

УДК 621.311.2:621.039.001.2.003.1

Методы математического моделирования и оптимизации ядерных энергетических установок

попырин Л. С.

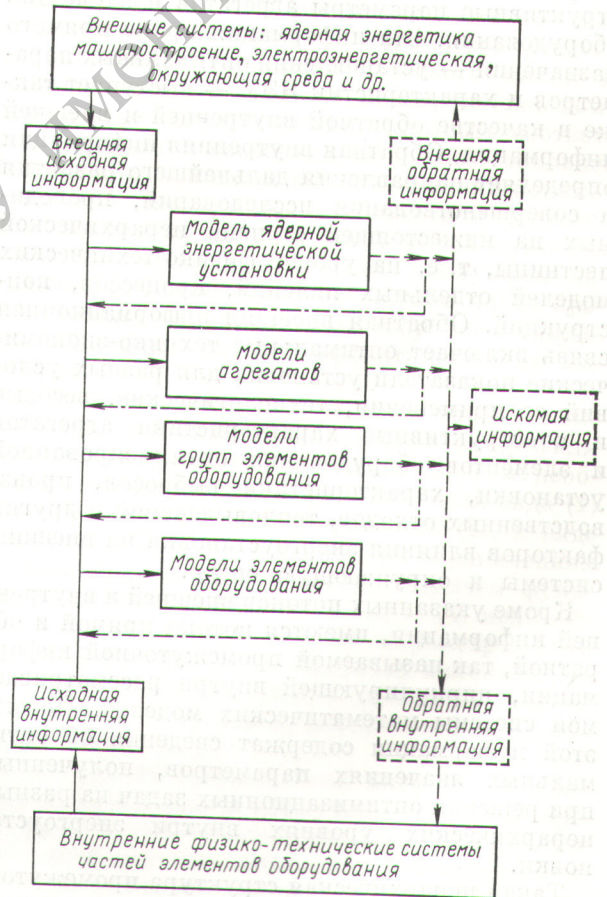
Исключительная сложность технологической структуры современного энергетического хозяйства страны и системы взаимосвязей между отдельными энергетическими объектами предопределили целесообразность его деления на ряд систем. Стоящая на верхнем иерархическом уровне единая общеэнергетическая система страны делится на пять основных специализированных систем, в совокупности обеспечивающих народное хозяйство всеми видами энергии и топлива: электроэнергетическая система, системы нефте-, газо- и углеснабжения и ныне формируемая система ядерной энергетики. Эти системы делятся на соответствующие системы отдельных районов страны. Конечным элементом больших систем энергетики являются предприятия — производители энергетической продукции и ее потребители [1]. В свою очередь каждое предприятие — производитель энергетической продукции — является сложной системой, которая включает в себя большое количество единиц разнотипного энергетического оборудования, объединенных физико-техническими и транспортными связями. Каждую такую сложную систему также целесообразно представлять в виде ряда иерархически соподчиненных систем.

Применительно к теплосиловым системам (теплоэнергетическим установкам) обычно выделяют четыре иерархических уровня: теплоэнергетическая установка, энергетические агрегаты, группы элементов оборудования, элементы оборудования.

Конечные элементы иерархической структуры теплосиловой системы — элементы оборудования — требуют дальнейшей детализации для изучения отдельных явлений, процессов, конструкций. Эти исследования проводятся на нижестоящей ступени иерархии, т. е. на уровне физико-технических систем частей элементов оборудования, когда проблемы развития теплоэнергетики переходят в проблемы механики, теплофизики, металловедения и других смежных дисциплин [2, 3]. Важность и сложность проблемы оптимального проектирования и перспективного развития теплосиловых систем различного типа очевидны. Ядерные энергетические установки (ЯЭУ) не являются исключе-

нием. На рис. 1 показана организованная по иерархическому принципу система информационных взаимосвязей ЯЭУ.

