

УДК 621.039.524.2.034.44

Комплексная оптимизация АЭС с водографитовыми реакторами

БАТУРОВ Б. Б., ИВАНОВ А. А., КОРЯКИН Ю. И., НАУМОВ Ю. В., ПОПЫРИН Л. С., СМЕРНОВ В. Г.

Постановка задачи. Рост мощности атомных электростанций во всех развитых странах мира предопределил необходимость существенного расширения объема технико-экономических исследований схем и оборудования АЭС различных типов. Наибольшее распространение в настоящее время получили АЭС с водоохлаждаемыми тепловыми реакторами; роль АЭС этого типа будет существенной и в будущем. Хотя параметры теплоносителя и рабочего тела, характеристики оборудования и технологические схемы таких АЭС стали уже типовыми, технико-экономические исследования в этом направлении остаются актуальными. Это связано с необходимостью достижения максимального экономического эффекта при массовом строительстве АЭС и с возможностью получения более точной информации о технико-экономических характеристиках оборудования благодаря накоплению опыта проектирования, сооружения и эксплуатации станций. Кроме того, рост единичной мощности реакторов, внедрение усовершенствованного оборудования, изменение условий работы АЭС в электроэнергетических системах в связи с увеличением их доли в общей мощности электростанций требуют своевременно исследовать вопрос о том, как влияют отмеченные факторы на оптимальный профиль оборудования и параметры АЭС для осуществления рациональной технической политики в этой области.

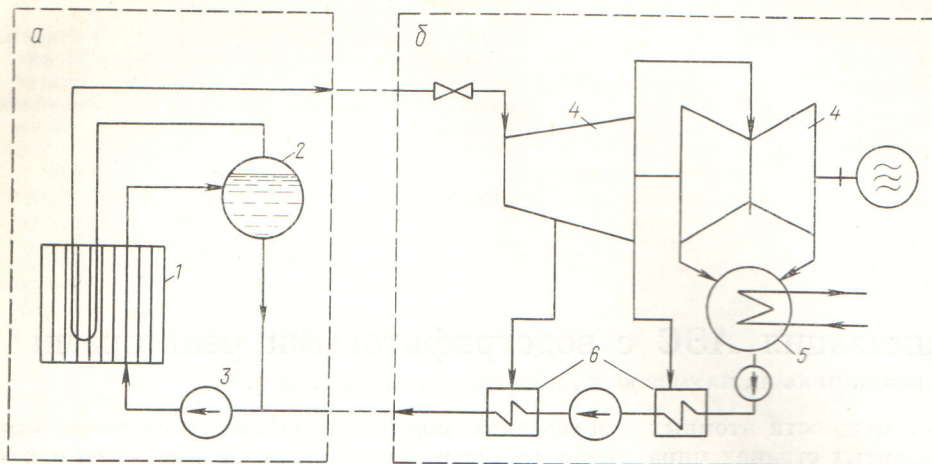
При проектировании оборудования АЭС, особенно на начальных стадиях, необходимы многовариантные оптимизационные расчеты в связи с неопределенностью исходной информации, несовершенством методов расчета некоторых характеристик оборудования и корректировкой технических решений в процессе проектирования. Для подобных исследований весьма эффективно использовать метод математического моделирования [1, 2]. Применение мате-

матических моделей позволяет достаточно быстро провести комплексную оптимизацию параметров АЭС, оценить влияние отдельных факторов на оптимальные параметры, оценить изменение экономических показателей АЭС при изменении в широком диапазоне основных технических параметров станции, выделить область перспективных параметров и наметить направления детальных проработок оборудования. Инженерный анализ большого объема информации, получаемой при многовариантных расчетах на математических моделях, повышает качество проектирования.

Основные требования, предъявляемые к методике математического моделирования АЭС, — это корректный учет внешних связей АЭС, достаточно точное для решения поставленной задачи описание рабочих процессов и характеристик оборудования, а также, что весьма существенно, возможность реализации методики в моделях (алгоритмах, программах) с использованием доступных в настоящее время средств вычислительной техники.

Опыт разработки и использования математических моделей частей АЭС (реактор, паротурбинная установка) показывает, что единая модель блока АЭС не может быть реализована при использовании современных ЭВМ в удобном для проведения исследования виде из-за большого объема модели и большого числа оптимизируемых параметров. Приемлемое решение в данном случае — расчленение АЭС на две части и разработка двух математических моделей [3].

