

УДК 621.039.003

Оценка целесообразности концентрации мощностей топливоперерабатывающей промышленности развивающейся ядерной энергетики

БАТУРОВ Б. Б., УРЕЗЧЕНКО В. М.

Развитие ядерной энергетики (ЯЭ) требует значительного развития мощностей предприятий топливного цикла. Для выбора оптимальной стратегии развития ЯЭ проводится широкий круг прогнозных исследований различных аспектов этой проблемы [1—5]. Значительный интерес представляет вопрос о возможности размещения и развития предприятий по изготовлению твэлов и химической переработке отработавшего топлива.

Возможны различные варианты размещения предприятий топливоперерабатывающей промышленности. При первом из них небольшие предприятия строятся вблизи одной или нескольких рядом расположенных АЭС (рис. 1, а). При втором развитие топливоперерабатывающей промышленности осуществляется за счет строительства высокопроизводительных предприятий, централизованно обслуживающих многие АЭС, причем всегда существуют резервные по сравнению с потребностью и неиспользуемые мощности этих предприятий (рис. 1, б). В третьем варианте строятся также централизованные предприятия, однако уровень их производительности выбирается исходя из условия обеспечения потребностей без наличия неиспользуемых резервных мощностей (рис. 1, в).

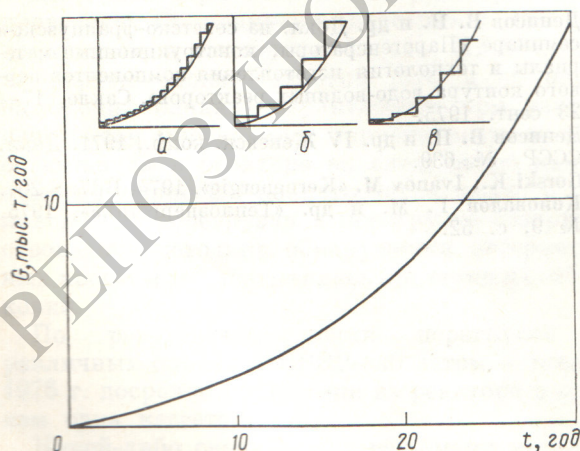


Рис. 1. Потребность в топливе и варианты ее удовлетворения при различных способах ввода мощностей предприятий по изготовлению твэлов

Для выбора оптимального характера размещения предприятий топливного цикла (ТЦ) необходим анализ с использованием экономических оценок. Рассматриваемые варианты размещения различаются значениями капитальных и текущих затрат. В третьем варианте появляются задержки топлива, вызванные тем, что топливо нарабатывается впрок и ожидает дальнейшего использования или дальнейшей переработки. Эти задержки вызывают замораживание значительных средств.

Для анализа различных стратегий развития ЯЭ с учетом влияния возможных факторов в работе [6] был предложен экономический функционал, построенный по принципу приведенных затрат, но учитывающий также долгосрочные оборотные средства:

$$F = \frac{K + T + D_t + D_{ст}}{T_{пр}} + \sum_{t=1}^{T_{пр}} N_t \theta \varphi_t (1 + \sigma)^{t-1} \quad (1)$$

где K — суммарные капитальные затраты; T — суммарные текущие затраты; $D_t, D_{ст}$ — долгосрочные оборотные средства, обусловленные долговременным пребыванием топлива в цикле и ступенчатым характером наращивания мощностей ТЦ; N_t — установленная мощность АЭС, вводимых в год t ; θ — число часов работы в году; φ_t — коэффициент использования установленных мощностей; $T_{пр}$ — временная глубина прогнозирования; σ — норма учета разновременности затрат.

Значения K и T определяются как суммарные по всем предприятиям ТЦ за весь прогнозируемый период с учетом разновременности затрат. Долгосрочные оборотные средства формируются за счет ежегодных отчислений от замораживаемых средств и представляют собой сумму по всем предприятиям ТЦ за весь прогнозируемый период этих отчислений с учетом разновременности, причем отчисления ведутся лишь с момента вложения средств до их возврата.