Внешняя исходная информация формируется частично в результате оптимизации энергетических и экономических систем более высокого уровня, элементом которых является ЯЭУ. Отчасти исходная внешняя информация получается на основании прогнозирования и экспертных оценок. Исходная внутренняя информация включает описание закономерностей и характеристик протекания технологических



Р и с. 1. Система математических моделей и обмен информацией при оптимизации ЯЭУ и ее оборудования:
— ; — — — ; — — — — — исходная, исходная и промежуточная информация

процессов, физических свойств рабочих тел и теплоносителей, характеристик разнотипных конструкций оборудования. Задаются описания ограничений, накладываемых на параметры и характеристики конструкций. В исходную информацию включаются также перечни конструктивно-компоновочных типов для элементов оборудования энергоустановки и вариантов вида ее технологической схемы (или условий их формирования).

Получаемая в результате решения оптимизационной задачи искомая информация включает целочисленные и дискретные характеристики вида технологической схемы энергоустановки, непрерывно изменяющиеся термодинамические и расходные параметры энергоносителей, дискретные характеристики типов конструкций агрегатов и основных элементов оборудования, непрерывно или дискретно изменяющиеся конструктивные параметры агрегатов и элементов оборудования. Эта информация кроме прямого назначения — установления оптимальных параметров и характеристик ЯЭУ — выступает также в качестве обратной внутренней и внешней информации. Обратная внутренняя информация определяет направления дальнейшего развития и совершенствования исследований, проводимых на нижестоящей ступени иерархической лестницы, т. е. на уровне физико-технических моделей отдельных явлений, процессов, конструкций. Обратная внешняя информационная связь включает оптимальные технико-экономические показатели установки для разных условий ее применения, технологические, весовые и конструктивные характеристики агрегатов и элементов оборудования оптимизированной установки, характеристики выбросов, производственных отходов, тепловыделений и других факторов влияния энергоустановки на внешние системы и окружающую среду.

Кроме указанных потоков внешней и внутренней информации, имеются потоки прямой и обратной, так называемой промежуточной информации, циркулирующей внутри рассматриваемой системы математических моделей. Потоки этой информации содержат сведения об оптимальных значениях параметров, полученных при решении оптимизационных задач на разных иерархических уровнях внутри энергоустановки.

Такая иерархическая структура промежуточной информации обеспечивает возможность организации поэтапного цикла оптимизации, состоящего из двух этапов — «сверху вниз» и «снизу вверх». При этом учитывается убы-

вающая степень влияния более детальной информации на уточнение общих оптимальных решений, а отсюда — возможность уменьшения объема обмениваемой информации.

Промежуточная и искомая информация могут использоваться также при исследовании содержания моделей и структуры взаимосвязей между ними, т. е. для построения оптимальной системы математических моделей. В этом случае возникают дополнительные циклы взаимосвязей между системой моделей и источниками внутренней исходной информации.

В настоящее время качественное решение задачи оптимизации значений параметров, вида схемы и профиля оборудования ЯЭУ и АЭС немислимо без широкого использования математического моделирования и ЭВМ, позволяющих получить решение, эффективное по широте учета влияющих факторов времени выполнения и затратам средств.

Исследования по рассматриваемой проблеме направлены на разработку теории и методов всестороннего термодинамического и технико-экономического анализа и комплексной оптимизации ЯЭУ на базе методов математического моделирования и решения многофакторных экстремальных задач и использования ЭВМ.

К настоящему времени разработаны [2—5]: теоретические основы построения математических моделей ЯЭУ различных типов для комплексных расчетных исследований; методические основы применения нелинейного математического программирования и ЭВМ для решения задачи оптимизации ЯЭУ; практические приемы применения методов математического моделирования, нелинейного математического программирования и ЭВМ для определения путей повышения экономичности ЯЭУ различных типов за счет выбора оптимальных нейтронно-физических, термодинамических, расходных и конструктивных параметров, а также рационального вида технологической схемы.

Математическая формулировка задачи комплексного технико-экономического расчета ЯЭУ заданного вида может быть записана следующим образом.

