

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ МАНЕВРНОСТИ РЕАКТОРОВ ВВЭР

Повышение маневренности реакторов ВВЭР — проблема, которой настоящее время уделяется большое внимание. Работы в основном ведутся в направлении поиска путей преодоления ксенонового переотравления при циклических изменениях мощности реактора в условиях ограниченного запаса реактивности (конец топливного цикла). В работе [8] указано на возможность увеличения запаса реактивности для преодоления ксенонового переотравления за счет понижения температуры теплоносителя первого контура. Этот метод практически реализован в реакторе ВВЭР-440 [70]. Сущность метода состоит в следующем. При остановах реактора или при глубоких разгрузках происходит снижение температуры теплоносителя. Если к этому добавить снижение давления пара во втором контуре, что также приведет к уменьшению температуры воды первого контура, то запас реактивности реактора может быть повышен на значительную величину. Восстановление мощности реактора должно проводиться при скользящем давлении пара во втором контуре [28]. При этом параметры первого и второго контура восстанавливаются до номинальных по мере высвобождения положительной реактивности вследствие "выжигания" накопившихся ядер ксенона нейтронным потоком.

Требования по маневренности, предъявляемые к энергоблокам АЭС, относятся к скорости и диапазону изменения электрической нагрузки блока. Степень же ксенонового переотравления зависит только от скорости и диапазона изменения мощности реактора. Проектами энергоблока АЭС с ВВЭР предусматривается возможность байпасирования в конденсатор турбины до 50% номинального расхода острого пара на турбину. В работе [18] предложено при выводе энергоблока АЭС в "горячий" резерв на ночь, а также при кратковременных аварийных остановах энергоблока разгружать реактор не до нуля, а до определенного, заранее рассчитанного уровня мощности. В этом случае глубина "иодной" ямы будет значительно меньше, чем в случае полного сброса мощности.

Еще один путь преодоления ксенонового переотравления основан на минимизации его с помощью оптимального управления мощностью реактора в переходном режиме. Поскольку концентрация ксенона чувствительна к изменению мощности, можно так управлять мощностью реактора, что в течение разгрузки переотравление не превысит допустимого значения, определяемого запасом реактивности [71].

Вопросы оптимизации ксеноновых переходных процессов в реакторе развиты в многочисленных работах А.П. Рудика и обобщены в [71]. Среди этих вопросов особое значение для повышения маневренности реактора имеют такие: минимизация продолжительности режима подготовки к снижению мощности на заданное время; максимальная длитель-

ность работы реактора на номинальной мощности в течение суточного цикла эксплуатации с плановой разгрузкой мощности; минимизация режима подготовки к снижению мощности реактора с сохранением возможности ее подъема до номинального уровня в любой момент времени и т.д. Расчетными исследованиями оптимальных режимов подготовки к снижению мощности равновесно отравленного реактора ВВЭР-440 установлено, что период топливного цикла, в котором реактор может участвовать в регулировании мощности энергосистемы, может быть увеличен на 8+12%; при этом число переключений мощности реактора в подготавливательный период может быть уменьшено до 2–5.

В последующих разделах главы приведены результаты, полученные при исследовании путей расширения возможностей участия реактора ВВЭР в регулировании мощности энергосистем.

4.1. Влияние оперативного запаса реактивности на маневренные характеристики ВВЭР

Чем с большей скоростью может быть реализован имеющийся запас реактивности и чем больше сам запас, тем шире возможность для маневрирования мощностью реактора. До тех пор, пока запас реактивности больше максимального ксенонового переотравления, теоретический регулировочный диапазон составляет 100% мощности реактора. Практически же он гораздо меньше из-за малой скорости реализации запаса реактивности, который в большей своей части скомпенсирован борной кислотой, растворенной в теплоносителе. Меньшая часть запаса реактивности сосредоточена на управляющей группе регулирующих ТВС. Сильное влияние высотного положения группы регулирующих ТВС на распределение энерговыделения в реакторе ВВЭР ограничивает оперативный запас реактивности в первом топливном цикле (для ВВЭР-440 величиной 0,007). В стационарном топливном цикле неравномерность энерговыделения по объему активной зоны значительно меньше, чем в первом, и, кроме того, снижается по мере выгорания топлива [44]. Появляющиеся резервы в коэффициентах неравномерности энерговыделения могут быть использованы для увеличения оперативного запаса реактивности. При положении управляющей группы ТВС 100 см от низа активной зоны оперативный запас реактивности реактора ВВЭР-440 составляет 0,017. При этом коэффициенты неравномерности энерговыделения не превышают допустимые для номинальной мощности реактора.