Рассматриваемые варианты размещения предприятий ТЦ различаются по уровню мощности

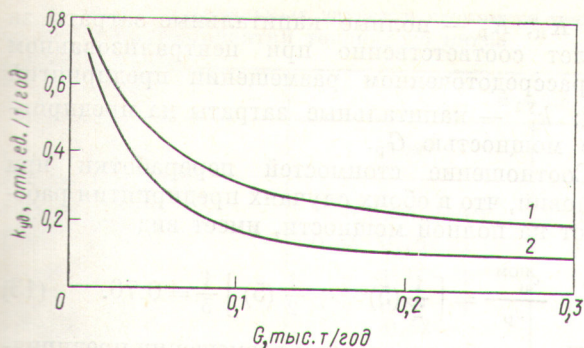


Рис. 2. Зависимость удельных капитальных затрат от производительности предприятий по химической переработке (1) и изготовлению твэлов (2)

вводимых предприятий. Значения же капитальных затрат и стоимости переработки на предприятиях зависят от их производительности.

Анализ имеющихся данных для существующих и проектируемых предприятий ТЦ показывает, что для капитальных затрат в диапазоне изменения производительности от 0,1 до нескольких тонн в сутки можно воспользоваться следующей зависимостью [6]:

$$K = K_0 (G/G_0)^{\alpha}, \quad (2)$$

где K , K_0 — полные капитальные затраты на строительство предприятий мощностью G и G_0 соответственно; $\alpha < 1$ — показатель для различных предприятий ТЦ.

На рис. 2 приводится зависимость удельных капитальных затрат от производительности предприятий по изготовлению и химической переработке твэлов быстрых реакторов на окисном топливе.

Полные затраты (3) на переработку для предприятия с производительностью G могут быть представлены в виде суммы постоянной ($З_{\text{пост}}$) и переменной ($З_{\text{пер}}$) составляющих:

$$З = З_{\text{пост}} + З_{\text{пер}}. \quad (3)$$

Постоянная составляющая, определяемая в основном капитальными затратами, также подчиняется соотношению (2):

$$З_{\text{пост}} = З_0^{\text{пост}} (G/G_0)^{\alpha}. \quad (4)$$

Переменная составляющая определяется затратами на энергию, материалы, т. е. прямо пропорциональна фактической производительности предприятия:

$$З_{\text{пер}} = З_0^{\text{пер}} \frac{G}{G_0}. \quad (5)$$

Значения $З_0^{\text{пост}}$, $З_0^{\text{пер}}$ могут быть представлены в виде долей от полных затрат ($З_0$):

$$\left. \begin{aligned} З_0^{\text{пост}} &= З_0 \delta_{\text{пост}}; \\ З_0^{\text{пер}} &= З_0 \delta_{\text{пер}}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\delta_{\text{пост}}$, $\delta_{\text{пер}}$ — относительные доли постоянной и переменной составляющих полных затрат.

Подставив (4) — (6) в (3) и представив полные затраты в виде произведения стоимости переработки на производительность предприятия, получим выражение для учета зависимости стоимости переработки от мощности предприятия при работе с полной загрузкой:

$$c = c_0 \left[\delta_{\text{пост}} \left(\frac{G}{G_0} \right)^{\alpha} + \delta_{\text{пер}} (G/G_0) \right] \frac{G_0}{G}, \quad (7)$$

где c , c_0 — стоимость * переработки на предприятиях мощностью G , G_0 соответственно.

При работе предприятия с неполной загрузкой постоянные затраты относятся к меньшему количеству продукции и удельная стоимость переработки возрастает. Пусть предприятие, имеющее номинальную производительность G , работает на мощности $g < G$. Стоимость переработки при работе на номинальной мощности G изобразим в виде суммы постоянной и переменной составляющих:

$$c^{\text{ном}} = c_{\text{пост}}^{\text{ном}} + c_{\text{пер}}^{\text{ном}} = c^{\text{ном}} \delta_{\text{пост}} + c^{\text{ном}} \delta_{\text{пер}}. \quad (8)$$

Постоянная составляющая полных затрат на переработку при снижении производительности остается неизменной, так как она не зависит от количества перерабатываемой продукции. Представив затраты в виде произведения стоимости переработки на производительность, получим выражение для постоянной составляющей стоимости переработки:

$$c_{\text{пост}} = c_{\text{пост}}^{\text{ном}} \frac{G}{g} = c^{\text{ном}} \frac{\delta_{\text{пост}}}{g/G}. \quad (9)$$

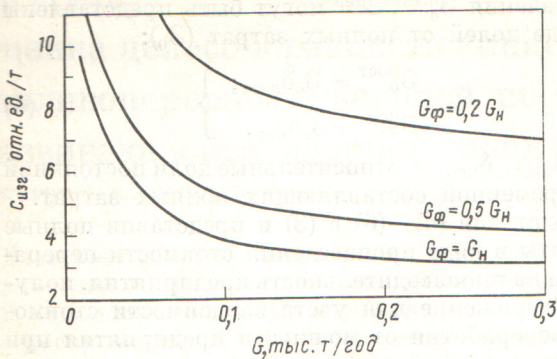
Переменная составляющая стоимости переработки не зависит от производительности предприятия, т. е.

