

Математическое моделирование развивающейся ядерной энергетики

КОРЯКИН Ю. И., БАТУРОВ Б. Б., БЕЛОСТОЦКИЙ А. М., БОБЛОВИЧ В. Н., ЛЕВЕНТАЛЬ Г. Б., ЛОКШИН В. Л., СМЕРНОВ В. Г., ЧЕРНАВСКИЙ С. Я., БАРАБАНОВ В. И., ШКРАБАЛ Й. УДК 621.311.2:621.039+001.57

Со времени пуска Первой в мире АЭС ядерная энергетика в своем развитии прошла несколько этапов. На первом из них решалась задача принципиального осуществления производства энергии на основе ядерного горючего, создания соответствующей демонстрационной установки.

После успешного решения этой задачи жизнеспособность и перспективность ядерной энергетики зависели от возможности создания АЭС, экономически конкурентоспособной с традиционной ТЭС на органическом топливе, что было показано в середине 60-х годов. Уже тогда возникли задачи определения масштабов развития ядерной энергетики, ее структуры и параметров ядерно-энергетических установок. Появились предпосылки создания системы ядерной энергетики как взаимосвязанной совокупности производств по добыче и переработке ядерного горючего и использования его на АЭС, по мере своего развития врастающей в топливно-энергетический комплекс нашей страны и стран — членов СЭВ.

О масштабах этого комплекса можно судить по контрольным цифрам пятилетки 1971—1975 гг. [1]. Так, производство электроэнергии в СССР в 1975 г. превысит 1 трлн. *квт.ч.* Оно осуществляется электростанциями различных типов, работающими в более чем 90 энергосистемах стран. Ежегодный суммарный ввод электростанций в рассматриваемой пятилетке составляет 12—14 млн. *квт.* Суммарное производство топлива в 1975 г. превысит 1,6 млрд. *т* усл. т. С учетом известной географической неравномерности размещения топливных ресурсов и несовпадения основных центров их добычи и потребления средняя протяженность трасс топливо- и энергоснабжения достигнет нескольких тысяч километров.

Оптимальное управление топливно-энергетическим комплексом — сложная и важная народнохозяйственная задача; она определяет актуальность и важность решения задач оптимального развития ядерной энергетики, в частности, таких, как определение масштабов развития, размещения АЭС и предприятий топливоснабжения по территории страны, структуры ядерной энергетики, режимов использования АЭС при работе их в электроэнергетических системах, целесообразности развития атомной

теплофикации. Сложность этих задач, многовариантность их возможного решения, определяемые сложностью самой системы ядерной энергетики, приводят к тому, что единственно возможным методом решения становится системный анализ, а важнейшим инструментом этого анализа — математическое моделирование.

Анализ показал, что многообразные задачи, возникающие в ядерной энергетике, от глобальных характеристик ее развития до технических параметров электростанций целесообразно решать с помощью взаимосвязанной системы математических моделей, такой, которая обеспечила бы возможность комплексного анализа перспектив развития ядерной энергетики и формулировала практические рекомендации для планирующих органов и организаций, разрабатывающих техническую политику. В настоящее время создание первого поколения такой системы близко к завершению. Она включает в себя:

1) группу моделей, предназначенных для определения перспективных характеристик ядерной энергетики, таких, как ее структура, оценка различных типов ядерных реакторов, перспективы развития в рамках стран — членов СЭВ;

2) группу моделей, на которых проводится оценка ядерной энергетики в топливно-энергетическом комплексе нашей страны с учетом ее связей с другими комплексами народного хозяйства;

3) группу моделей, предназначенных для определения параметров АЭС с учетом режимов их работы в электроэнергетических системах.

Ниже дается характеристика отдельных моделей и их взаимосвязей.

Математическая модель прогнозирования структуры АЭС

Задачи этой модели состоят в определении роли различных типов ядерных реакторов, в том числе новых, в удовлетворении растущей потребности в электроэнергии; диапазона допустимых по условиям конкуренции технико-экономических характеристик АЭС с новыми типами реакторов; чувствительности структуры

ядерной энергетики к существенным параметрам задачи; политики использования и накопления ядерного горючего в ядерной энергетике; ценности ядерного горючего в системе с учетом долговременных эффектов; эффективности различных топливных циклов; динамики народнохозяйственных денежных затрат и потребности в ядерном горючем на развитие.