Для исследования влияния оперативного запаса реактивности на маневренные характеристики реактора ВВЭР с точки зрения преодоления ксенонового переотравления выполнен комплекс расчетов применительно к стационарной топливной загрузке реактора ВВЭР-440. Ксеноновые процессы, сопутствующие изменению мощности, моделировались с помощью программы ФИКС для начала четвертой топливной загрузки, рассчитанной на 7200 эффективных часов работы [44]. Расчеты велись в пред-

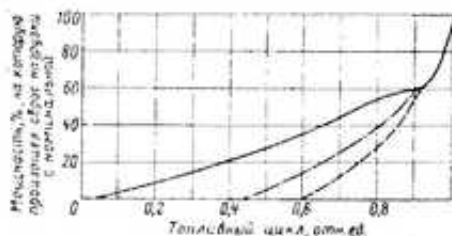


Рис. 4.1. Расчетная зависимость регулировочного диапазона реактора ВВЭР-440 от момента стационарного топливного цикла (запас реактивности на управляющей группе ТВС СУЗ 0,7 %; β — относительная скорость ввода бора из воды первого контура):
 — $\beta = 0,05 \text{ ч}^{-1}$; — — — $\beta = 0,1 \text{ ч}^{-1}$; ···· $\beta = 0,2 \text{ ч}^{-1}$

положении мгновенного изменения мощности реактора. Эффективность борной кислоты, органов регулирования и изменение критической концентрации борной кислоты в течение топливного цикла рассчитывались по программе БИПР-5. Определялась мощность, на которую возможен сброс нагрузки в любой момент времени. Предполагалось, что борная система регулирования вступает в работу в момент сброса нагрузки. Расчеты выполнены для трех значений относительной скорости вывода борной кислоты из теплоносителя первого контура (β): 0,05; 0,1 и 0,2 ч^{-1} , что соответствует расходу подпитки 10, 20 и 40 $\text{м}^3/\text{ч}$.

На рис. 4.1 и 4.2 приведены характеристики маневренности реактора ВВЭР-440 в стационарном топливном цикле, рассчитанные на оперативный запас реактивности на управляющей группе кассет 0,007 и 0,017. Из этих рисунков видно, что увеличение β от 0,05 до 0,2 ч^{-1} существенно расширяет регулировочный диапазон; однако дальнейшее увеличение нерационально. С другой стороны, увеличение оперативного запаса реактивности с 0,007 до 0,017 улучшает маневренные характеристики реактора в еще большей мере, чем увеличение β . В этом случае увеличение быстродействия системы борного регулирования слабо влияет на регулировочный диапазон. Этот факт позволяет рекомендовать режим с увеличенным оперативным запасом реактивности для реакторов ВВЭР, участвующих в регулировании нагрузки энергосистемы и имеющих в своем составе системы борного регулирования с небольшой относительной скоростью вывода бора из теплоносителя первого контура, например для серийного реактора ВВЭР-440.

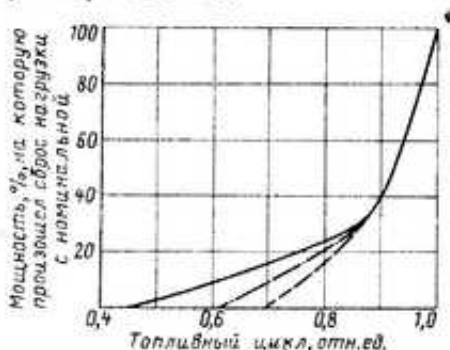


Рис. 4.2. Расчетная зависимость регулировочного диапазона реактора ВВЭР-440 от момента стационарного топливного цикла (запас реактивности на управляющей группе ТВС СУЗ 1,7 %; β — относительная скорость ввода бора из воды первого контура):
 — $\beta = 0,05 \text{ ч}^{-1}$; — — — $\beta = 0,1 \text{ ч}^{-1}$; ···· $\beta = 0,2 \text{ ч}^{-1}$

Кроме расширения регулировочного диапазона реактора увеличение оперативного запаса реактивности позволяет сократить долю участия системы борного регулирования в компенсации ксенонового перерождения. А это значит, что возможно уменьшение объема планоно дренируемых вод первого контура при водообменах, сокращение затрат на переработку этих вод, улучшение радиационной обстановки на АЭС и в окружающей среде.

4.2. Борное регулирование ВВЭР при работе с переменными нагрузками

Использование метода водообмена для изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе главного циркуляционного контура (ГЦК) приводит к накоплению в дренажных баках значительного количества дебалансных вод, содержащих радиоактивные продукты с концентрацией до 10^{-1} Ки/л. Обработка дренажных вод с целью извлечения борной кислоты для повторного использования или захоронения и очистки от радиоактивных продуктов на специальном оборудовании требует дополнительных затрат и ведет к загрязнению помещений и окружающей среды. Получаемые в процессе переработки жидкие радиоактивные отходы, активность и количество которых в значительной мере определяются режимом эксплуатации АЭС, подлежат хранению в специальных емкостях. Данные эксплуатации энергоблоков с реактором ВВЭР-440 показывают, что даже при незначительных водообменах с расходом до $3 \text{ м}^3/\text{ч}$ газовая активность в помещениях дренажных баков возрастает на 3–4 порядка, а суммарная активность газоаerosольных выбросов в атмосферу увеличивается примерно в 2 раза.