Целесообразно разделить АЭС по функциональному признаку на реакторную часть (производство тепловой энергии) и теплосиловую часть — ТСЧ (преобразование тепловой энергии в электрическую), что соответствует сложившемуся разделению труда между проектно-конструкторскими организациями, раз-



Р и с. 1. Реакторная (а) и теплосиловая (б) части АЭС:

1 — реактор; 2 — барабан-сепаратор; 3 — ГЦН; 4 — паровые турбины; 5 — конденсатор турбины; 6 — система регенеративного подогрева

рабатывающими оборудование для АЭС (рис. 1).

К реакторной части АЭС относятся реактор и связанные с ним устройства и сооружения (здание, перегрузочные устройства, спецводочистка и т. д.), к теплосиловой части АЭС — паротурбинная установка, электрооборудование блока, система водоснабжения и т. д. Для обеспечения совместимости моделей частей АЭС параметры, связывающие реактор и паротурбинную установку (тепловая мощность реактора, параметры пара и питательной воды), должны иметь одинаковые значения для моделей каждой части АЭС.

Процесс комплексной оптимизации параметров АЭС при использовании двух моделей также расчленяется на два этапа. Для фиксированной тепловой мощности реактора намечается ряд значений параметров пара и питательной воды. На первом этапе для каждого намеченного сочетания связующих параметров проводится оптимизация внутренних параметров реакторной и теплосиловой частей АЭС с помощью соответствующих моделей. На модели реакторной части АЭС определяются теплофизические и ядерно-физические характеристики реактора, режим перегрузки и т. п., соответствующие минимальным приведенным затратам на производство тепловой энергии заданного качества и количества. Разница в расходе электроэнергии на привод механизмов собственных нужд реакторной части АЭС в вариантах, отличающихся параметрами, компенсируется замыкающей электроэнергией. На модели теплосиловой части АЭС определяются конечные параметры пара, параметры и схема промежуточного перегрева пара и регенеративного

подогрева питательной воды, соответствующие минимальным затратам на преобразование тепловой энергии заданного качества и количества в электрическую. Различие в мощности, отдаваемой в энергосистему блоком АЭС в вариантах с разными параметрами, также компенсируется замыкающей станцией. Естественно, режим использования АЭС и характеристики замыкающей станции принимаются одинаковыми для обеих частей АЭС. При соблюдении этих условий можно определить суммарные затраты по АЭС для каждого сочетания значений связующих параметров.

На втором этапе оптимизируются параметры, связывающие реакторную и теплосиловую части АЭС. При этом можно использовать или аппроксимацию полученных на первом этапе результатов в виде аналитической зависимости приведенных затрат по АЭС от значений связующих параметров с последующим применением алгоритмов минимизации многомерных функций, или более подходящий для инженерного анализа графический метод.

Модель реактора

При разработке математической модели реактора ставилась задача по возможности сократить время расчета одного варианта реактора, сохранив достаточную точность. В алгоритм модели после предварительного технико-экономического анализа был включен расчет только таких характеристик реактора, которые существенно влияют на критерий экономической эффективности или его составляющие. Применение аппроксимационных методов позволило создать «быстрые» программы для ЭВМ и корректировать расчетные формулы по мере

поступления новой информации. Для оценки степени адекватности математической модели и реального реактора показатели реальных реакторов сравнивали с теми же показателями, рассчитанными на модели при одинаковых исходных данных.

Модель реактора строилась по блочному принципу. Такой подход позволяет при необходимости быстро заменить в модели тот или иной блок (например, при смене методики расчета какого-либо узла или процесса). Поскольку одна из решаемых на модели технических задач — сравнение водографитовых реакторов на насыщенном паре с реакторами с ядерным перегревом пара, были разработаны две модели реакторов, причем характеристики оборудования в модели реактора с насыщенным паром и в испарительной части модели реактора с ядерным перегревом пара принимались максимальными близкими.

Реактор на насыщенном паре. Математическая модель реактора содержит отдельные блоки расчета теплофизических, теплотехнических, гидравлических и нейтронно-физических характеристик реактора, а также блок расчета экономических показателей реакторной части АЭС. В оборудовании реакторного отделения выделены следующие узлы: технологические каналы, замедлитель, отражатель, система управления и защиты, системы контрольно-измерительных приборов и контроля герметичности оболочек твэлов, металлоконструкции реактора, сепараторы и трубопроводы циркуляционного контура с арматурой, циркуляционные насосы, здание реакторного отделения, прочее реакторное оборудование. За основу принимают проектно-технические решения по РБМК-1000.