Разработанная математическая модель описана в работе [2] и учитывает эффекты последствия от ввода тех или иных типов АЭС на протяжении длительного периода (30—50 лет). Модель имитирует динамическую систему АЭС; по своему характеру она оптимизационная. Инструмент ее исследования — метод линейного программирования.

Модель содержит около 110 ограничений при 400 переменных. Функционал модели — минимум суммарных за расчетный период приведенных народнохозяйственных затрат в денежном выражении. В 1969—1973 гг. на модели были проведены исследования в направлении оценки роли быстрых реакторов и тепловых конвертеров в структуре ядерной энергетики [3], ценности плутония в системе [4]. Эти исследования позволили, в частности, оценить периоды преобладания тепловых реакторов в структуре и интенсивного роста доли быстрых реакторов, эффективность построения двух-, трех- и четырехкомпонентных структур ядерной энергетики, области конкурентоспособности различных типов ядерных реакторов, устойчивость решений к возможным колебаниям технико-экономических показателей, эффекты изменения системной ценности вторичного ядерного горючего и т. д.

Для более полного учета новизны технических средств и связанной с нею неопределенности исходной информации были разработаны специальные методы анализа в условиях неопределенной исходной информации [5, 6].

Математическая модель прогнозирования структуры АЭС в рамках СЭВ

Особенностью моделирования развития ЯЭ в рамках СЭВ в настоящее время является отсутствие единой денежной единицы и способа сравнительного рассмотрения экономического эффекта, получаемого при развитии ЯЭ в различных странах СЭВ. В качестве такой единицы в будущем предполагается принять коллективную валюту — переводный рубль, который будет выполнять функции единой интернацио-

нальной меры стоимости, средства платежа и средства накопления. По плану комплексной программы ввод такой единицы ожидается в начале 80-х годов [7].

В связи с этим проведено изучение ядерно-энергетической системы в рамках СЭВ и оптимизация ее структуры на основе натурального показателя — потребности в природном уране, который достаточно полно позволяет выявить ряд закономерностей системы в ее динамическом рассмотрении. Была разработана динамическая оптимизационная математическая модель; в ней в качестве критерия оптимизации структуры развивающейся ЯЭ принимался интегральный расход природного урана на ее развитие за весь расчетный период [8]. В общем виде задача оптимизации структуры ЯЭ в течение длительного периода по расходу природного горючего представляет собой оптимизационную задачу линейного программирования.

В модели, на которой проводились расчеты, 90 ограничений, 180 переменных.

Были изучены следующие показатели:

1) соотношение потребностей в природном уране для «всетепловой» гипотезы развития ЯЭ (т. е. развития ЯЭ только на тепловых реакторах) с учетом и без учета повторного использования плутония в тепловых реакторах;

2) изменение структуры и потребностей в природном уране для комбинированного развития ЯЭ на тепловых и быстрых реакторах (двухкомпонентная структура) при предположениях технической готовности и возможности ввода быстрых реакторов-размножителей на различных этапах рассматриваемого периода.

3) влияние ускорения или замедления оборота ядерного горючего в топливном цикле на структуру и потребность в уране суммированной и интегрированной систем (суммированная система определяется механическим суммированием энерго мощностей и потребностей в уране для стран при условии их автономного развития; интегрированная — совместным развитием ЯЭ при условии интеграции по связям внешнего топливного цикла);

4) эффекты интеграции, т. е. улучшение структуры и уменьшение потребности в природном уране при переходе от суммированной к интегрированной системе развития ЯЭ.

Как показали расчеты, потребности в природном уране для «всетепловой» гипотезы являются предельными. Повторное использование плутония в тепловых реакторах позволит снизить потребность системы в природном уране лишь на ~10%. Наиболее эффективное сред-

ство решения топливной проблемы ЯЭ — широкий ввод в систему БРР. Однако влияние БРР на сокращение потребности в природном уране через 5—10 лет после начала их массового ввода сравнительно невелико. Основные изменения в структурах национальных ядерно-энергетических систем, а следовательно, в экономии природного урана за счет внедрения БРР следует ожидать через 15—20 лет после начала массового ввода БРР. Только после этого доля БРР в структуре ЯЭ может быть доведена к концу рассматриваемого периода до 50%, а экономия в природном уране в результате ввода БРР за весь расчетный период может достичь 30%.

