

Роль быстрых реакторов в структуре развивающейся системы ядерной энергетики

БОБЛОВИЧ В. Н., КОРЯКИН Ю. И., ЛЕВЕНТАЛЬ Г. Б., ЧЕРНАВСКИЙ С. Я.,
БАСКАКОВА Н. А., ЧЕРНЫШЕВА Т. П.

УДК 621.039.526

Быстрые реакторы уже давно находятся в центре внимания специалистов по планированию развития ядерной энергетики (ЯЭ), однако единой точки зрения о значении таких реакторов пока нет. Одни специалисты видят перспективу ЯЭ в совершенствовании тепловых реакторов, открытии и разработке дешевых месторождений природного урана и тория; другие исходят из ограниченности запасов природного ядерного горючего и связывают свои прогнозы с внедрением быстрых реакторов. В последние годы наметился новый взгляд — считать наиболее перспективной систему взаимосвязанных тепловых и быстрых реакторов. Следует отметить, что исследователи, придерживающиеся последней точки зрения, часто расходятся по менее общим вопросам: когда и в каких масштабах следует вводить АЭС с быстрыми реакторами, какими должны быть их технико-экономические показатели и пр.

Существует несколько причин такого разнообразия (например, разный инструмент исследования, различные гипотезы о будущих состояниях системы ЯЭ и др.). В связи с этим представляется целесообразным исследовать возможную роль быстрых реакторов при различных предположениях об условиях и характеристиках системы ЯЭ. Такая задача и была поставлена в настоящей работе; некоторые результаты ее изложены ниже. При этом авторы исходили из того, что роль быстрых реакторов определяется не только их собственными характеристиками, но и характеристиками тепловых реакторов, а также внешними условиями развития ЯЭ. Исследование проведено на математической модели, предназначен-

ной для определения оптимальной структуры развивающейся ядерной энергетики по минимуму суммарных приведенных затрат [1, 2].

В задачах прогнозирования ядерной энергетики нет еще устоявшейся терминологии. В данной работе применялись следующие понятия.

Исходный список АЭС в году t — перечень АЭС с теми типами реакторов, которые по своим техническим возможностям могут быть введены в эксплуатацию в этом году.

Решающий список АЭС — перечень АЭС с теми типами реакторов, которые по заданному правилу принятия решений должны быть введены в эксплуатацию в году t . Разновидность решающего списка — **оптимальный список**.

Структура АЭС характеризуется вектором S с компонентами x_1, x_2, \dots, x_n , где n — размерность списка; x_i — доля мощности реакторов i -го типа в общей мощности ЯЭ в году t . При этом различаются структуры **установленной** и **вводимой** мощностей.

Последовательность структур в рассматриваемом периоде называется динамической структурой, или **стратегией** развития системы.

Из приведенных определений видно, что важнейшим является понятие исходного списка, основанное на понятии типа ядерного реактора. Особенность данной типологии — деление тепловых реакторов на две разновидности, отличающиеся величиной наработки вторичного горючего (эти реакторы в конструктивном отношении могут быть практически одинаковыми). Для упрощения отнесем их к типам ядерных реакторов. Из представленных в табл. 1 пяти типов формировались исходные списки АЭС.

Как показывает анализ, в ближайшие 20—30 лет АЭС с тепловыми реакторами-сжигателями будут оставаться одним из важнейших технических средств в ЯЭ (в работе не делалось различия между корпусными и канальными реакторами из-за отсутствия существенной разницы между их технико-экономическими характеристиками для задачи прогнозирования), поэтому реакторы ТС включались во все варианты исходных списков.

Типы ядерных реакторов

Таблица 1

Реактор	Ядерное горючее	Обозначение
Тепловой с водяным охлаждением, работающий в режиме а) сжигателя	Обогащенный уран	ТС
б) конвертора-наработчика	То же	ТК
Быстрый жидкометаллический размножитель	Плутоний	БР
Быстрый жидкометаллический конвертор	Обогащенный уран	БК
Тепловой сжигатель с водяным охлаждением	Плутоний	ТСП

Были рассмотрены две группы гипотез развития ядерной энергетики, отличающихся типами ядерных реакторов. В первой группе исходный список формировался только из тепловых реакторов, во второй — как из тепловых, так и из быстрых. В первой группе рассмотрены три варианта исходного списка АЭС: однокомпонентный (ТС); двухкомпонентный (ТС + ТСП); трехкомпонентный (ТС + ТСП + ТК).