$$c_{\text{пер}} = c_{\text{пер}}^{\text{ном}} = c^{\text{ном}} \delta_{\text{пер}}. \quad (10)$$

Представив стоимость переработки в виде суммы постоянной (9) и переменной (10) составляющих, получим выражение для учета зависимости стоимости переработки от уровня мощности при работе с неполной загрузкой:

$$c = c^{\text{ном}} \left(\frac{\delta_{\text{пост}}}{g/G} + \delta_{\text{пер}} \right). \quad (11)$$

* Под термином стоимость переработки следует понимать удельные затраты на переработку единицы массы топлива.



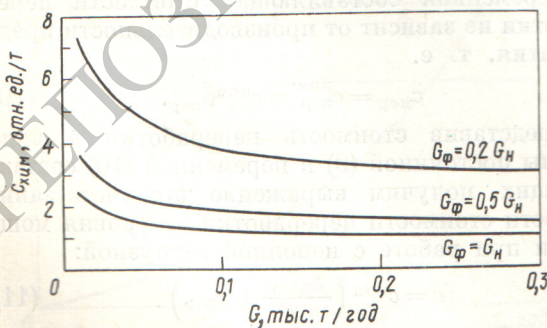
Р и с. 3. Зависимость стоимости переработки топлива на предприятиях по изготовлению твэлов от номинальной (проектной) G_n и фактической $G_ф$ их производительности при $\alpha = 0,4$; $\delta_{пост} = 0,33$.

На рис. 3, 4 приводятся зависимости стоимости изготовления и химической переработки твэлов быстрых реакторов на окисном топливе от производительности этих предприятий при работе на номинальной мощности и с неполной нагрузкой.

Для пояснения основных зависимостей капитальных затрат и стоимостей переработки при различных вариантах размещения предприятий цикла (рис. 5) рассмотрим пример. Пусть к пятому году требуется иметь мощность G_n . Потребность в мощности можно удовлетворить, ежегодно вводя мощность G_p (рассредоточенное размещение) или сразу построив предприятие мощностью G_n (централизованное размещение). Рассмотрим эти случаи без учета распределения затрат во времени, полагая $\alpha = 0,6$, а $\delta_{пост} : \delta_{пр} = 1/2 : 1/2$.

Соотношение полных капитальных будет равно

$$\frac{K_n}{K_p} = \frac{k_p^{уд} (G_n/G_p)^\alpha}{(G_n/G_p) k_p^{уд}} = \frac{k_p^{уд} \cdot 5^{0,6}}{5 k_p^{уд}} = 0,52, \quad (12)$$



Р и с. 4. Зависимость стоимости химической переработки топлива от номинальной (проектной) G_n и фактической $G_ф$ производительности предприятий при $\alpha = 0,6$; $\delta_{пост} = 0,5$

где K_n , K_p — полные капитальные затраты за 5 лет соответственно при централизованном и рассредоточенном размещении предприятий ТЦ; $k_p^{уд}$ — капитальные затраты на предприятия мощностью G_p .

Соотношение стоимостей переработки при условии, что в обоих случаях предприятия работают на полной мощности, имеет вид

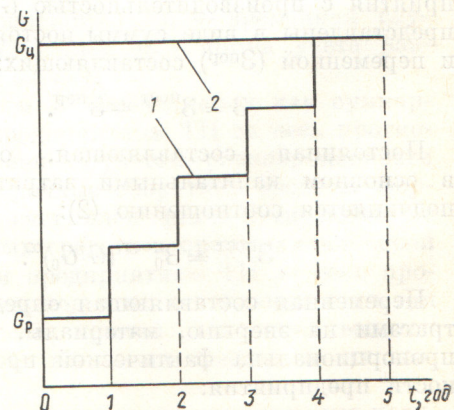
$$\frac{c_n^{ном}}{c_p} = \left[\frac{1}{2} (5)^{0,6} + \frac{1}{2} (5) \right] \frac{1}{5} = 0,76. \quad (13)$$

При централизованном размещении предприятий их номинальная производительность должна быть высокой и удовлетворять потребности в течение нескольких лет, т. е. в этом случае большие мощности вводятся с опережением потребности и в первые периоды работают с неполной загрузкой. Поэтому фактическая стоимость переработки при этом варианте размещения оказывается выше. Отношение фактической стоимости к стоимости при работе на номинальной мощности для различных уровней (на каждый из пяти лет) может быть вычислено по формуле (11) и составит для первого года 3; для второго — 1,75; для третьего — 1,33 и четвертого — 1,125.