Найти

$$Z = Z [X_r, Y_r (X_r), \Gamma]_{E_0} \quad (1)$$

при

$$\Phi_r [X_r, Y_r (X_r)]_{E_0} = 0; \quad (2)$$

$$Y_r^* \leq Y_r [X_r, Y_r (X_r)]_{E_0} \leq Y_r^{**}; \quad (3)$$

$$F^* \leq F [X_r, Y_r (X_r)]_{E_0} \leq F^{**}; \quad (4)$$

$$X_r^* \leq X_r \leq X_r^{**}, \quad (5)$$

где Z — функция цели; X_r, Y_r — совокупности независимых и зависимых параметров установки; Γ — совокупность параметров вида схемы установки; E_0 — совокупность характеристик заданных внешних факторов; F_r — совокупность балансовых уравнений для всех узлов установки; F_r — совокупность технологических характеристик узлов установки, по которым задаются ограничивающие условия; одной и двумя звездочками отмечены индексы минимально и максимально допустимых значений соответственно.

Как следует из выражений (1) — (5), требуется не только определить значения зависимых параметров Y_r и рассчитать величину функции цели Z , но и выбрать такие значения независимых параметров X_r , которые удовлетворяли бы совокупности технических ограничений (2) — (5). Если принятые первоначальные значения совокупности независимых параметров X_r не удовлетворяют указанным техническим ограничениям, то необходимо ввести их в допустимую область.

Реализация соответствующих математических моделей ЯЭУ и отдельных элементов оборудования обеспечивает анализ и поиск наиболее обоснованных проектных решений. В частности, использование этих моделей позволяет:

- исследовать характер взаимосвязей параметров установки и дать анализ их влияния на нейтронно-физические, термодинамические, весовые, стоимостные и другие показатели установки;

- исследовать влияние внешних условий использования установки на соотношение ее параметров, а также на нейтронно-физические, термодинамические и технико-экономические показатели;

- численно оценить величины дополнительных металлоемкостей, снижения КПД, изменений расчетных затрат и других показателей установки в случае отказа от оптимальных значений параметров вследствие каких-либо технических ограничений;

- осуществить совместную оптимизацию всех параметров установки.

К числу новых возможностей, открываемых применением метода математического моделирования, относится возможность выполнения в едином итеративном процессе расчетов технологической (тепловой) схемы установки и технических расчетов элементов оборудования установки. При этом достигается уточнение тепловых балансов, теплового и прочностного расчетов элементов оборудования,

гидравлических и аэродинамических потерь в элементах оборудования и по трактам теплоносителей, значений КПД основных и вспомогательных агрегатов, расходов теплоносителей и рабочих тел, термодинамических параметров блока. Такое взаимное уточнение ранее не проводилось или проводилось весьма приближенно ввиду сложности и трудоемкости многократного повторения расчета технологической схемы и элементов оборудования, что, естественно, сказывалось на точности определения тепловой экономичности установки и технико-экономических показателей оборудования.

В наибольшей мере эффект улучшения показателей ЯЭУ и АЭС достигается при совместной оптимизации значений всех основных параметров технологической схемы и элементов оборудования, т. е. при комплексной оптимизации установки или электростанции.

Цель комплексной оптимизации ЯЭУ — выбор нейтронно-физических параметров реактора, параметров термодинамического цикла и тепловой схемы, а также конструктивно-компоновочных характеристик, которым соответствует минимум расчетных затрат по установке. Идея метода комплексной оптимизации параметров ЯЭУ заключается в совместном допустимом изменении первоначальной совокупности значений параметров в таком наилучшем направлении, которое при небольшом числе промежуточных вариантов дает скорейшее снижение величины критерия эффективности до минимума.

Математическая формулировка задачи комплексной оптимизации параметров и профиля ЯЭУ можно записать следующим образом: необходимо минимизировать функцию цели вида (1) при ограничениях в виде равенств (2), в виде неравенств (3) и (4), а также при ограничениях на независимые параметры (5). Причем функция цели (1) и ограничения (2) — (4) нелинейны, а среди оптимизируемых параметров есть как непрерывно, так и дискретно изменяющиеся. Таким образом, имеем сложную задачу нелинейного непрерывно-дискретного программирования.