В настоящее время нет достаточной ясности в отношении сроков начала массового ввода в строй полномасштабных быстрых реакторов. Наиболее вероятным представляется их ввод с середины 80-х годов. Однако в связи с возможностью более ускоренного их освоения из-за трудностей разрешения топливной проблемы или замедления темпов освоения во второй группе гипотез начало широкого ввода быстрых реакторов варьировалось с 1981 по 1995 гг.

Таким образом, в гипотезах второй группы до начала ввода быстрых реакторов исходный список включал три (ТС + ТСП + ТК), а затем пять типов реакторов (ТС + ТСП + ТК + БР + БК).

В целях учета имеющейся неопределенности в технико-экономических показателях быстрых

реакторов рассматривались различные гипотезы относительного превышения стоимости этих реакторов по сравнению с тепловыми. Принималось, что капиталовложения в АЭС с быстрыми реакторами на 10—50% превышают капиталовложения в АЭС с тепловыми реакторами.

Быстрые конверторы, работающие в конверторном режиме весь срок службы, неэкономичны, поэтому время их работы в качестве конверторов ограничивалось 10 годами, затем эти реакторы переводились в режим размножителя. В данной работе в качестве реакторов типа ТК рассматривались канальные реакторы с графитовым замедлителем и водяным охлаждением.

Параметры реакторов типа ТК пока не имеют достаточного обоснования, поэтому для нахождения оптимальной величины наработки плутония в исходные списки включались четыре модификации, имеющие разные показатели по коэффициенту наработки и глубине выгорания.

Были рассмотрены три гипотезы роста мощности ЯЭ. Расчетные данные по этим гипотезам

Гипотезы роста мощности ЯЭ

Таблица 2

Гипотеза	Суммарная мощность ЯЭ, отн. ед.			Среднегодовые темпы роста мощности ЯЭ, %		
	1980 г.	1990 г.	2000 г.	1980—1990 г.	1990—2000 г.	2000—2010 г.
Первая	1	3	8	11,6	10,3	10
Вторая	1	3,7	10	13,9	10,6	10
Третья	1	4,3	11,7	15,8	10,4	10

приведены в табл. 2. Темпы роста мощности ЯЭ, оставаясь выше темпов роста мощности всей электроэнергетики, к концу рассматриваемого периода снижаются.

Большой интерес представляют условия включения различных типов АЭС в электроэнергетические системы. Как элементы этих систем, АЭС могут конкурировать с традиционными типами электростанций в переменной части графика нагрузки, но АЭС являются частью системы ЯЭ и использование их в переменном режиме приводит к недовыработке вторичного ядерного горючего, а при наличии экономических АЭС на плутонии — к ограничению их ввода. Среднегодовое число часов использования АЭС (H) составляло 5700—6300 ч; при этом максимальное возможное чис-

ло часов использования всех типов АЭС — 7000 ч, а минимальное — 4500 ч.

В работе имитировалась тенденция постепенного ввода новых технических средств в ЯЭ. Это было сделано с помощью ограничений на вводимую мощность быстрых реакторов после начала их широкого ввода. Расчеты проводились на математической модели с неравномерной временной шкалой; расчетный период был принят равным 50 годам начиная с 1980 г.

При развитии ядерной энергетики только на АЭС с тепловыми реакторами потребности в природном уране оказываются предельными, и в этом смысле анализ такой стратегии представляется показательным. Рассматривался случай, когда нарабатываемый плутоний не используется в системе ЯЭ, а ресурсы природного урана неограниченны. Поскольку приведенные затраты для рассмотренных ТК несколько выше, чем в обычных тепловых реакторах (из-за повышенной топливной составляющей), и в системе АЭС нет потребителя плутония (а следовательно, его ценность равна нулю), в этом случае ТК не входит в оптимальную структуру системы АЭС, развивающейся только на тепловых реакторах-сжигателях.

В соответствии с ростом выработки электроэнергии системой АЭС потребность в природном уране увеличивается по годам расчетного периода, что видно из следующих данных:

Период	Расход урана, отн. ед.
1981—1985 гг.	1
1986—1990 гг.	1,9—2
1991—1995 гг.	2,8—3
1995—2000 гг.	4—4,5

Однако эффект от использования плутония только в тепловых реакторах сравнительно невелик. В частности, экономия суммарной потребности ЯЭ в природном уране вследствие использования плутония в ТР до 2000 г. составит 10—12%.