При эксплуатации реактора ВВЭР-440 в базисе нагрузок объем дренажных вод (с учетом неорганизованных протечек) за топливный цикл составляет примерно 1500 м^3 [72]. При работе реактора в переменном режиме объем планоно дренируемых вод ГЦК увеличится более чем в 10 раз. Применительно к такому режиму работы реактора необходима разработка новых способов изменения содержания борной кислоты в теплоносителе ГЦК, желательного без вывода ее за пределы циркуляционного контура. Организация обратимого изменения содержания борной кислоты в теплоносителе первого контура реактора ВВЭР по замкнутому циклу возможна за счет использования свойства анионообменных смол изменять обменную емкость по борной кислоте при изменении температуры пропускаемого через них раствора [73]. В основе термической регенерации анионообменных смол лежит гидролиз боратной формы анионитов, обуславливающий при изменении температурных условий и некоторых других факторов различную обменную емкость анионитов по борной кислоте. Процесс изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе заключается в следующем: для выведения борной кислоты из теплоносителя раствор ее пропускается через анионит с миви-

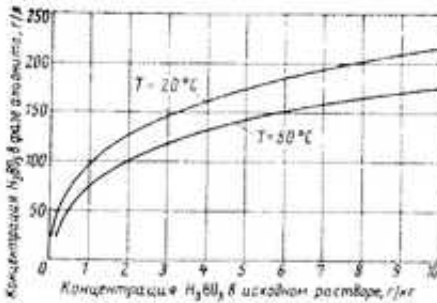


Рис. 4.3. Кривые сорбции анионита АВ-17-8 чс

мальной технически допустимой температурой (обычно 5–10 °С); при необходимости ввода борной кислоты в контур, элюирование производится раствором более высокой температуры, определяемой термостойкостью смолы. Таким образом, используется свойство анионитов увеличивать обменную емкость по борной кислоте при снижении и уменьшать ее при увеличении температуры.

Идея возможности использования обратимой ионообменной сорбции возникла в ИАЭ им. И.В. Курчатова. По инициативе и под руководством проф. Б.А. Алексеева в 1965–1966 гг. были начаты исследования ионообменной сорбции борной кислоты различными ионитами, в частности сильноосновным анионитом АВ-17-8 чс, используемом в системах водоочистки АЭС. Исследовалась зависимость равновесной обменной емкости анионита от концентрации борной кислоты в фильтруемом растворе и от температуры этого раствора. Результаты лабораторных исследований в виде двух изотерм приведены на рис. 4.3. Аналогичные исследования выполнены авторами работы [73].

Лабораторные испытания, сколь бы тщательно они не были выполнены, не позволяют все же полностью имитировать процессы, протекающие в действующих установках. Поэтому необходимы исследования свойств обратимости на реальных водах ядерных энергетических установок. Такие испытания выполнены на реакторных установках ВВЭР-440 [74]. Целью испытаний являлось определение зависимости равновесной обменной емкости анионита АВ-17-8 чс от температуры фильтруемого раствора при нескольких значениях концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура. Испытания проводились на штатной системе очистки теплоносителя первого контура (система спецводоочистк. СВО-1), один из фильтров которой был загружен анионитом АВ-17-8 чс. Объем анионита в анионитовом фильтре СВО-1 составлял во время измерения 1,15 м³. Температура продувочной воды первого контура, поступающей на фильтры СВО-1, изменялась в диапазоне 25–60 °С за счет изменения расхода охлаждающей воды промконтура, поступающей на доохладитель продувки. Оценки показали, что изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура при таких условиях составит примерно 0,15–0,2 г/кг. Из-за ширкой

точности определения содержания борной кислоты в растворе методом титрования проб применялся косвенный метод измерений.

В опыте определялось изменение концентрации борной кислоты в фазе ионита при изменении температуры фильтруемого раствора. Методика измерений была такова. В исходном состоянии температура продувочной воды на фильтрах СВО-1 составляла около 25 °С, параметры реакторной установки соответствовали номинальной мощности. Температура продувочной воды повышалась до 60 °С (максимально допустимая инструкцией по эксплуатации анионита АВ-17-8 чс). Вследствие уменьшения обменной емкости анионита по борной кислоте часть бора из анионита выводилась в циркуляционный контур. Параметры реакторной установки поддерживались на исходном уровне за счет компенсации "отравления" борной кислотой перемещением органов регулирования реактора. Компенсируемая реактивность при изменении концентрации борной кислоты в циркуляционном контуре определялась по интегральной характеристике управляющей группы ТВС, рассчитанной по программе БИПР-5.

После достижения равновесной обменной емкости анионита при температуре фильтруемого раствора борной кислоты 60 °С, что характеризуется стабилизацией положения органов регулирования при неизменных параметрах реакторной установки, температура продувочной воды вновь понижалась до 25 °С. При этом происходило увеличение обменной емкости анионита по борной кислоте и уменьшение ее концентрации в теплоносителе первого контура. Высвобождаемая положительная реактивность компенсировалась соответствующим перемещением органов регулирования.