В процессе работы модели оптимизируются такие независимые параметры, как начальное обогащение топлива, диаметр твэла, число технологических каналов, шаг решетки, зазор между твэлами, паросодержание на выходе из активной зоны, высота активной зоны, коэффициент «уплощения» тепловыделения по радиусу активной зоны, число твэлов в сборке. Техническими ограничениями являются максимальные температуры оболочки твэла, замедлителя и топлива, отношение шага решетки к диаметру канала, а также коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи.

Реактор с ядерным перегревом пара. В модель реактора с ядерным перегревом пара практически полностью входят узлы, описанные в модели реактора на насыщенном паре, образуя под-

модель испарительной части. Подмодель перегревательной части включает перегревательные технологические каналы, систему контрольно-измерительных приборов и контроля герметичности оболочек твэлов, металлоконструкции и трубопроводы насыщенного и перегретого пара. В подмодели перегревательной части дополнительно оптимизируются некоторые внутренние параметры: диаметр твэла и число твэлов в кассете. Кроме того, в число оптимизируемых параметров реактора включены и параметры связи между подмоделями испарительной и перегревательной частей реактора, а также перепад давления в перегревательных каналах и отношение числа испарительных и перегревательных каналов.

При оптимизации внутренних параметров перегревательной части учитывают следующие технические ограничения: максимальные температуры топлива, замедлителя, оболочки твэлов и канальной трубы; максимальную скорость теплоносителя, глубину выгорания топлива, а также минимальное отношение диаметра канальной трубы и шага решетки.

Для оптимизации параметров реакторной части АЭС использован комплекс-метод [4]. Достоинство этого метода нелинейного программирования — простота алгоритма и отсутствие необходимости вычислять частные производные целевой функции. Кроме того, случайный выбор исходного комплекса облегчает поиск глобального оптимума. Математическая модель реакторной части АЭС реализована в виде программы на языке АЛГОЛ-60 для ЭВМ М-220.

Модель теплосиловой части АЭС

Математическая модель ТСЧ АЭС с водоохлаждаемым реактором предназначена для исследования тепловой экономичности турбоустановок и комплексной технико-экономической оптимизации параметров и структуры технологической схемы теплосиловой части атомных электростанций, использующих в качестве рабочего тела водяной пар. Входные параметры модели — тепловая мощность реактора и параметры теплоносителя на входе и выходе из реактора. Модель теплосиловой части представляет собой математическую модель паротурбинной установки, дополненную блоком определения замыкающих затрат на электроэнергию и суммарных приведенных затрат по ТСЧ АЭС.

Математическая модель паротурбинной установки охватывает паровую турбину с системой

регенеративного подогрева питательной воды и промежуточного снижения влажности пара в турбине (промежуточная сепарация влаги и промежуточный перегрев пара), турбогенератор, электрооборудование блока, конденсационное устройство и систему технического водоснабжения. В модели предусмотрена возможность расчета (и оптимизации) схем паротурбинной установки, содержащей два промежуточных перегрева пара (каждый может быть двухступенчатым). Промежуточный перегрев пара может осуществляться только паром, отбираемым перед турбиной или из промежуточных ступеней турбины. В схеме промежуточного перегрева оптимизируются давление греющего и перегреваемого пара, конечная разность температуры и скорость пара в каждой ступени перегрева. Соотношение этих параметров между собой и с начальными параметрами пара определяет схему промежуточного перегрева.

Схема регенеративного подогрева питательной воды может содержать до 11 ступеней подогрева и деаэрактор. Оптимизируются число ступеней подогрева и конечная разность температуры в подогревателях и охладителях дренажа соответственно в группах подогревателей высокого и низкого давления.

Модели построены таким образом, что значения примерно 20 оптимизируемых параметров термодинамического цикла позволяют полностью определить структуру тепловой схемы паротурбинной установки, которая специально не задается, а строится по алгоритму на основе анализа соотношений, задаваемых параметрами цикла. При таком подходе к моделированию схемы турбоустановки возможна одновременная оптимизация термодинамических параметров цикла и структуры тепловой схемы [5].