Наиболее эффективно использование плутония в быстрых реакторах. Ниже изложены результаты расчетов по второй группе гипотез, в которых быстрые реакторы включены в исходные списки.

Динамическая структура ЯЭ при наличии быстрых реакторов в значительной мере определяется запасом экономичности быстрых реакторов, выражающим разницу собственных и замыкающих затрат в системе. В свою очередь этот запас зависит от соотношений как по топливной составляющей, так и по величине удель-

ных капиталовложений быстрых и тепловых реакторов.

Наибольшая неопределенность существует в показателях удельных капиталовложений. В связи с этим в работе исследовалось влияние возможного превышения удельных капиталовложений в АЭС с быстрыми реакторами по сравнению с тепловыми. Диапазон исследованных значений этого фактора (обозначим его α) находится в пределах 1—1,6.

Влияние α на структуру АЭС связано с действием других факторов, важнейшими из которых являются коэффициент воспроизводства БР и возможные ограничения на ресурсы или стоимость природного урана. При одинаковых капиталовложениях в БР и ТС запас экономичности быстрых размножителей определяется соотношением топливных составляющих, причем доля размножителей в структуре максимальна, а их запас экономичности оказывается таким, что в оптимальный список, помимо ТС, входят также и АЭС с ТК. Последние хотя и имеют большие собственные затраты, но благодаря большей наработке плутония входят в оптимальный список, причем доля их зависит от величины запаса экономичности БР.

Уменьшение запаса экономичности БР приводит к снижению доли ТК, уменьшению наработки плутония в системе и меньшему вводу БР вследствие ограничений по плутонию. В диапазоне $\alpha = 1 \div 1,2$ влияние этой связи еще невелико и не приводит к заметному снижению доли БР. Дальнейший рост α приводит к исключению из оптимального списка реакторов типа ТК (например, начиная с середины 80-х годов при вводе БР это происходит при $\alpha = 1,25 \div 1,3$), более резкому действию ограничений на уран и снижению доли БР в оптимальной структуре. Значения $\alpha = 1,5 \div 1,6$ оказываются предельными для включения БР в оптимальные списки по условиям конкурентоспособности в системе ЯЭ с тепловыми сжигателями.

Таким образом, для принятой исходной информации при $\alpha = 1 \div 1,3$ замыкающим типом АЭС в системе ЯЭ являются ТК, при $\alpha = 1,3 \div 1,6$ замыкающие установки — быстрые размножители. Определение типа замыкающей установки, как известно, является весьма важным вопросом для характеристики системы развивающейся энергетики.

Из анализа влияния времени начала широкого ввода БР (t_0) на суммарные приведенные затраты по ЯЭ за весь расчетный период (рис. 1) и на потребность в природном уране

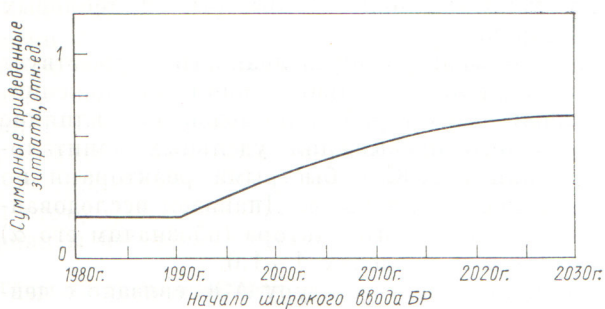


Рис. 1. Влияние срока ввода БР на суммарные приведенные затраты по ЯЭ.

(рис. 2) следует, что если ввод БР начнется в 1981—1991 гг., то оптимальные суммарные затраты на период 50 лет (начиная с 1980 г.) практически не будут зависеть от варьирования начала ввода.

Задержка ввода экономичных БР до 1996 г. связана с нанесением значительного ущерба народному хозяйству. На основании этих данных можно говорить о зоне «индифферентности» ЯЭ по отношению к началу ввода БР по критерию приведенных затрат. Эта зона охватывает период 1981—1991 гг. Внутри этой зоны действует такое правило: нужно способствовать более раннему вводу БР, поскольку это создает большую равномерность в работе машиностроения и способствует более интенсивному совершенствованию показателей БР благодаря накоплению большего опыта при раннем их вводе. Кроме того, более ранний ввод БР приводит также к снижению потребностей в уране, как это следует из рис. 2.

