{\alpha}$ или T_y).

Таким образом, было рассчитано 38 вариантов сочетаний неопределенных исходных показателей, на основании которых осуществлялась аппроксимация границы зоны эффективности БР. Отдельные точки рассчитывали путем определения критического (соответствующего границе эффективности БР) значения экономического комплексного фактора $\Delta Z_{кр}$ при заданных C_y и T_y (или $\bar{\alpha}$). Для получения каждой точки проводили серию расчетов по модели с различными значениями удельных капиталовложений (без топлива) в АЭС с БР — K'_0 (в том числе с явно завышенными, при которых БР заведомо не попадают в решение) при заданных прочих исходных данных. На основании этих расчетов экономический эффект от внедрения БР (ΔF) вычисляли как разность ежегодных приведенных (к 1975 г.) затрат в развивающуюся систему АЭС при наличии и отсутствии БР в оптимальной структуре системы АЭС, графически строили зависимость ΔF от K'_0 и находили критическое значение капи-

таловложений $K'_{0,кр}$. Искомое значение $\Delta Z_{кр}$ определяли по выражению (3) при найденном $K'_{0,кр}$ и рассматриваемом варианте прочих исходных данных, соответствующем рассчитываемой точке факторного пространства.

По рассчитанным точкам в пространстве факторов $\Delta Z, C_y, \alpha$ ($\Delta Z, C_y, T_y$) определяли аппроксимирующие аналитические выражения (уравнения) границы эффективности БР. Значения коэффициентов в этих уравнениях рассчитывали по методу наименьших квадратов. С учетом полученных результатов в качестве основного рекомендуемого аппроксимирующего выражения границы эффективности предлагается следующее:

$$Z_{кр} = 13,86 + 8,23C_y - 27,2\bar{\alpha} - 12,4C_y\bar{\alpha} - 0,29C_y^2 - 5,0\bar{\alpha}^2, \quad (6)$$

где C_y — уровень цен на уран. Менее желательным, но допустимым является выражение

$$Z_{кр} = 26,6 - 14,8C_y - 2,26T_y - 1,29C_yT_y - 0,194C_y^2 + 0,051T_y^2 + 0,033C_yT_y. \quad (7)$$

Условие экономической эффективности БР выражается неравенством

$$\Delta Z_{кр} < Z_{кр}, \quad (8)$$

где ΔZ определяется по формуле (3).

Если неравенство (8) выполняется, то БР эффективны, в противном случае — неэффективны. Разность $\Delta Z_{кр} - \Delta Z$ показывает величину этой эффективности и может служить количественной мерой устойчивости решения об эффективности (при положительной разности) или неэффективности (при отрицательной разности) БР.

Выражения (6) и (7) позволяют оценить относительную степень влияния различных факторов (показателей) на эффективность БР в системе АЭС и получить соотношения эквивалентности между изменениями различных показателей, т. е. получить ответ на вопрос о том, какое изменение одних показателей эквивалентно (по своему воздействию на эффективность БР) заданному изменению других показателей. Так, если изменение параметров БР привело к снижению удельного расхода плутония от $\bar{\alpha}_1$ до $\bar{\alpha}_2$, то соответствующий прирост $\Delta Z_{кр}$, равный $\Delta Z_{кр2} - \Delta Z_{кр1}^*$, показывает, на сколько можно увеличить удельные приведенные затраты в АЭС с БР, не снижая их экономической эффективности. Указанный прирост затрат обуславливается экономическим эффектом в системе АЭС («системным эффектом») от изменения параметров БР.

В табл. 1 и 2 приведены рассчитанные по выражениям (6) и (7) дополнительные капиталовло-

* $Z_{кр1}$ и $Z_{кр2}$ определяются по формуле (6) соответственно для значений $\bar{\alpha}_1$ и $\bar{\alpha}_2$.