Модель паротурбинной установки построена по блочному принципу, она состоит из моделей укрупненных элементов (фрагментов) тепловой схемы и программы управления расчетом, которая определяет очередность работы моделей элементов и осуществляет обмен информацией между ними. Модели отдельных элементов содержат алгоритмы определения экономичности процесса расширения пара (отсеки турбины и приводная турбина питательного насоса), алгоритмы теплового, гидродинамического, конструктивно-компоновочного расчетов (теплообменники), алгоритмы определения стоимости элементов оборудования и мощности вспомогательных механизмов. Для определения технико-экономических характеристик системы водоснабжения используют оптимальные пара-

метры низкопотенциального комплекса АЭС, получаемые с помощью соответствующей модели [5].

Результатом работы модели являются полезная мощность блока, приведенные затраты по оборудованию и сооружениям, входящим в модель, и суммарные приведенные затраты, включающие (кроме указанных) затраты по замыкающей электроэнергии, приводящей все варианты ТСЧ к равному энергетическому эффекту. Модель реализована в виде комплекса программ на языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6. Для оптимизации параметров используется подпрограмма, реализующая одну из модификаций градиентного метода.

Результаты оптимизационных исследований

Оптимизационные исследования проведены для блока АЭС с водографитовым каналным реактором. Тепловая мощность блока 3 000 МВт. Связующие параметры моделей — параметры пара и питательной воды — изменялись в широких пределах. Диапазон давления от 4,4 до 13,0 МПа обычно принимается для паротурбинных установок АЭС и частично для электростанций на органическом топливе. Температура пара для каждого значения давления соответствует диапазону от температуры насыщения до 540 °С. Температура питательной воды — от 165 °С (без подогревателей высокого давления) до температуры, соответствующей недогреву на 30 °С до насыщения при данном начальном давлении пара. Предполагается, что исследуемый блок вводится на АЭС, расположенной в центре европейской части СССР. Режим использования блока характеризуется годовым числом часов использования установленной мощности (7000 ч/год). Замыкающие затраты на электроэнергию составляют 1,2 коп/(кВт·ч).

Реакторная часть АЭС. Влияние начальных параметров пара на внутренние характеристики реактора достаточно существенно и наиболее наглядно выражается в необходимости изменения средней мощности технологических каналов (иными словами, энергонапряженности топлива) при изменении термодинамических параметров. Как следует из рис. 2, при увеличении давления пара перед турбиной от 4,4 до 13,0 МПа необходимо уменьшить среднюю мощность технологических испарительных каналов (ИК) на 14%, поскольку с ростом давления растет температура теплоносителя и, следовательно, температура графита, предельно допустимое

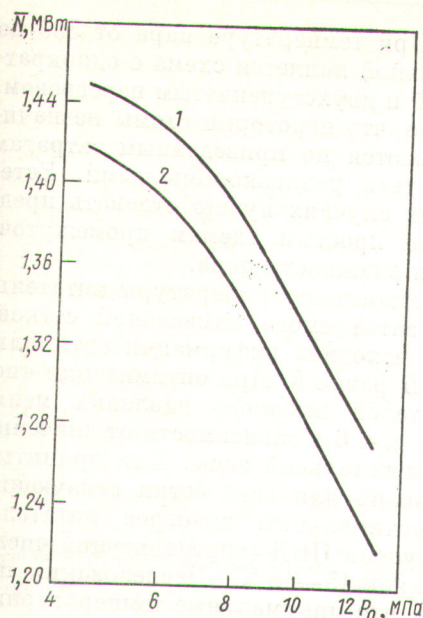


Рис. 2. Зависимость средней мощности технологических каналов от давления пара перед турбиной в реакторе на насыщенном паре (1) и в технологических каналах испарительной части реактора с перегревом (2).

значение которой в данном случае определяет предельную мощность технологических каналов. По этой же причине рост температуры перегрева вызывает уменьшение средней мощности перегревателей каналов (ПК).

При повышении начальных параметров уменьшается диаметр твэлов (с 14 до 8 мм) и соответственно увеличивается число твэлов в сборке ПК, уменьшаются начальное обогащение топлива ПК (с 3,8 до 2%) и наружный диаметр канальной трубы ПК (с 95 до 75 мм). В испарительных каналах, помимо средней мощности канала, существенно уменьшается также паросодержание теплоносителя на выходе из активной зоны (с 0,2 до 0,11).