Анализ развития перспективной структуры ЯЭ показал, что для суммированной системы структуры национальных ядерно-энергетических систем, и следовательно, потребность в уране изменяются слабо (до 10%) в первые 8—10 лет с момента возможного начала ввода экономичных БРР. Это говорит о наличии некоторой зоны «индифферентности» ЯЭ по отношению к срокам освоения экономически конкурентоспособных БРР. При этом чем меньше система и чем медленнее происходит рост мощностей ЯЭ, в частности доли БРР, тем шире эта зона. Для интегрированной системы зона «индифферентности» составляет 6—7 лет; за ее пределами задержка с массовым вводом БРР приводит к значительному возрастанию интегральной потребности в природном уране, например на 20% при задержке на 10 лет и на 40—45% при задержке на 15 лет.

Интегрированная система, обладающая лучшими возможностями для использования плутония, позволяет заметно улучшить структуру ЯЭ и показатели по расходу горючего по сравнению с суммированной системой. Эффект интеграции увеличит долю БРР в структуре ЯЭ на 8—12%. В абсолютном исчислении эта величина выразится в нескольких десятках миллионов киловатт, что существенно. Соответствующая этому интегральная экономия природного урана за весь рассмотренный период может составить 13—14%, что с учетом масштабов развития ЯЭ в абсолютном выражении представит значительную величину. Для структуры системы ЯЭ очень важно время задержки горючего во внешнем топливном цикле (ТВЦ). Его влияние возрастает для интегрированной системы ввиду большего, чем в случае суммированной системы, количества плутония в цикле. При увеличении ТВЦ с 1 года до 2 лет интегральная потребность в природном уране за

весь период возрастает на ~50%, а при уменьшении ТВЦ с 1 года до 0,5 года сокращается на 20—25%. Доля БРР к концу периода в структуре ЯЭ составит всего лишь 10—11% при ТВЦ, равном 2 годам. В то же время снижение ТВЦ с 1 года до 0,5 года дает относительно небольшое улучшение структуры. В течение первых ~10 лет с момента возможного начала ввода БРР в систему влияние ТВЦ сказывается значительно меньше ввиду относительно малой значимости плутония в балансе ядерного горючего.

Все это указывает на то, что сокращение времени ТВЦ может рассматриваться как весьма важная задача, решение которой приведет к существенному повышению роли быстрых реакторов в будущих ядерно-энергетических системах.

Математическая модель оптимизации системы топливоснабжения ядерной энергетики

В этой модели имитируется движение ядерного горючего в топливном цикле от его добычи до использования на АЭС и повторного использования после переработки выгружаемых из ядерного реактора материалов.

Задачи этой модели состоят в определении:

- 1) масштабов и времени ввода предприятий внешнего топливного цикла;

- 2) системных оценок потребления различных видов ядерного горючего в ядерной энергетике с учетом дискретности ввода предприятий системы топливоснабжения и эффекта снижения удельных показателей с ростом единичной мощности предприятий;

- 3) оптимальной политики в отношении накопления ядерного горючего с целью ввода более мощных предприятий топливного цикла;

- 4) режима загрузки вводимых предприятий;
- 5) целесообразности использования различных источников ядерного горючего.

Эта модель позволяет проводить комплексную оптимизацию системы ядерной энергетике. Разработанная математическая модель нелинейная.

В различных ее модификациях число ограничений варьируется в пределах 300—700 при числе переменных до 2500.

Для исследования модели применяется специальный оптимизационный алгоритм.

Математические модели оценки роли ядерной энергетики в топливно-энергетическом комплексе страны

Содержание задач этой группы моделей заключается в определении экономически целесообразного объема ввода АЭС, рационального размещения их по территории страны и энергосистемам, рациональных способов направления ядерного горючего (на конденсационные или теплофикационные мощности), режимных особенностей использования проектируемых АЭС в энергосистемах страны. Вместе с тем обеспечивается определение экономического эффекта от принятия того или иного решения, (экономическая оценка ущербов от снижения темпов развития ЯЭ по сравнению с оптимальными).