Задержка начала ввода БР до 1991 г. приводит к увеличению расхода природного урана до 2000 г. примерно на 15% по сравнению с вариантом ввода в 1981 г. При вводе БР только с 1996 г. потребность в природном уране увеличивается примерно на 25—30%.

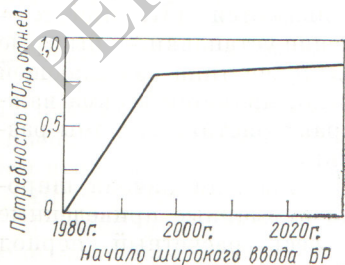


Рис. 2. Влияние различных сроков широкого ввода БР на интегральную потребность в природном уране.

Во всех рассмотренных вариантах использование БР в развитии энергетики позволяет существенно экономить суммарные затраты на развитие ЯЭ и потребность в природном уране по сравнению с развитием ЯЭ только на тепловых реакторах. Даже консервативная гипотеза ($t_0 = 1996$ г.) дает значительную экономии суммарных затрат, при этом природного урана за весь расчетный период потребуются в 1,8—2 раза меньше. Без экономичных БР развитие ЯЭ связано со значительным ущербом народному хозяйству, поэтому следует учитывать необходимость разработки для развивающегося в настоящее время в СССР жидкометаллического типа БР страхового варианта (например, БР с газовым теплоносителем), который в дальнейшем при определенных условиях мог бы рассматриваться и как конкурирующий. Следует, конечно, учитывать, что разработка страхового варианта ставит своей целью повысить надежность программы разработки мощных БР, что должно привести не к уменьшению средств на исследование и освоение жидкометаллического БР, а к выделению дополнительных средств на этот вариант. В противном случае эффект страхового варианта был бы противоположен ожидаемому эффекту повышения надежности программы размножителей.

На рис. 3 показано влияние начала ввода БР на оптимальную структуру АЭС для трех гипотез: оптимистической, согласно которой быстрые реакторы могут вводиться в широких масштабах не ранее 1981 г., осторожной (1991 г.) и консервативной (1996 г.).

С отдалением от начала расчетного периода широкого ввода БР система АЭС претерпевает определенные структурные изменения, что, прежде всего, выражается в уменьшении доли БР, а это приводит к снижению роли ТК в развитии ЯЭ.

Как показали исследования, при варьировании начала ввода быстрых реакторов в диапазоне 1981—1991 гг. система АЭС в оптимальном варианте должна развиваться на трех типах ядерных реакторов: ТС, БР, ТК.

Наибольшие структурные различия в вариантах с $t_0 = 1981$ г. и $t_0 = 1991$ г. наблюдаются в период до 2000 г. Так, доля БР на уровне 1990 г. составит в первом случае ~34%, во втором ~23%, т. е. в первом случае суммарная мощность БР будет примерно в полтора раза выше. Однако на уровне 2000 г. благодаря более раннему вводу БР в 1981 г. по сравнению с 1991 г. мощность их будет отличаться уже в 1,2 раза, а в 2010 г. — только в 1,1 раза.

Из данных рис. 3 и 4 следует, что точность наших представлений о структуре системы ЯЭ в зависимости от начала ввода БР меняется по годам расчетного периода. Рассматриваемая исходная неопределенность в отношении начала ввода связана с некоторой неопределенностью представлений о структуре на уровне 1990 г., однако затем наши представления о структуре уровня 2000 г. в указанном аспекте могут считаться более определенными. При этом, конечно, они менее точны, чем представления о структуре в период до 1980 г. В дальнейшем (после 2000 г.) действие других факторов приводит к снижению точности представлений о структуре.

В первые годы широкого ввода БР их темпы роста установленной мощности весьма велики, затем они снижаются, оставаясь выше темпов роста всей мощности АЭС. Чем позднее начинают вводиться БР, тем выше экономически целесообразные темпы роста мощности на БР, особенно в первые пять лет их эксплуатации. Это определяется тем, что при задержке вводов БР запас плутония в системе ЯЭ к моменту ввода выше, что дает возможность сразу после окончания этапа освоения быстрых реакторов перейти к вводу БР в широких масштабах. Это подтверждает рис. 5, на котором показано влияние параметра t_0 на динамику изменения запасов плутония в системе.