Для намеченного ряда значений связующих параметров были проведены оптимизационные расчеты и получены зависимости затрат по реакторной части АЭС от температуры пара перед турбиной при различном начальном давлении для нескольких значений температуры питательной воды. На рис. 3 представлены эти зависимости для температуры питательной воды 165 °С. В качестве базового варианта принята АЭС на насыщенном паре с давлением 6,5 МПа.

При введении перегрева пара резко увеличиваются приведенные затраты в связи с появлением в реакторе перегревателей каналов со стальными оболочками твэлов, поскольку

температура поверхности твэлов в перегревателях каналов превышает предельно допустимую для циркония. С ростом начального перегрева пара растет максимальная температура канальной трубы, и, как показывает анализ, следующим фактором, вызывающим смену материала канальной трубы и соответствующее скачкообразное изменение затрат, является предельная температура канальной трубы. Исследования показали, что температура канальной трубы предельна при температуре перегретого пара 540, 500, 480 и 465 °С (начальные давления соответственно 4,4; 6,5; 9,0 и 13,0 МПа). При превышении указанных температур в ПК предполагается использовать разрабатываемый в настоящее время более жаропрочный сплав циркония.

Теплосиловая часть АЭС. Результаты исследований показали сложную взаимосвязь оптимальной структуры технологической схемы и оптимальных значений термодинамических параметров цикла и характеристик оборудования, а также зависимость их от значений начальных параметров. Наиболее существенно влияют начальные параметры на схему и параметры системы промежуточного снижения влажности пара. Повышение начальной температуры пара вызывает последовательное упрощение оптимальной схемы промежуточного снижения влажности пара в турбине, в связи с чем невоз-

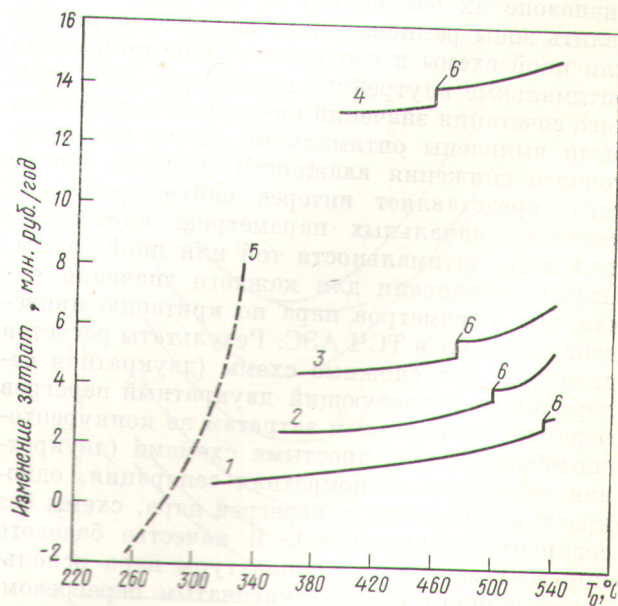


Рис. 3. Зависимость изменения приведенных затрат по реакторной части от температуры пара при давлении 4,4 (1); 6,5 (2); 9,0 (3) и 13,0 (4) МПа (5 — насыщенный пар; 6 — смена материала канальной трубы)

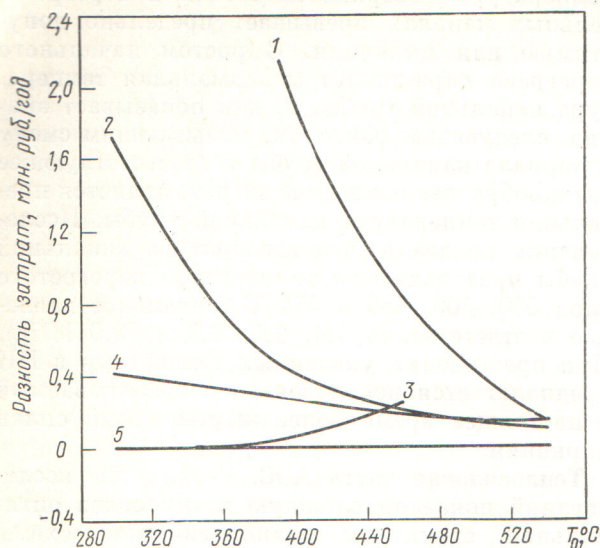


Рис. 4. Зависимость промежуточного снижения влажности пара в турбине от начальной температуры пара (давление пара 9,0 МПа):