В результате комплексной оптимизации наряду с определением наилучших значений термодинамических параметров оптимизируются распределения теплопередадов, температурных напоров, расходов, скоростей, падений давления по элементам оборудования и связям установки. Все это обеспечивает новый качественный эффект — достижение оптимальных пропорций в распределении капиталовложений

между отдельными элементами оборудования установки, а также установление оптимального соотношения между расходом ядерного топлива и капиталовложениями в установку. Иными словами, достигается оптимизация внутренней структуры ЯЭУ.

С помощью разработанных математических моделей ЯЭУ и программ, реализующих методы нелинейного программирования, проведены исследования по выбору оптимальных параметров АЭС различных типов, их технологических схем и элементов оборудования.

Результаты теоретических и практических исследований в виде разработанных принципов и приемов построения математических моделей и методов оптимизации, в виде законченных алгоритмов и программ, а также рекомендации для выбора параметров и профиля ЯЭУ начали использоваться отраслевыми НИИ, проектными институтами и конструкторскими бюро энергомашиностроительных заводов.

Математические модели теплосиловой части АЭС позволили исследовать ряд схем: одноконтурную схему с кипящим водографитовым реактором, двухконтурные схемы с реактором с водой под давлением, схемы с промежуточной сепарацией влаги и промежуточным перегревом пара, схемы с ядерным перегревом в водографитовом реакторе. В этих работах был применен метод синтеза оптимальной технологической схемы [6], с помощью которого в зависимости от состава и значений оптимизируемых параметров определяются количество и взаимосвязь элементов схемы.

Математическая модель водографитового реактора на насыщенном паре, оформленная как процедура на алгоритмическом языке АЛГОЛ-60, включает в себя в виде отдельных блоков расчет теплофизических, теплотехнических, гидравлических и нейтронно-физических характеристик реактора, а также экономических показателей реакторной части АЭС. Для реактора с ядерным перегревом математическая модель дополнена аналогичными блоками расчета пароперегревательной части.

Накопленный опыт решения задач оптимизации АЭС различных типов показывает, что целесообразно, используя метод декомпозиции, строить математическую модель АЭС как комплекс моделей отдельных частей, связанных общими внешними условиями и внутренними параметрами. Этот подход позволяет (при приемлемых размерах моделей) достаточно точно учесть внешние связи и внутренние особенности каждой части АЭС. Таким путем, в частности,

была выполнена комплексная оптимизация параметров и схем одноконтурных АЭС с водоохлаждаемыми реакторами на насыщенном и перегретом паре.

Разработана методика и система математических моделей низкопотенциального комплекса АЭС, включающего часть низкого давления турбины, конденсационное устройство, систему водоснабжения и водоохладители различных типов. С использованием этой системы моделей были определены области рационального применения турбин с различными выхлопными сечениями, оптимальные значения параметров оборудования и сооружений низкопотенциального комплекса АЭС для различных систем водоснабжения в разных районах размещения.

Большой объем исследований выполнен применительно к быстрым реакторам с жидкоталлическим теплоносителем или охлаждаемым диссоциирующим газом. Разработаны методики и программы расчета физических свойств теплоносителей, в том числе для диссоциирующего газа с учетом кинетики химических реакций; созданы эффективные математические модели реакторной и теплосиловой частей АЭС; выполнены расчетные исследования для определения рациональных технологических схем и оптимальных параметров оборудования АЭС указанных типов.

Принципиальные преимущества математических моделей (возможность быстрого, точного и многократного решения задачи при различных предположениях, быстрого внесения изменений в методику расчета и др.) обусловили широкое использование их при разработке и проектировании ЯЭУ и электростанций. В настоящее время математические модели, реализованные на ЭВМ, являются наиболее эффективным инструментом поиска оптимальных схем и параметров энергетических установок.

Однако потенциальные возможности методов математического моделирования и комплексной оптимизации ЯЭУ используются в настоящее время пока мало. Большинство решенных задач — это отдельные изолированные задачи, отвечающие требованиям различных НИИ, КБ и проектных институтов. Их роль в общем процессе разработки и проектирования ЯЭУ относительно невелика.