Среднее отношение фактической стоимости за пять лет при централизованном размещении предприятий к стоимости при работе на номинальной мощности определится как средневзвешенное, а весовой коэффициент будет равен доле топлива, перерабатываемого в каждый год от всего переработанного за пять лет. Тогда

$$c_n/c_n^{ном} = 1,17. \quad (14)$$

Отношение стоимости переработки при централизованном размещении предприятий ТЦ к



Р и с. 5. Развитие мощностей предприятий ТЦ при рассредоточенном (1) и централизованном (2) их размещении

Соотношение капитальных затрат и стоимости переработки при централизованном и рассредоточенном размещении предприятий топливного цикла

α	$\alpha = 0,6$		$\alpha = 0,4$	
	5 лет	10 лет	5 лет	10 лет
$T_{\text{ступ}}$	1/0 0,5/0,5 0/1	1/0 0,5/0,5 0/1	1/0 0,5/0,5 0/1	1/0 0,5/0,5 0/1
$c_{\text{ц}}^{\text{ном}}/c_p$	0,52 0,76 1	0,4 0,7 1	0,4 0,7 1	0,25 0,62 1
$c_{\text{ц}}^{\text{ном}}/c_p$	1,67 1,17 1	1,82 1,41 1	1,67 1,17 1	1,82 1,41 1
$c_{\text{ц}}^{\text{ном}}/c_p$	0,87 0,89 1	0,73 0,99 1	0,67 0,82 1	0,45 0,88 1
$K_{\text{ц}}/K_p$	0,52	0,4	0,38	0,25

стоимости переработки при рассредоточенном их размещении равно

$$c_{\text{ц}}/c_p = (c_{\text{ц}}^{\text{ном}}/c_p) (c_{\text{ц}}^{\text{ном}}/c_{\text{ц}}^{\text{ном}}) = 0,76 \cdot 1,17 = 0,89. \quad (15)$$

В таблице приведены соотношения капитальных затрат и стоимости переработки на предприятиях ТЦ при централизованном и рассредоточенном их размещении при различных значениях α , периодах рассмотрения, предельных значениях соотношения долей постоянных и переменных затрат.

Из таблицы следует, что без учета распределения затрат во времени и при предположении равномерности наращивания мощностей при рассредоточенном их размещении во всех случаях более предпочтительным оказывается централизованное размещение предприятий, имеющих резервные мощности. Учет временного распределения затрат должен привести к ухудшению показателей для варианта централизованного размещения, так как в этом случае большие капитальные затраты и более высокие значения стоимости переработки соответствуют ранним моментам времени. Таким образом, для выявления более точных зависимостей необходим подробный учет временного фактора и реального характера наращивания мощностей ТЦ.

При централизованном размещении предприятий топливоперерабатывающей промышленности без резервных мощностей капитальные затраты и стоимость также должны быть ниже, чем при рассредоточенном размещении. Однако возникающие в этом случае задержки топлива в цикле приводят к появлению дополнительных затрат, обусловленных замораживанием средств на топливо, ожидающее дальнейшей переработки или использования. Кроме того, в этом случае существенно увеличивается потребность в уране из внешней части ТЦ, что также

приводит к дополнительным затратам. Таким образом, в этом случае действуют противоречивые факторы, и, для того чтобы сделать уверенные выводы о предпочтительности того или иного размещения предприятий топливоперерабатывающей промышленности, необходимы более подробный анализ и учет влияния различных факторов.

Такие исследования были проведены с помощью математической модели, описанной в работе [7], и с использованием функционала (1) для развивающейся системы АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. В данной модели, так же как и в работе [5], рассматривается развивающаяся система АЭС совместно с предприятиями топливоперерабатывающей промышленности, учитываются наличие складов в ТЦ и задержка топлива на них; в основу положены балансовые уравнения. Однако в отличие от работы [5], настоящая модель является имитационной и позволяет изучить различные варианты возможного развития системы ЯЭ. Основными особенностями модели являются также: возможность дискретного (ступенчатого) наращивания мощностей ТЦ; учет изменения изотопного состава топлива от перегрузки к перегрузке для каждого из реакторов, включенных в систему; использование в качестве экономического критерия функционала, учитывающего долгосрочные оборотные средства.