Изменение температуры продувочной воды на фильтры СВО-1 в регулировочном диапазоне производилось за сравнительно продолжительный промежуток времени (4-5 ч), что связано с техническими возможностями установки. Измерения были проведены для двух начальных значений концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура при работе блоков Кольской АЭС на номинальном уровне мощности. Изменение обменной емкости анионита АВ-17-8 чс по борной кислоте при изменении температуры фильтруемого раствора вычислялось по формуле

$$C^{T_1} - C^{T_2} = \frac{d\rho}{d\rho/dC} \gamma \frac{V_{1k}}{V_a}, \quad (4.1)$$

где C^T - равновесная концентрация борной кислоты в фазе анионита при температуре T ; $d\rho$ - компенсируемая реактивность; $d\rho/dC$ - дифференциальная эффективность борной кислоты; γ - удельный вес теплоносителя при рабочей температуре; V_{1k} - объем воды в циркуляционном контуре реактора; V_a - объем анионита.

Дифференциальная эффективность борной кислоты рассчитывалась по программе БИПР-5. Расход теплоносителя через установку СВО-1 во

Таблица 4.1. Результаты исследования свойств температурной сорбции-десорб

Исходная концентрация H_2BO_3 в первом контуре, г/кг	Изменение температуры фильтруемой воды, °С	Изменение положения управляющей группы, см	Изменение реактивности, %	pH воды первого контура, абс. ед.	Концентрация аммиака в воде первого контура, мг/кг
1,4	25 - 58	117 - 143	0,26	7,4	4,9
3,1	28 - 59	167 - 187	0,30	7,5	23,0

время измерения составляло 20 г/ч. Условия и результаты измерений приведены в табл. 4.1. По кривым, приведенным на рис. 4.3, также можно определить изменение обменной емкости анионита при изменении температуры раствора. Соответствующие величины для исходных концентраций борной кислоты в теплоносителе 1,4 и 3,1 г/кг применительно к условиям описанных испытаний составляют 20 и 28 г/л при изменении температуры в диапазоне 20–50 °С. Таким образом, наблюдается удовлетворительное согласие между данными испытаний на реальных водах действующей промышленной установки и испытаний в условиях лаборатории.

Эффект изменения обменной емкости анионита по отношению к борной кислоте при изменении температуры может быть использован для обратимого изменения содержания H_2BO_3 в теплоносителе практически во всех режимах работы энергетической установки: остановка реактора на перегрузку и пуск после перегрузки, работа реактора в базовом режиме, работа реактора в режимах с переменными нагрузками. Наиболее перспективным представляется использование обратимого свойства анионита по отношению к борной кислоте для компенсации изменения запаса реактивности из-за переотравления реактора ксеноном при эксплуатации энергоблока в режиме переменных нагрузок.

В основе схем "термического" регулирования концентрации борной кислоты [57] лежит фильтрование теплоносителя, предварительно очищенного на шгатиом фильтре (смешанного действия или двухступенчатом) байпасной очистки, через ионообменные фильтры, загруженные сильноосновным анионитом в гидроксильной форме. Установки включают в себя теплообменники-холодильники и подогреватели воды перед анионитовыми фильтрами. Характерной особенностью схем является автоматизация управления ими по программе изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе и фильтрате с использованием автоматических бормеров как датчиков в автоматической системе управления концентрацией борной кислоты.

Одной из основных характеристик схем "термического" регулирования концентрации борной кислоты в теплоносителе является объем анионита, необходимый для изменения концентрации в требуемых пределах. Так, на основании данных, приведенных на рис. 4.3, рассчитано,

ции анионита АВ-17-8 час

Концентрация ионов К в воде первого контура, мг/кг	Измененная концентрация H_2BO_3 в фазе анионита, г/л
3,3	24,7
2,4	28,5

что для изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура в пределах, достаточных для преодоления отравления реактора ВВЭР-440 ксеноном-135, при работе энергоблока в режиме ежесуточной разгрузки со 100 до 30% на 7 часов на протяжении большей части топливного цикла объем анионита АВ-17-8 час в филь-

трах должен составлять около 20 м³. Диапазон изменения температуры фильтруемого раствора принимался равным 10–60 °С.

Системы "термического" регулирования концентрации борной кислоты находят все более широкое применение на американских АЭС. По данным [57], это позволяет сократить объем жидких радиоактивных отходов примерно в 10 раз; объем же твердых отходов, т.е. ионообменных смол, при этом несколько увеличивается.

Способ обратимого изменения содержания борной кислоты в теплоносителе, основанный на применении свойств ионообменных смол, не решает полностью проблему борного регулирования ВВЭР при работе последнего с переменными нагрузками. Его использование сопряжено со значительным количеством высокоактивных отходов, получаемых при регенерации и замене обработанных смол.

Для обратимого изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе по замкнутому циклу в пределах, достаточных для преодоления нестационарного отравления ксеноном при ежесуточных ночных разгрузках энергоблока АЭС с ВВЭР, более перспективным представляется применение установки, предложенной в работе [72].