Математическая модель топливно-энергетического баланса

На этой модели, разработанной в Сибирском энергетическом институте СО АН СССР в 1969—1970 гг., были проведены расчетные исследования по оценке возможной роли АЭС в перспективном энергобалансе страны [9]. Модель линейная, оптимизационная, содержит 250 ограничений и 700 переменных.

В результате исследований на модели получены интересные выводы. Атомные электростанции, безусловно, экономичны в базисной части графика нагрузки энергосистем Европейской части страны до Урала, а также в западной части Казахстана и при некоторых условиях в Средней Азии. Наибольший эффект достигается при вводе АЭС в районах дорогого органического топлива. В связи с этим определяется простое правило эффективного ввода АЭС — их последовательное распределение с запада на восток навстречу основным ожидаемым потокам органического топлива из Сибири.

Были определены уровни развития ЯЭ, которые обеспечивают перелом в развитии основных топливных бассейнов страны, в частности, возможность отказа от приростов мощностей в Донбассе и ограничения сферы действия углей Канско-Ачинского бассейна районами Сибири.

Определено влияние развития АЭС на структуру генерирующих мощностей в энергосистемах. Была показана экономическая целесообразность повышения маневренности энергооборудования ТЭС на органическом топливе для высвобождения базисной зоны графика нагрузки для ядерных энергоисточников. Определены уровни дополнительных затрат в топливно-

энергетическое хозяйство страны в случае отклонения характера развития системы ЯЭ от оптимального и выявлены величины дополнительных капиталовложений, целесообразные для обеспечения рассчитанных оптимальных уровней развития ЯЭ.

Экономический эффект от ввода АЭС — сам по себе источник, стимул для перестройки структуры топливно-энергетического хозяйства страны. Реализация такой перестройки влечет за собой существенные сдвиги в промышленности, особенно в энергомашиностроении.

Для выявления требований на материалы и услуги, обусловленных намеченными темпами развития ЯЭ, были проведены анализы прямых материальных, трудовых и денежных затрат на развивающуюся ЯЭ по сравнению с затратами на традиционную энергетику. Для получения характеристики полных затрат использовали динамические математические модели межотраслевого типа, специально приспособленные для анализа структурных изменений в топливно-энергетическом хозяйстве страны, разработанные в СЭИ СО АН СССР.

В этих исследованиях показаны влияние развития ЯЭ на отрасли народного хозяйства, связанные с поставками для энергетики оборудования, материалов и пр., а также изменения потребностей в трудовых ресурсах на перспективу.

Показаны особенности развивающейся ЯЭ как мощного средства технического прогресса, в частности последствия, выражающиеся в снижении расхода черных металлов, цемента, древесины; увеличении расхода высококачественных сталей, цветных и редких металлов; повышении производительности труда.

Математические модели, предназначенные для определения параметров АЭС

Задачи этих моделей: определение путей технического прогресса отдельных типов установок, в том числе роста единичной мощности блоков; экономических показателей АЭС; влияния особенностей условий работы АЭС в системе на их технико-экономические показатели.

Была разработана математическая модель АЭС с канальными реакторами типа РБМК. Модель оценочная. В рамках многовариантных расчетов анализировалось влияние около 300 технико-экономических показателей АЭС на приведенные затраты на производство электроэнергии. В частности, исследовалось влияние таких внешних факторов, как стоимость по-