Большую сложность в исследованиях представляют выбор стоимостных характеристик и предполагаемые их изменения на длительную перспективу. В настоящее время ядерная энергетика вступает в период широкого развития, и вследствие этого крупномасштабные предприятия ТЦ отсутствуют либо существуют в единичных экземплярах, следовательно, пока невозможно уверенная оценка их стоимостных показателей. Кроме того, АЭС с мощными энергетическими быстрыми реакторами только стро-

ятся и пока еще отсутствует информация о стоимости изготовления и переработки топлива таких реакторов в большом масштабе. Все это заставляет рассматривать довольно широкий диапазон исходных значений стоимостных характеристик.

Поэтому при расчетах рассматривались развитие системы АЭС на быстрых реакторах с натриевым и газовым теплоносителем на окисном и карбидном топливе; различные гипотезы развития мощностей АЭС [значения установленной мощности в конце прогнозируемого периода в 30 лет составляют 400, 600, 800 млн. кВт(эл.), темп развития мощностей дискретно снижается, коэффициент нагрузки остается на уровне 0,8 или спадает до 0,6; длительность внешнего ТЦ составляет 0,66—2 года]; значение временного интервала между моментами дискретного наращивания мощностей ТЦ находится в пределах 3—6 лет; при учете разновременности затрат кроме нормативного $\sigma = 0,08$ рассматривалось $\sigma = 1$. Значения стоимостных показателей выбраны в ожидаемом диапазоне: изменение суммарных удельных капитальных затрат в 2 раза, стоимость переработки в 3 раза; отношение стоимости природного урана к стоимости разделения в сопоставимых единицах в диапазоне 0,8—4, а стоимость изготовления к стоимости химпереработки — в диапазоне 0,8—6.

Для предполагаемых значений капитальных затрат в развитие топливной базы с учетом зависимости от их масштабов производства получена следующая примерная структура удельных капитальных затрат на предприятиях добывающей и топливoperерабатывающей промышленности в расчете на единицу электрической мощности, %:

Добыча 25—30 Разделение 45—60
Изготовление 5—10 Химпереработка 10—15

Среднее соотношение стоимости переработки топлива на предприятиях внешнего ТЦ в сопо-

ставимых единицах, исходя из принятых предположений, получено, %:

Добыча 45—55 Разделение 30—40
Изготовление 10—15 Химпереработка 5—10

В результате расчетных исследований получены следующие выводы: размещение предприятий по изготовлению и регенерации твэлов должно быть централизованным; эти предприятия должны иметь значительную мощность отдельных очередей.

С точки зрения сокращения потребности в природном топливе и с экономической точки зрения на указанных предприятиях целесообразно иметь резервные мощности при различных практически возможных значениях и соотношениях капитальных и текущих затрат в ТЦ (даже при среднем уровне использования проектной производительности ниже 50%).

Эти выводы устойчивы относительно технологических решений переработки, транспортировки топлива, его захоронения, а также возможных изменений цен на плутоний.

Поступила в Редакцию 4/X 1976 г.
В окончательной редакции 14/XII 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов В. В., Троянов М. Ф., Лыткин В. Б. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 2, с. 170.
2. Макаров А. А. и др. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 3, с. 187.
3. Боболович В. Н. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 4, с. 251.
4. Чаховский В. М., Матиков В. В. «Атомная энергия», 1975, т. 38, вып. 5, с. 287.
5. Вирцер А. Д. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 2, с. 113.
6. Батуров Б. Б., Урезченко В. М. В кн.: Физика ядерных реакторов. Вып. 5. Под ред. Л. Н. Юровой. М., Атомиздат, 1976, с. 68.
7. Батуров Б. Б., Урезченко В. М. В кн.: Физика ядерных реакторов. Вып. 4. Под ред. Л. Н. Юровой. М., Атомиздат, 1975, с. 94.

УДК 621.039.5.56

Оптимизация энергораспределения в активной зоне большого действующего энергетического реактора

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., НАЗАРЯН В. Г., ПОСТНИКОВ В. В.

Одной из тенденций современной практики проектирования и эксплуатации энергонапряженных реакторов является возрастающий интерес к различного рода оптимизационным зада-

чам. Проблема оптимального регулирования энергораспределения в реакторе в стационарных режимах рассматривается в работах [1, 2]. Показательными в этом смысле являются иссле-