В условиях растущих требований по защите окружающей среды, населения и персонала от радиоактивных загрязнений, связанных с работой АЭС, данная установка может быть включена в состав оборудования маневренных АЭС с реакторами типа ВВЭР.

4.3. Способ увеличения запаса реактивности реактора ВВЭР и снижения тепловых нагрузок в твэлах

Как было показано в предыдущей главе, отложение продуктов коррозии циркуляционного контура на оболочках твэлов приводит к увеличению температуры топливных сердечников. Это явление крайне нежелательно, так как приводит к увеличению тепловых нагрузок в твэлах и снижению запаса реактивности реактора вследствие проявления эффекта Довлера, а следовательно, и к ухудшению маневренных характеристик реактора.

Задача борьбы с отложениями на оболочках твэлов на отечественных АЭС была решена на Кольской АЭС путем корректировки водно-химического режима теплоносителя первого контура [75]. Применительно к реактору ВВЭР-440 был разработан специальный водно-химический режим.

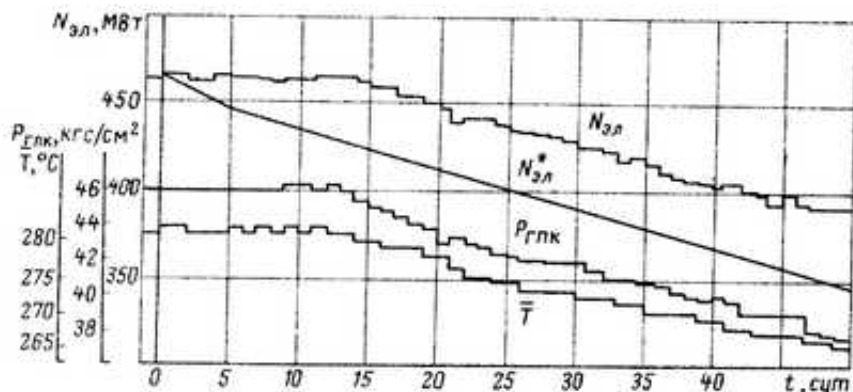


Рис. 4.4. Изменение электрической мощности блока $N_{эл}$, давления в главном паровом коллекторе $P_{ГПК}$, средней температуры теплоносителя первого контура \bar{T} при непрерывном дозировании добавок в воду первого контура реактора ВВЭР-440 (блок № 2 Кольской АЭС, конец четвертого топливного цикла):

$N_{эл}^*$ — ожидаемое снижение мощности блока без обработки воды (опыт, блок № 1)

Впервые коррекционный режим обработки теплоносителя первого контура с целью очистки оболочек твэлов от продуктов коррозии и высвобождения положительной реактивности вследствие снижения температуры топлива был применен на блоке № 2 Кольской АЭС в конце четвертого топливного цикла (август 1979 года). Поскольку прямыми методами невозможно измерить эффект от снятия отложений продуктов коррозии с оболочек твэлов, заключающийся в снижении температуры топлива, для определения эффекта применялись косвенные методы.

После исчерпания запаса реактивности активной зоны при работе на номинальных параметрах, т.е. полного вывода бора из воды первого контура и использования оперативного запаса реактивности на "стержнях" управляющей группы ТВС СУЗ, в теплоноситель первого контура непрерывно вводились специальные добавки. В ходе эксперимента концентрация продуктов коррозии в теплоносителе первого контура возросла с 20–30 до 500–800 мкг/кг, что свидетельствовало о снятии отложений продуктов коррозии с элементов циркуляционного контура. Увеличение длительности топливного цикла II блока на номинальных параметрах составило примерно 14 эф. сут, что эквивалентно высвобождению положительной реактивности 0,42% (рис. 4.4). В дальнейшем блок до останова эксплуатировался в режиме использования мощностного и температурного эффектов.

Высвобождавшаяся положительная реактивность была использована для выработки дополнительной электроэнергии и увеличения глубины выгорания топлива. Повторно эксперимент был проведен на I блоке КАЭС.

При эксплуатации реактора на мощности 107% номинальной в воду первого контура непрерывно вводились добавки в количествах, обеспечивающих концентрацию водорода около 60 нмл/кг. С расходом 30 т/ч теплоноситель подавался на фильтры первой установки спецводоочистки для вывода продуктов коррозии из первого контура. Для повышения эффективности очистки теплоносителя от продуктов коррозии был организован непрерывный водообмен с расходом 6 т/ч с последующей очисткой на фильтрах СВО-2. Фильтры СВО-2 перед этим насыщались по борной кислоте до равновесной концентрации, соответствующей текущей концентрации борной кислоты в теплоносителе. Это обеспечивало водообмен по зам-

квату контуру с постоянным содержанием борной кислоты в продувочной и подпиточной воде. Расход воды при водообмене ограничивался производительностью подпиточного насоса. В то же время такой режим (водообмен по замкнутому контуру с расходом 6 т/ч) полностью имитировал реализованный в унифицированном проекте ВВЭР-440 технологический процесс восстановления организованных протечек через уплотнения ГЦН и позволял заранее отработать технологию ведения обработки теплоносителя первого контура для унифицированного блока.