Качественного изменения процесса разработки и проектирования АЭС можно добиться только путем широкого применения математических методов и ЭВМ. Но задача сейчас состоит в переходе от разработки и использования отдельных математических моделей к со-

зданию и использованию взаимосвязанных систем математических моделей, описывающих все уровни технологической и временной иерархии системы оптимального проектирования АЭС разных типов. Такая система для каждого типа электростанций должна быть реализована в виде единого комплекса алгоритмов и программ, участвующего участие в процессе разработки и проектирования НИИ, КБ и проектных институтов различных ведомств. Иными словами, необходима реализация действительно комплексного подхода к разработке и проектированию АЭС, чего нет в настоящее время.

Создание такой системы позволит найти наилучшее проектное решение при существенном сокращении сроков разработки и проектирования АЭС и повышении качества проекта. Заметим, что проектировщик (конструктор) освобождается от выполнения обычной рутинной работы и сосредоточивает свое внимание на анализе полученных решений, на разработке более точных методов расчета, на поиске новых конструктивно-компоновочных решений. Быстрое выполнение проектных работ обеспечит возможность проверки и реализации в проектах АЭС результатов новых научных исследований.

Реализация идеи создания системы математических моделей для оптимального проектирования АЭС различных типов требует решения ряда научных, технических и организационных задач. Далее рассматриваются лишь некоторые научно-методические аспекты этой сложной проблемы.

В число наиболее важных задач, которые должны быть решены в процессе разработки такой системы, необходимо включить исследования общей структуры системы математических моделей АЭС того или иного типа и принципов взаимодействия отдельных ее частей, реализованных в разных научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях.

При разработке системы математических моделей для того или иного типа ЯЭУ значительное внимание должно быть обращено на формулирование требований к математическим моделям системы в части точности их построения и гибкости алгоритмов, их реализующих, чтобы обеспечить использование каждой математической модели (или ее модификации) для решения задач на различных иерархических уровнях и в любых сочетаниях с другими моделями.

Требования точности математического моделирования какого-либо объекта или процесса определяются главным образом поставленной целью, объемами и погрешностью исходной

и искомой информации; они существенно различны при рассмотрении этого объекта или процесса на разных уровнях технологической и временной иерархий.

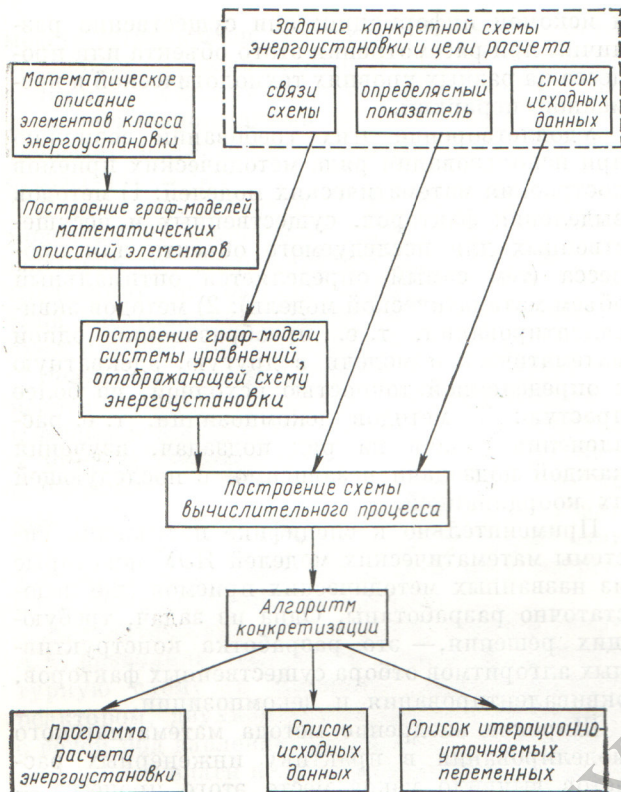
Удовлетворение этих требований возможно при использовании ряда методических приемов построения математических моделей: 1) методов выделения факторов, существенных и несущественных для исследуемого объекта или процесса (тем самым определяется оптимальный объем математической модели); 2) методов эквивалентирования, т. е. преобразования одной математической модели в другую, адекватную с определенной точностью исходной, но более простую; 3) методов декомпозиции, т. е. расчленения задачи на ряд подзадач, изучения каждой подзадачи независимо, с последующей их координацией.