1 — без системы промежуточного снижения влажности; 2 — один сепаратор; 3 — два сепаратора; 4 — один сепаратор и одноступенчатый перегрев; 5 — один сепаратор и двухступенчатый перегрев

можно получить для большинства параметров непрерывные зависимости их оптимальных значений от начальных параметров пара во всем диапазоне их изменения. Можно только определить зоны рационального использования той или иной схемы и соответствующие этой схеме оптимальные внутренние параметры. Для каждого сочетания значений начальных параметров были выявлены оптимальные схемы промежуточного снижения влажности (рис. 4). Кроме того, представляет интерес найти граничные значения начальных параметров, определяющие зоны оптимальности той или иной схемы. Схемы сравнивали для каждого значения начальных параметров пара по критерию приведенных затрат в ТСЧ АЭС. Результаты расчетов показали, что сложные схемы (двукратная сепарация и последующий двукратный перегрев пара) по приведенным затратам не конкурентоспособны с более простыми схемами (двукратная сепарация, однократная сепарация, однократная сепарация и перегрев пара, схемы без сепарации и перегрева). В качестве базового при всех значениях температуры пара использован вариант с двухступенчатым перегревом. Для начального давления пара 9,0 МПа при температуре насыщения до 360 °C равноэкономичны схемы с двукратной сепарацией и однократной сепарацией и двухступенчатым пере-

гревом пара. При температуре пара от 360 до 540 °C оптимальной является схема с однократной сепарацией и двухступенчатым перегревом. Из рис. 4 видно, что некоторые схемы незначительно различаются по приведенным затратам и могут считаться равноэкономичными. Естественно, в этих случаях нужно отдавать предпочтение более простым схемам промежуточного снижения влажности пара.

Для всего диапазона температуры питательной воды, охватываемого намеченной сеткой, при принятой исходной информации оптимальное число ПНД равно 5. При оптимизации число подогревателей высокого давления менялось от 1 до 5 или 6 в зависимости от значения температуры питательной воды. Для принятых исходных условий для всей сетки связующих параметров оптимальный подогрев питательной воды в ступени ПВД (определяющий число ПВД) составляет 15–18 °C. Исследования показали также, что минимальные температурные напоры в ИВД и ПНД оказывают незначительное влияние на приведенные затраты по ТСЧ АЭС. Оптимальный минимальный температурный напор в ПВД и ПНД составляет 5–6 и 3–4 °C соответственно.

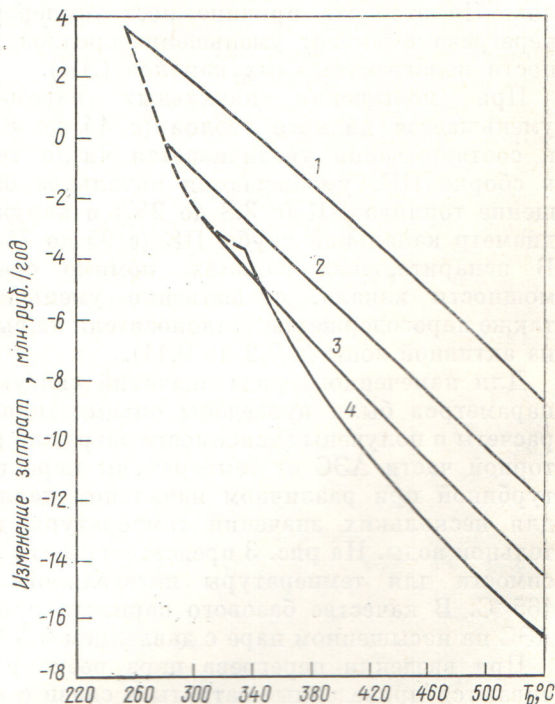


Рис. 5. Зависимость изменения приведенных затрат по ТСЧ АЭС от начальной температуры при давлении пара 4,4 (1); 6,5 (2); 9,0 (3) и 13,01 (4) МПа