Через каждые два часа производился отбор проб воды первого контура для определения химического состава теплоносителя.

Содержание водорода и продуктов коррозии в теплоносителе определялось 1 раз в сутки. Вынос продуктов коррозии с элементов активной зоны оценивался по удельной активности изотопа марганец-56 в воде первого контура, который образуется из железа-56 при активации нейтронным потоком. Активность марганца-56 измерялась с помощью установки "Байпас". На этой же установке 1 раз в сутки измерялась суммарная осколочная активность теплоносителя, а также суммарная изотопическая активность иода и инертных радиоактивных газов (ИРГ) для оценки состояния оболочек твэлов.

Изменение запаса реактивности реактора рассчитывалось по отклонению критических параметров реакторной установки от исходных значений. В течение эксперимента 1 раз в два часа синхронно регистрировались следующие параметры: тепловая мощность реактора, концентрация борной кислоты в теплоносителе, положение регулирующей группы ТВС СУЗ, давление в первом и во втором контуре, входная и средняя температура теплоносителя первого контура. Тепловая мощность реактора рассчитывалась информационно-вычислительной машиной ИВ-500 МА с погрешностью $\pm 2\%$. Концентрация борной кислоты в теплоносителе определялась методом титрования проб, отбираемых через постоянно открытые штатные линии пробоотбора из различных точек реактора. Ошибка в определении $\text{C}_2\text{H}_3\text{BO}_3$ в первом контуре составляла 0,02 г/кг. Положение регулирующей группы ТВС СУЗ, давление и температура измерялись с помощью штатных приборов контроля. Погрешности измерения составляли: положения регулирующей группы ТВС 0,5 см, давления в первом контуре ± 2 кгс/см², давления во втором контуре ± 1 кгс/см², средней и входной температуры теплоносителя $\pm 1,5$ °С.

При пересчете погрешностей измерения критических параметров в соответствующие эквивалентные погрешности реактивности использовались коэффициенты реактивности, рассчитанные по программам БИПР, КР и откорректированные по экспериментально измеренным значениям на МКУ и на номинальной мощности. Среднеквадратическая ошибка для отдельного критического состояния составила 0,072 % (единиц реактивности).

Изменение запаса реактивности вычислялось по формуле

$$d\rho = \sum_i d\kappa_i \frac{d\rho}{d\kappa_i}, \quad (4.2)$$

где κ_i — параметр, влияющий на реактивность; $d\kappa_i$ — отклонение параметра от его номинального значения; $d\rho/d\kappa_i$ — коэффициент реактивности по параметру κ_i .

Запас реактивности должен убывать в соответствии с темпом выгорания топлива, т.е. должен соблюдаться баланс реактивности:

$$\sum_i d\kappa_i \frac{d\rho}{d\kappa_i} + d\rho_{\text{выг}} = 0. \quad (4.3)$$

Если же этот баланс нарушается, например, запас реактивности убывает медленнее, чем он должен бы был убывать в силу выгорания топлива, то это означает, что изменяется еще какой-то неучтенный параметр, влияющий на реактивность.

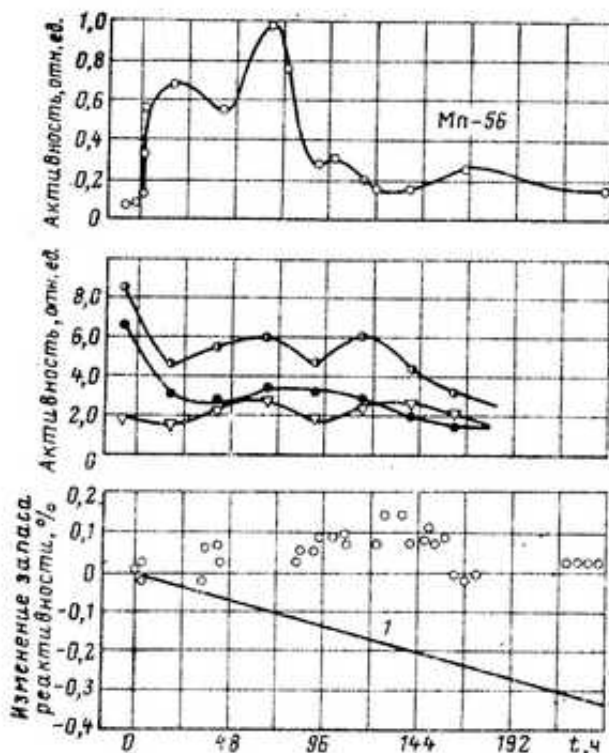


Рис. 4.5. Результаты исследования дополнительного эффекта реактивности на блоке № 1 Кольской АЭС:

● — суммарная активность изотопов йода; ▽ — суммарная осколочная активность теплоносителя; ● — суммарная активность радиоактивных благородных газов; 1 — расчет БИПР