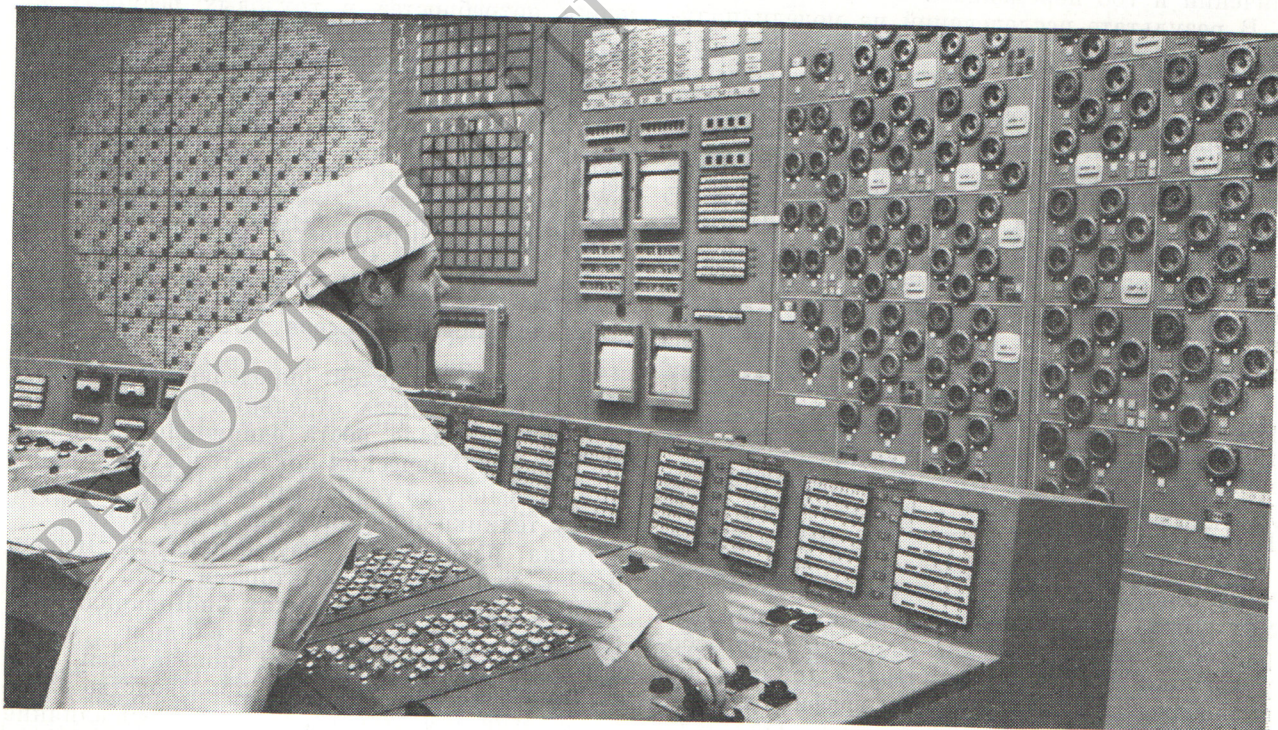
требляемого ядерного горючего, ценность плутония, нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, коэффициент нагрузки, а также влияние таких конструктивно-технических решений, как увеличение единичной мощности реактора, замена вида замедлителя, горючего и материала оболочки твэлов, введение газового охлаждения кладки реактора и турбулизаторов теплоносителя, замена циркуляционных насосов турбонасосами.

Исследования, проведенные на системе математических моделей, позволили установить, что разработанная система может служить инструментом решения задач планирования, прогнозирования и технической политики в области ядерной энергетики и топливно-энергетического комплекса в целом.

Исследования продолжаются в направлении усовершенствования самих моделей, изучения на них свойств ядерной энергетики, совершенствования методов анализа, разработки методов увязки решений, получаемых на различных моделях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сб.: Энергетика СССР в 1971—1975 гг. Под ред. А. С. Павленко и А. М. Некрасова. М., «Энергия», 1972.
2. **Вирцер А. Д., Левенталь Г. Б., Чернавский С. Я.** «Атомная энергия», 1972, т. 33, с. 955.
3. **Боболович В. Н. и др.** Симп. СЭВ по быстрым реакторам. Обнинск, 1973.
4. **Брюнин С. В. и др.** «Атомная энергия», 1973, т. 35, с. 305.
5. **Вирцер А. Д., Чернавский С. Я.** В кн.: Тр. конф. «Системный анализ и перспективное планирование» (май, 1972). М., изд. ВЦ АН СССР, 1973.
6. **Чернавский С. Я.** Советские — школа по АСПР. Новогорск, 1973.
7. Комплексная программа дальнейшего углубления и совершенствования сотрудничества и развития социалистической экономической интеграции стран — членов СЭВ. М., Политиздат, 1971.
8. **Боболович В. Н., Корякин Ю. И.** «Атомная энергия», 1972, т. 33, с. 961.
9. **Макаров А. А. и др.** «Атомная энергия», 1972, т. 32, с. 187.



У пульта управления Ленинградской АЭС.