Характер изменения запасов плутония в системе ЯЭ при условии конкурентоспособности БР такой: до момента времени t_0 происходит накопление плутония, максимальный запас которого в системе приходится на год, предшествующий году широкого ввода БР, затем запас плутония в течение трех — пяти лет снижается до нуля.

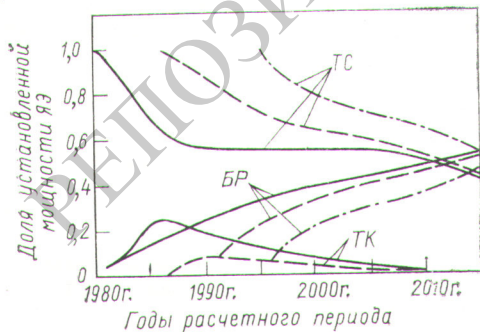


Рис. 3. Структура установленной мощности АЭС в зависимости от начала ввода БР:

— 1981 г.; ---- 1991 г.; - · - · 1996 г.

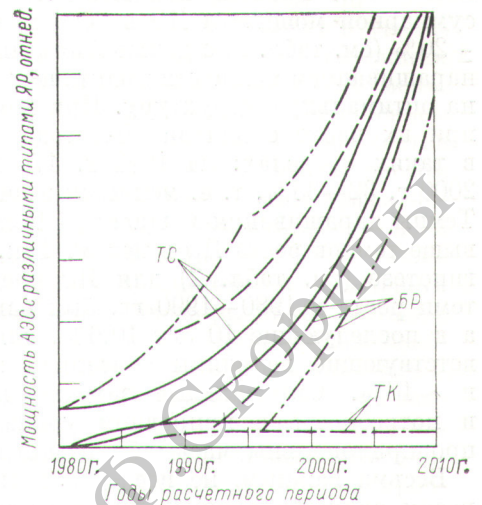


Рис. 4. Влияние начала широкого ввода БР на суммарную мощность АЭС различных типов:

— 1981 г.; ---- 1991 г.; - · - · 1996 г.

Максимальный запас плутония в системе ЯЭ тем больше, чем позже вводятся БР. Так, при вводе их с 1996 г. максимальный запас в два раза больше, чем при вводе с 1991 г., и в шесть раз выше, чем при вводе с 1986 г.

Ускорение начала широкого ввода БР приводит к необходимости повышения суммарной мощности ТК и смещения сроков их ввода к началу периода, причем основная роль ТК сводится к поддержанию высоких темпов ввода мощности БР.

До последнего времени оставался не вполне выясненным вопрос о влиянии масштабов развития ЯЭ на долю БР в оптимальной структуре

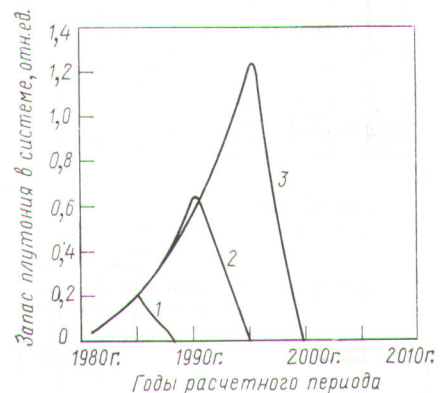


Рис. 5. Запас плутония на складах в системе АЭС в зависимости от срока ввода БР:

1 — 1986 г.; 2 — 1991 г.; 3 — 1996 г.

мощностей. Расчеты показали, что изменение суммарной мощности ЯЭ в 2000 г. в пределах $\pm 20\%$ (см. табл. 2) с дальнейшим интенсивным наращиванием мощности практически не влияет на оптимальную структуру. При этом доля БР при их вводе с начала 80-х годов находится в таких пределах: на 1990 г. 17–20%, а на 2000 г. 32–35%, т. е. меняется незначительно. Темпы наращивания мощности БР значительно выше темпов роста ЯЭ в целом. Так, во второй гипотезе (см. табл. 2) для ЯЭ среднегодовой темп роста в 1980–1990 гг. был равен $\sim 14\%$, а в последующие 10 лет 10,6%, для БР соответствующие величины оказались равны $\sim 33\%$ и $\sim 18\%$. Оптимальные затраты по системе и потребность в природном уране при этом пропорциональны масштабу развития ЯЭ.