На рис. 4.5 приведены результаты обработки эксперимента. В течение 10,79 эф.сут работы реактора запас реактивности не изменился, т.е. весь запас реактивности, израсходованный на выгорание (0,32 %), скомпенсировался выделенной положительной реактивностью. В данном случае "неучтенным" критическим параметром явилась средняя температура топлива. В конце опыта для исключения влияния погрешностей расчета коэффициентов реактивности и в особенности эффективности управляющей группы ТВС СУЗ на результат в первый контур была подана борная кислота до восстановления исходной высоты управляющей группы ТВС СУЗ. При этом концентрация борной кислоты, тщательно измеряемая в течение суток после окончания ввода бора с периодичностью 1 раз в два часа, также восстанавливалась до исходного значения 3,34 г/кг. Если учесть, что и остальные параметры реактора (мощность, давление, температура) остались равными исходным, то влияние неточности расчетов коэффициентов реактивности на интегральный эффект полностью исключилось. Полученный дополнительный эффект реактивности составил $0,32 \pm 0,07$ %.

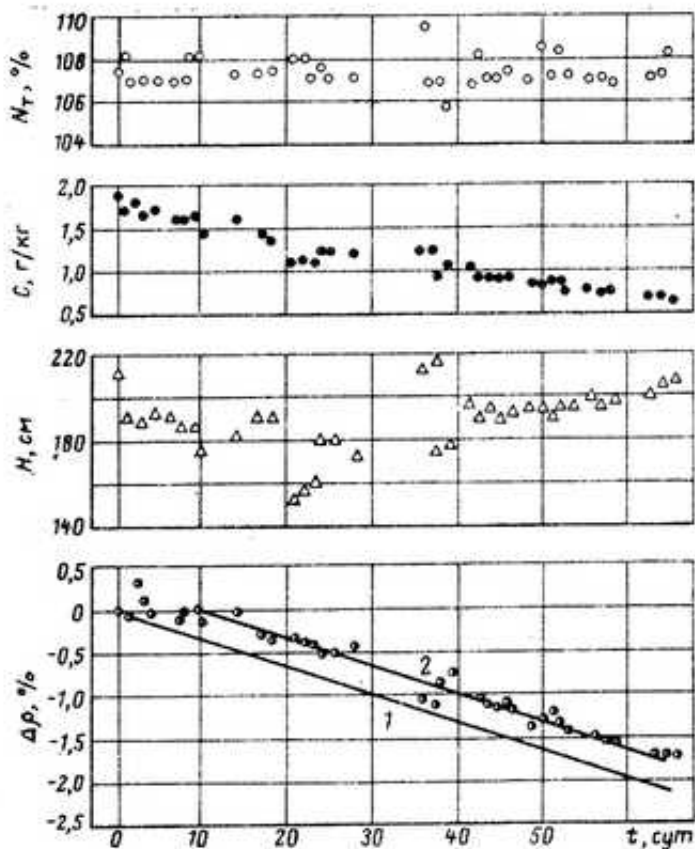


Рис. 4.6. Изменение критических параметров и запаса реактивности реактора блока № 2 Кольской АЭС при обработке воды первого контура:

1 – расчет БИПР; 2 – метод наименьших квадратов; N_T – тепловая мощность реактора; C – содержание борной кислоты в теплоносителе; H – высота управляющей группы ТВС СУЗ; β – реактивность

По кривой изменения во времени активности марганца-56 в теплоносителе первого контура (рис. 4.5) видно, что основной вынос продуктов коррозии из активной зоны реактора произошел в первые 5 сут с момента начала эксперимента.

В ходе эксперимента суммарная удельная осколочная активность и суммарная удельная активность теплоносителя уменьшились примерно в 3 раза; суммарная удельная изотопическая активность иода осталась практически неизменной. Этот эффект, по-видимому, обусловлен тремя основными факторами. Первый – это уменьшение выхода газов через неплотности в оболочках газов при снижении температуры топлива и уменьшении коэффициента диффузии газов в твэле. Второй связан с тем, что при снижении средней температуры топлива уменьшается и температура оболочки твэла, что приводит к сокращению линейных размеров неплотностей в оболочке, через которые газы выходят в теплоноситель. Третий эф-

фект связан с выносом РБГ из теплоносителя при водообмене вне циркуляционного контура.

На рис. 4.6 приведены данные по изменению основных критических параметров и запаса реактивности в течение повторного эксперимента на II блоке, прерванного до останова блока на перегрузку топлива. Остальные параметры, влияющие на реактивность, изменялись незначительно и в расчете не учитывались. Более того, температура теплоносителя на входе в реактор повысилась на 2°C , что дает запас в оценке эффекта реактивности $0,08\%$. В течение первых 10 сут запас реактивности практически не изменился, после чего начал уменьшаться со скоростью, равной расчетной (программа БИПР). По экспериментальным точкам за исключением первых пяти, методом наименьших квадратов была построена эмпирическая зависимость (2). Расхождение между этой зависимостью и расчетом по программе БИПР (1) и послужило оценкой дополнительного эффекта реактивности, который составил $0,325\%$ (единиц реактивности).