Применительно к специфике построения системы математических моделей ЯЭУ некоторые из названных методических приемов еще недостаточно разработаны. Одна из задач, требующих решения, — это разработка конструктивных алгоритмов отбора существенных факторов, эквивалентирования и декомпозиции.

Широкое внедрение метода математического моделирования в практику инженерных расчетов выявило узкое место этого процесса — большие затраты труда высококвалифицированных программистов на подготовку программы расчета. Кроме того, программа расчета, разработанная «ручным» способом, не оптимальна, поскольку ее вид и последовательность определены на основании субъективных соображений программистов.

В Сибирском энергетическом институте СО АН СССР предложен более совершенный автоматизированный метод построения математических моделей теплоэнергетических установок, обеспечивающий как автоматизацию большинства процессов составления вспомогательных процедур по описанию отдельных технологических процессов и элементов оборудования, так и автоматическое формирование математической модели теплоэнергетической установки по заданной структуре ее технологической схемы. Тем самым появляется возможность механизации весьма трудоемких работ по созданию математических моделей теплоэнергетических установок и сокращению в десятки раз времени их разработки [7].

Общая последовательность автоматизированного построения программ расчета теплоэнергетических установок показана на рис. 2. Здесь можно выделить ряд этапов: математическое



Р и с. 2. Функциональная схема системы машинного построения программ расчета энергетических установок

описание элементов технологических схем какого-либо класса энергоустановок; задание конкретной схемы энергоустановки, программу расчета которой нужно получить, цели расчета; алгоритм абстрагирования, т. е. переход от конкретного энергетического содержания технологической схемы к рассмотрению граф-моделей; построение схемы вычислительного процесса на уровне граф-моделей; алгоритм конкретизации, т. е. насыщение энергетическим содержанием полученной абстрактной схемы вычислительного процесса; получение программы расчета конкретной схемы энергоустановки. Совершенно очевидно, что разработанные подходы к автоматизации построения математических моделей теплоэнергетических установок не являются единственно возможными. Исследования в этом исключительно важном направлении нужно интенсивно продолжать.

Весьма сложные задачи предстоит решить при автоматизации процесса математического моделирования конструкций элементов оборудования. Специфика этих задач обусловлена труд-

ностями представления информации о геометрии элементов оборудования. Многие задачи конструирования, имеющие не формальный характер, трудно поддаются алгоритмизации.

Исключительно большое внимание при создании автоматизированных систем разработки и проектирования АЭС должно быть уделено информационной системе, охватывающей все уровни технологической и временной иерархии. Эта система должна обеспечить быструю и многократную циркуляцию информации между научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями, решающими отдельные задачи в общей системе задач оптимальной разработки и проектирования АЭС. В рамках этой системы необходимо строго регламентировать объемы входящей и исходящей информации. Элементы такой информационной системы, создаваемые в отдельных организациях — соисполнителях, кроме того, должны выполнять функции регистрации, переработки и хранения информации, а также обеспечить математические модели необходимыми исходными данными.

Важнейшей составной частью информационной системы являются банки данных, предназначенных для сохранения упорядоченной информации. Общие принципы построения информационных систем в настоящее время интенсивно разрабатываются применительно к разнообразным задачам управления народным хозяйством страны на различных иерархических уровнях и, видимо, будут в основном справедливы и для рассматриваемого класса задач, хотя учет специфики потребует разработки дополнительных методов и приемов.

Очень важны тесно взаимосвязанные вопросы о характере исходной информации и о методах принятия решений. В настоящее время признано положение о существенности влияния сложной совокупности случайных факторов на силу действия объективных законов развития производительных сил страны и, в частности, на тенденции развития топливно-энергетического хозяйства [1]. Это влияние исключает возможность получения строго определенной и точной информации о перспективном развитии топливно-энергетического хозяйства страны. Соответственно большая часть информации, используемой при разработке и проектировании АЭС, может быть задана с погрешностью, точная величина или характер изменения которой неизвестны. Неполная определенность используемой информации не позволяет получить однозначного оптимального решения. Возможно

лишь определить зону, внутри которой каждое решение оптимально при том или ином сочетании значений компонентов исходной информации. Такая зона называется зоной неопределенности оптимальных решений [1, 8].