Весьма важным, не исследованным еще вопросом является оценка снижения эффективности АЭС при использовании их в переменной части графиков электрической нагрузки вследствие недовыработки плутония. В целях изучения этого вопроса были подвергнуты анализу три гипотезы использования системы ЯЭ в электроэнергетических системах страны, отличающиеся среднегодовым числом часов использования мощности H , которое составляло соответственно 5700, 6000 и 6300 ч/год. Результаты оценки влияния H на оптимальную структуру ЯЭ приведены на рис. 6.

Как следует из приведенных данных, в указанном диапазоне изменения H в оптимальный

список вошли АЭС с тремя типами ядерных реакторов: ТС, БР и ТК. Последний из них вводится в период 1981–1990 гг., затем рост мощности ТК прекращается. Таким образом, решение о необходимости ввода в систему АЭС с тремя типами ядерных реакторов при указанных выше условиях инвариантно изменению среднего числа часов использования АЭС в диапазоне 5700–6300 ч/год. В этом диапазоне увеличение H приводит к большей наработке плутония и, следовательно, к большему вводу БР в систему.

Широкий ввод АЭС с БР связан, в свою очередь, с повышением ценности плутония в ЯЭ, которое вызывает вытеснение из структуры АЭС части тепловых реакторов-сжигателей тепловыми реакторами-наработчиками. Если при $H = 5700$ ч/год в период 1981–1990 гг. реакторы ТК используются лишь в базовой части графика (имеются в виду вновь вводимые реакторы), то при $H = 6300$ ч/год оказывается экономически эффективным применение части вводимых ТК и в переменной части графика нагрузки в режиме 4500 ч/год, так что в период 1986–1990 гг. ввод новых АЭС с тепловыми реакторами-сжигателями прекращается, а на всех вновь вводимых АЭС с тепловыми реакторами предусматривается работа реакторов в режиме наработки. Таким образом, увеличение среднего числа часов использования АЭС приводит к возрастанию доли БР в общей установленной мощности (табл. 3).

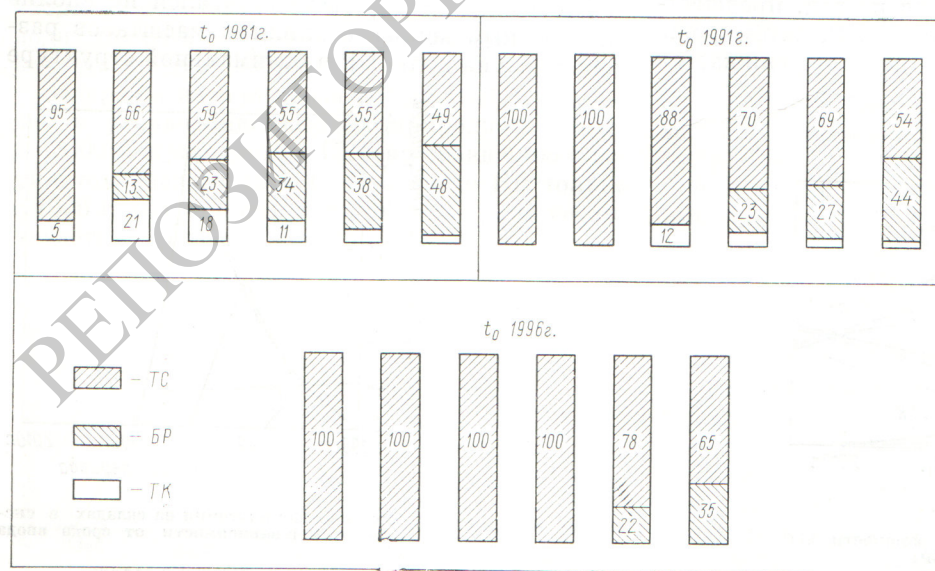


Рис. 6. Влияние начала широкого ввода БР на структуру АЭС (%), в характерных временных интервалах.