Таблица 1

Дополнительные капиталовложения в АЭС с БР,
рассчитанные по формуле (6)

$\bar{\alpha}$, г Гу/(кВт·год)	C_y		
	-1	0	+1
0,45—0,35	8,7	19,3	29,7
0,35—0,25	9,8	20,1	30,5
0,25—0,15	10,6	21,0	31,3
0,15—0,05	11,4	21,8	32,3
0,05—0,05	12,3	22,7	33,1
0,05—0,15	13,1	23,5	33,9

Таблица 2

Дополнительные капиталовложения в АЭС с БР,
рассчитанные по формуле (7)

T_y , год	C_y			T_y , год	C_y		
	-1	0	+1		-1	0	+1
20—18	5,1	5,5	5,8	12—10	9,7	18,9	28,0
18—16	6,3	8,8	11,4	10—3	10,9	22,0	34,0
16—14	7,5	12,2	17,0	8—6	12,0	26,0	39,0
14—12	8,6	15,6	23,0	6—4	13,2	29,0	45,0

жения в АЭС с БР, которые могут быть сделаны без снижения их эффективности при уменьшении приведенного расхода плутония или времени удвоения в указанных пределах.

Из табл. 1 следует, что, например, при сокращении времени удвоения БР с 16 лет до 10 лет и высоких ценах на уран ($C_y = +1$) можно увеличить капиталовложения в АЭС с БР на $17 + 23 + 28 = 68$ у. е./кВт.

Получаемые с помощью выражений (6) или (7) соотношения эквивалентности могут быть непосредственно использованы (использовались в Энергетическом институте им. Г. М. Кржижановского) при оптимизации параметров БР. Их применение позволяет отделить задачу оптимизации параметров БР от общей задачи оптимизации системы АЭС и вместе с тем выбрать параметры с учетом системного эффекта (через соотношения эквивалентности). Следует иметь в виду, что при таком подходе оптимизация параметров осуществляется для заданного уровня экономической эффективности БР, соответствующего границе их эффектив-

ности. В этих условиях она используется в максимальной степени как средство повышения экономической конкурентоспособности БР (расширения зоны их эффективности). Принятые исходные условия представляются вполне оправданными в ближайшее время, когда, по нашему мнению, основной экономической задачей явится обеспечение конкурентоспособности БР. В дальнейшем в случае успешного совершенствования БР и повышения их экономичности станет целесообразным проводить оптимизацию параметров для более высоких уровней их экономической эффективности. Соотношения эквивалентности для новых условий могут быть получены на основе рассмотренных методических положений, но с измененным значением расчетного (критического) уровня экономической эффективности БР.

Оценка влияния некоторых рассмотренных показателей на эффективность БР показала, что степень влияния практически не зависит от уровня цен на уран, а наиболее сильно действующим фактором является длительность внешнего топливного цикла. Отсюда следует, что снижение длительности внешнего топливного цикла — одна из важнейших и первоочередных задач при повышении эффективности БР.

Полученные результаты дают возможность легко определять экономическую эффективность БР при различных возможных значениях исходных данных в условиях их неопределенности, оценить степень влияния различных факторов на эффективность БР и проводить оптимизацию параметров с учетом системного эффекта (без специальных расчетов по модели развивающейся системы АЭС). При этом существенно облегчается анализ условий эффективности быстрых реакторов и определяются наиболее рациональные пути их совершенствования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., Наука, 1965.
2. Браилов В. П. — Атомная энергия, 1972, т. 32, вып. 5, стр. 401.
3. Чернавский С. Я. — Там же, 1979, т. 46, вып. 1, стр. 13.
4. Лейпунский А. Н. и др. — Там же, 1971, т. 31, вып. 4, с. 383.
5. Захарин А. Г., Браилов В. П., Денисов В. И. Методы экономического сравнения вариантов в энергетике по принципу минимума приведенных затрат. М., Наука, 1971.
6. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений. М., Экономика, 1969.

Поступила в Редакцию 15.01.81