В Сибирском энергетическом институте по проблеме принятия решения при неопределенности исходной информации разрабатываются следующие методы: получения исходной информации с минимально возможной неопределенностью; определения влияния исходной информации на искомую, т. е. нахождения зоны неопределенности решения; анализа зоны неопределенности решения для выбора варианта электростанции, рекомендуемого к реализации и т. д. [9, 10].

Неопределенность исходной информации вызывает большие трудности в постановке и решении задач оптимизации ЯЭУ. В наиболее общем виде задача рассматривается следующим образом: требуется определить минимум функции затрат

$$Z = Z(X, B) \quad (6)$$

при наличии ограничений

$$F(X, C) = 0; \quad (7)$$

$$F^* \leq F(X, D) \leq F^{**}; \quad (8)$$

$$X^* \leq X \leq X^{**}, \quad (9)$$

где B, C, D — векторы недетерминированно заданных и частично взаимосвязанных показателей внешних и внутренних факторов. Наличие в ограничениях (7) и (8) неоднозначных показателей C и D требует уточнения формулировки задачи. Здесь принято различать жесткую и нежесткую постановку задачи. Возможны и иные подходы к математической формулировке задачи оптимизации АЭС в условиях неопределенности.

Учет неопределенности используемой информации может оказать влияние и на энергетическую постановку задачи оптимизации АЭС, точнее позволяет выбрать наиболее рациональный ее вариант. Напомним, что для выполнения требования о приведении сравниваемых вариантов АЭС к одинаковому энергетическому эффекту применяются разные подходы. Рассмотрим два крайних.

1. Принимается постоянной полезная мощность блока; потребность в ядерном топливе и производство вторичного ядерного топлива должны выравняться введением показателей замыкающих затрат на ядерное топливо.

2. Принимается неизменным расход ядерного топлива на блок. В этом случае нужно вводить

показатели затрат по замыкающей электро-энергии и вторичному ядерному топливу.

При детерминированной постановке задачи оба эти подхода равноценны. Если учитывать неопределенность исходных данных, это далеко не так. В этом случае нужно для каждой конкретной задачи подбирать метод, обеспечивающий введение в решение задачи показателей замыкающих затрат, имеющих наименьшую неопределенность.

Заключение. Теоретические исследования и практика использования свидетельствуют о больших и еще далеко полностью не раскрытых возможностях метода математического моделирования применительно к технико-экономическому анализу и выбору оптимальных решений при разработке перспективных типов ЯЭУ.

Накопленный положительный опыт позволяет рекомендовать использование метода математического моделирования и ЭВМ для решения подавляющей части задач этого класса.

Дальнейшее повышение эффективности метода математического моделирования требует развертывания научных исследований в направлениях совершенствования методов изучения, разработки и прогнозирования информации, развития методов принятия решений при неполностью определенном задании информации, автоматизации построения математических моделей и создания автоматизированной системы разработки и оптимального проектирования ядерных энергетических установок.

Поступила в Редакцию 6/XI 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Макаров А. А., Мелентьев Л. А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. Новосибирск, «Наука» (Сибирское отделение), 1973.
- Левенталь Г. Б., Попырин Л. С. Оптимизация теплоэнергетических установок. М., «Энергия», 1970.
- Методы математического моделирования и оптимизации теплоэнергетических установок. М., «Наука», 1972.
- Попырин Л. С. «Энергомашиностроение», 1972, № 9, с. 3.
- Корякин Ю. И. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 6, с. 458.
- Попырин Л. С., Наумов Ю. В. «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1972, № 2, с. 140.
- Карпов В. Г. и др. «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1973, № 1, с. 129.
- Попырин Л. С., Каплун С. М. «Теплоэнергетика», 1974, № 6, с. 55.
- Фактор неопределенности при принятии оптимальных решений в больших системах энергетики. Т. 1 и 3. Иркутск, изд. Сибирск. эн-та СО АН СССР, 1974.
- Попырин Л. С. «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1975, № 4, с. 20.