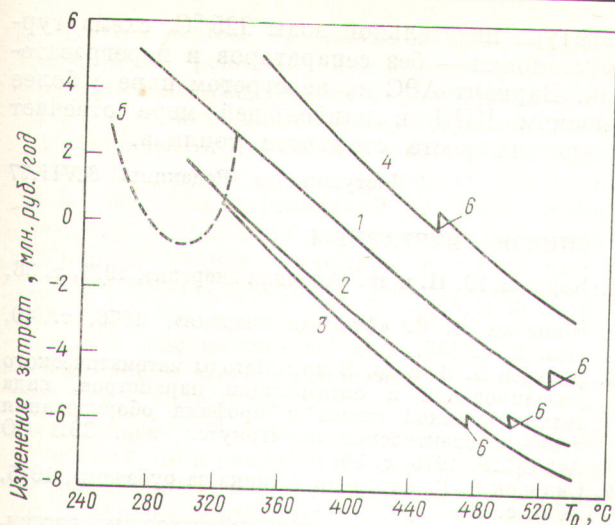


Рис. 6. Зависимость изменения затрат по АЭС от температуры перегрева пара при начальном давлении пара 4,4 (1); 6,5 (2); 9,0 (3) и 13,0 (4) МПа (5 — насыщенный пар; 6 — смена материала канальной трубы)

В результате оптимизации ТСЧ АЭС получены оптимальные схемы промежуточного снижения влажности пара в турбине и определена зависимость приведенных затрат от начальных параметров пара при температуре питательной воды 165 °C (рис. 5).

Результаты исследований по АЭС

Суммирование результатов оптимизационных исследований частей АЭС позволило получить оптимальные характеристики АЭС в целом для каждого узла рассмотренной сетки начальных параметров пара (рис. 6, 7).

При введении начального перегрева вначале резко увеличиваются затраты по АЭС, так как используются перегревателиные каналы, в которых циркониевые оболочки твэлов заменяются стальными. Дальнейшее увеличение температуры перегрева вызывает снижение затрат по АЭС примерно на 0,3—0,5 млн. руб./год на каждые 10 °C в связи с существенным ростом тепловой экономичности цикла. Относительный прирост КПД при введении перегрева пара на 10 °C составляет ~1,28%. Повышение начального давления пара также повышает КПД станции, относительный прирост составляет ~2% на 1,0 МПа повышения начального давления.

Как следует из рис. 7, наилучшие показатели АЭС соответствуют максимальной температуре перегрева пара. Следует отметить также, что

каждому значению температуры перегрева пара соответствует свое оптимальное начальное давление и затраты по АЭС минимальны при давлении пара 8—10 МПа.

Оптимизационные технико-экономические исследования показали, что с ростом начального давления пара оптимальная температура питательной воды увеличивается. Изменение начального давления на 1,0 МПа приводит к изменению оптимальной температуры питательной воды в среднем на 7 °C. Но начальная температура пара практически не влияет на оптимальную температуру питательной воды.

Анализ результатов технико-экономических исследований позволил сделать следующие выводы.

1. Для АЭС с водографитовым реактором существуют два локальных оптимума по приведенным затратам: для насыщенного и перегретого пара.

2. Для АЭС на насыщенном паре при существующем соотношении цен оптимальное давление составляет 0,9 МПа, оптимальная температура питательной воды 220 °C, схема снижения влажности пара в турбине — с двумя сепараторами. Следует заметить, что изменение экономичности АЭС при давлении пара 6,5—9,0 МПа относительно небольшое (~0,5 млн. руб./год). Поэтому принимать решение об из-

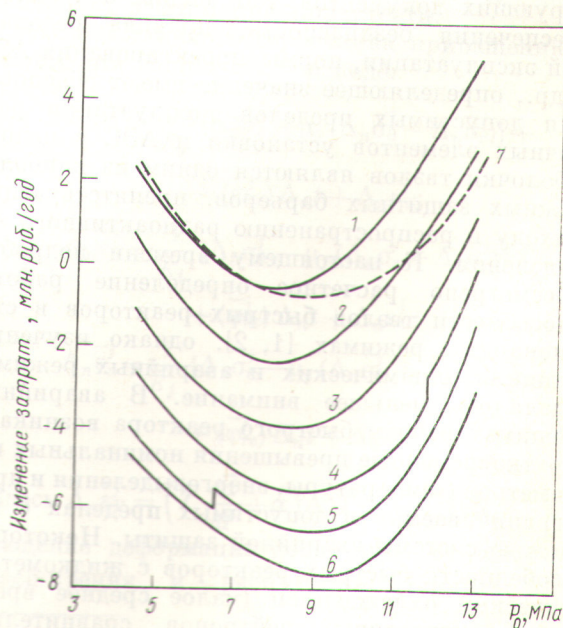


Рис. 7. Зависимость изменения приведенных затрат по АЭС от начального давления при температуре пара 340 (1); 380 (2); 420 (3); 460 (4); 500 (5) и 540 °C (6) (7 — насыщенный пар)

менении оптимальных параметров АЭС следует только после сопоставления размера эффекта по АЭС и затрат в машиностроительную базу.