Эффект очистки оболочек твэлов от продуктов коррозии при обработке воды первого контура реактора ВВЭР может быть использован для следующих целей: во-первых, для экономии ядерного топлива и повышения маневренности реактора; во-вторых, для снижения тепловых нагрузок в твэлах и повышения их работоспособности при работе в переменных режимах; в-третьих, для форсирования мощности реактора за счет увеличения запаса по температуре топлива до плавления в аварийных режимах.

4.4. Тепловое аккумулирование при АЭС

Наряду с работами над созданием сверхпроводящих, механических, термохимических и других видов накопителей энергии, проектируются аккумуляторы горячей питательной воды (АПВ), разработки по которым находятся на стадии внедрения.

Тепловое аккумулирование в энергетике предлагалось в виде аккумуляторов питательной воды при ТЭС еще в довоенные годы. Исключение ночной разгрузки котла при снижении мощности турбоагрегата достигалось в результате повышенных отборов пара на регенерацию дополнительного расхода питательной воды. Днем увеличение мощности турбоагрегата достигалось путем уменьшения регенеративных отборов пара при сохранении температуры питательной воды в результате ее предварительного подогрева ночью.

Круглосуточная неизменность режима использования самого котла приводила к меньшему расходу органического топлива по сравнению с энергоблоками с переменной нагрузкой котла при той же выработке электроэнергии.

Это предложение не нашло широкого применения, так как экономия органического топлива и затрат на котел не покрывала дополнительных затрат на сооружение баков для хранения питательной воды и дополнительных регенеративных теплообменников.

Принцип действия аккумулятора питательной воды в составе АЭС аналогичен ТЭС, однако для эффективной замены органического топлива ядерным из базисной части графика нагрузки ОЭС должны быть полностью вытеснены источники энергии на органическом топливе, рассчитанные для работы в переменной части графика нагрузки, и тогда дополнительные вводы избыточных базисных мощностей на АЭС с помощью аккумуляторов могут быть превращены во вводы маневренных мощностей на ядерном топливе.

В случае же наличия в энергосистеме маневренных мощностей ТЭС на органическом топливе, работающих в базисной части графика нагрузки, ввод в энергосистему АЭС с аккумуляторами тепла теряет экономический смысл, так как в этом случае предпочтительным является работа этой АЭС в базисном режиме для максимального вытеснения органического топлива и перевод маневренной ТЭС на органическом топливе в переменную часть графика нагрузки.

Как показали проведенные исследования, механическое аккумуляирование при АЭС в комплексе с гидроаккумулятированием значительно уступает по всем основным показателям АЭС с АПВ.

Для получения маневренной мощности 2500 МВт (Загорская ГАЭС) для комплекса АЭС + ГАЭС требуются: вместимость водохранилища $22,0 \cdot 10^6$ м³ по сравнению с $0,18 \cdot 10^6$ м³ для АЭС с АПВ; капитальные вложения для создания маневренной мощности на 40 % больше, чем для АЭС с АПВ.

Приведенные расчетные затраты на выработку маневренной электроэнергии на АЭС + ГАЭС на 35 % превышают аналогичные затраты на АЭС с АПВ. Следует особо обратить внимание на то, что все указанные экономические преимущества могут быть реализованы только при правильном размещении АЭС с АПВ в структуре генерирующих мощностей ОЭС.

Глава 5

ОПЫТ РАБОТЫ ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС С ВВЭР В ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

Несмотря на то что все действующие АЭС с ВВЭР у нас в стране эксплуатируются в базовой части графиков нагрузок, на некоторых из них накоплен определенный опыт работы энергоблоков в режимах с переменными нагрузками. В данной главе собраны и систематизированы данные по работе энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР в аварийном регулировании, первичном регулировании частоты сети, суточном и сезонном регулировании нагрузки энергосистемы. Основное внимание уделено вопросам регулирования и топливоспользования. Подобные данные представляют интерес как в плане их использования для проверки алгоритмов расчета нестационарных режимов работы энергоблока, так и в плане выявления неиспользованных резервов.

5.1. Автоматическое регулирование частоты сети и аварийное регулирование мощности

Особо остро уже сейчас стоит вопрос об участии АЭС в аварийном регулировании частоты и мощности с целью сохранения устойчивости энергосистем и самих АЭС, в первичном регулировании частоты. Требования участия АЭС в аварийном регулировании относятся ко всем энергоблокам АЭС независимо от структуры вводимых генерирующих мощностей.

При строительстве первых АЭС в СССР такие требования не выдвигались, поэтому эти электростанции проектировались без учета их участия в аварийном регулировании. Однако в некоторых энергосистемах такая необходимость возникала уже при сооружении первых энергоблоков АЭС. В этом отношении характерен пример развития Кольской энергосистемы [76].

До начала 70-х годов развитие промышленности Кольского полуострова базировалось на использовании богатых гидроэнергетических ресурсов. В 1973–1974 гг. для покрытия растущего дефицита электроэнерге-