Структура установленной мощности АЭС

Таблица 3

Среднегодовое число часов использования АЭС, ч/год	ТС, %				БР, %				ТК, %			
	1981 г.	1985 г.	1990 г.	2000 г.	1981 г.	1985 г.	1990 г.	2000 г.	1981 г.	1985 г.	1990 г.	2000 г.
5700	96	70	62	59	4	12	22	35	—	18	16	6
6000	96	66	58	54	4	13	23	39	—	21	19	7
6300	93	61	33	37	5	14	26	48	2	25	41	15

Изменение среднего числа часов использования АЭС в диапазоне 5700—6000 ч/год относительно мало сказывается на структуре АЭС до 1985 г. Так, в 1985 г. доля в установленной мощности АЭС с ТС составит 60—70%, с БР 12—14% и с ТК 18—25%.

После 1985 г. оптимальная структура АЭС при варьировании *H* в диапазоне 5700—6000 ч/год меняется незначительно.

Увеличение среднегодового числа часов использования мощности АЭС с 6000 до 6300 ч/год приводит к увеличению среднегодовых темпов роста мощности АЭС с БР с 16 до 17%, что дает увеличение мощности этих АЭС на 25—26%.

Суммарные приведенные затраты по абсолютной величине, естественно, растут с увеличением среднего числа часов использования АЭС. Однако наблюдается относительно меньший рост затрат по сравнению с увеличением производства электроэнергии, что объясняется улучшением структуры ЯЭ в связи с ростом доли БР, приводящим к повышению эффективности ЯЭ в целом. Рост эффективности всей ЯЭ при увеличении *H* сопровождается также снижением потребности системы в природном уране. Исследования показали, какое большое значение приобретает размещение АЭС в базовой части графика нагрузок при оценке эффективности ЯЭ в целом. Проведенный анализ свидетельствует о том, что быстрые реакторы, являясь эффективным средством повышения экономичности ЯЭ и решения ее топливной проблемы, должны занять значительное место в оптимальной структуре АЭС до 2000 г.

Поступила в Редакцию 24/XII 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доллежалъ Н. А. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 31, вып. 3, с. 187.
2. Вирцер А. Д., Левенталь Г. Б., Чернавский С. Я. «Атомная энергия», 1972, т. 33, вып. 6, с. 955.

Новые книги Атомиздата

КРАВЦОВ В. А. Массы атомов и энергии связи ядер. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1974, 20 л., 2 р. 20 к., в переплете.

ВАЛЬДНЕР О. А., МИЛОВАНОВ О. С., СОБЕНИН Н. П. Техника сверхвысоких частот. Учебная лаборатория. Учебное пособие для вузов. М., Атомиздат, 1974, 15 л., 75 к., в переплете.

ДЖЕЛЕПОВ Б. С., КОКШАРОВА С. Ф. Гамма-кванты изотопов, применяемых в нейтронноактивационном анализе. Справочник. М., Атомиздат, 1974, 10 л., 53 к.

МОИСЕЕВ А. А., ИВАНОВ В. И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1974, 15 л. 1 р. 70 к., в переплете.

Радиационная стойкость материалов. Справочник. М., Атомиздат, 1974, 10 л. 1 р. 20 к. в переплете. (Авт.: Дубровский В. Б., Лавданский П. А., Соловьев В. Н., Пергаменчик Б. К.).

Радиоизотопные релейные приборы. Методика испытаний. Принципы построения. М., Атомиздат, 1974,

8 л., 80 коп. (Авт. Поздняков В. Н., Полковников В. К., Таксар И. М., Янушковский В. А.).

ГОЛЬДИН М. Л., ТАМАРОВ И. С. Радиоизотопный контроль газопроницаемости кокса. М., Атомиздат, 1974, 6 л., 30 к.

ОЗЕРНОЙ Л. М., ПРИЛУЦКИЙ О. Ф., РОЗЕНТАЛЬ И. Л. Астрофизика высоких энергий. М., Атомиздат, 1974, 18 л., 2 руб., в переплете.

СМИРНОВ Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М., Атомиздат, 1974, 30 л., 3 р. 20 к., в переплете.

КОЛПАКОВ И. Ф. Электронная аппаратура на линии с ЭВМ в физическом эксперименте. М., Атомиздат, 1974, 20 л., 1 р. 70 к., в переплете.

Современная ядерная электроника. В двух томах. Т. I. Измерительная система и устройства. М., Атомиздат, 1974, 20 л., 2 р. 20 к., в переплете (Авт.: Крашенинников И. С., Курочкин С. С., Матвеев А. В. и др.).