3. Введение перегрева пара приводит к уменьшению удельной стоимости и приведенных затрат по АЭС по сравнению с оптимизированной АЭС на насыщенном паре, но перегрев пара менее чем на 50—70 °С от состояния насыщения не рационален. Эффект от ядерного перегрева наблюдается при перегреве пара на большую величину и с ростом температуры пара увеличивается. Увеличение температуры перегрева приводит к снижению приведенных затрат по АЭС примерно на 0,4 млн. руб./год на каждые 10 °С для блока мощностью 1000 МВт.

4. Для АЭС с ядерным перегревом при условии разработки специальных жаропрочных сплавов циркония (для температуры 450—500 °С) оптимальное давление составляет 9,0—9,5 МПа при температуре пара 540 °С, тем-

пература питательной воды 225 °С, схема турбоустановки — без сепараторов и перегревателей. Вариант АЭС на перегретом паре с более высоким КПД в наибольшей мере отвечает тенденции роста стоимости топлива.

Поступила в Редакцию 6.VII.77

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корякин Ю. И. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 6, с. 458.
2. Попырин Л. С. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 2, с. 145.
3. Батуров Б. Б. и др. В кн.: Методы математического моделирования и оптимизации параметров, вида технологической схемы и профиля оборудования атомных электростанций. Иркутск, изд. СЭИ СО АН СССР, 1976, с. 36.
4. Смирнов В. Г. «Атомная техника за рубежом», 1975, № 6, с. 10.
5. Комплексная оптимизация теплосиловых систем. Под ред. Л. С. Попырина. Новосибирск, «Наука», 1976.

УДК 621.039.58

Анализ влияния аварийных режимов работы быстрого энергетического реактора на работоспособность ТВЭЛОВ

ПРОШКИН А. А., БАГДАСАРОВ Ю. Е., ЛИХАЧЕВ Ю. И., ЗАБУДЬКО Л. М., БУКША Ю. К.

При разработке и уточнении таких регламентирующих документов, как общие положения обеспечения безопасности, правила безопасной эксплуатации, нормы проектирования АЭС и др., определяющее значение имеют обоснования допустимых пределов эксплуатации различных элементов установки и АЭС в целом. Оболочки ТВЭЛОВ являются одним из наиболее важных защитных барьеров, препятствующих выходу и распространению радиоактивного загрязнения. К настоящему времени подробно рассмотрено расчетное определение работоспособности ТВЭЛОВ быстрых реакторов в стационарных режимах [1, 2], однако изучению влияния динамических и аварийных режимов уделяется меньшее внимание. В аварийных режимах работы быстрого реактора возникают кратковременные превышения номинальных параметров (температуры, энерговыделения и др.), ограничиваемые в допустимых пределах с помощью системы аварийной защиты. Некоторые особенности быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением (малое среднее время жизни мгновенных нейтронов, сравнительно слабая обратная связь по реактивности и др. [1]) осложняют работу защитных систем. Поэтому

допустимые отклонения параметров должны быть тщательно обоснованы.

В аварийных режимах работы реактора возникают трудности, связанные с работоспособностью ТВЭЛОВ. При повышении температуры в активной зоне, с одной стороны, ухудшаются механические свойства материала оболочек ТВЭЛОВ, а с другой — растет напряжение в результате увеличения давления газообразных продуктов деления и механического взаимодействия топлива и оболочки вследствие разности их термического расширения, изменения температурных перепадов по длине и толщине оболочек. Эти явления вызывают сложные изменения напряженно-деформированного состояния оболочек. Очевидно, что допустимые отклонения параметров должны быть такими, чтобы вклад аварийных режимов в общую повреждаемость материала оболочек не вызывал значительного уменьшения срока службы ТВЭЛОВ.

При анализе влияния аварийных отклонений параметров на работоспособность ТВЭЛОВ реактора типа БН-600 рассматривалось только верхнее сечение активной части ТВЭЛА с максимальной температурой оболочки. Это сечение