

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАНЕВРЕННОСТИ РЕАКТОРОВ ВВЭР**

### **3.1. Нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора**

Маневренные характеристики реактора ВВЭР определяются в значительной степени нейтронно-физическими характеристиками активной зоны. Под последними подразумеваются следующие характеристики: коэффициент реактивности по температуре воды и топлива, дифференциальная эффективность борной кислоты, эффективность органов регулирования, нестационарное отравление ксеноном-135, распределение энерговыделения по объему активной зоны реактора.

Обычно при проектировании реактора проводится комплекс расчетных и экспериментальных исследований по определению оптимальных характеристик активной зоны. Экспериментальные исследования проводятся на критических сборках, включая и окончательные эксперименты с полномасштабной активной зоной. Однако лабораторные эксперименты проводятся в условиях, существенно отличных от реальных условий эксплуатации активной зоны (температура, давление), а поэтому требуют уточнений и дополнений. Кроме того, эти эксперименты не позволяют исследовать влияние выгорания топлива на нейтронно-физические характеристики активной зоны. Таковую информацию получают только расчетными методами, точность которых снижается по мере увеличения глубины выгорания ядерного топлива.

В настоящее время единственным достаточно освоенным методом измерения нейтронно-физических характеристик активной зоны является метод измерений на минимально контролируемом уровне мощности реактора (МКУ) [32]. Этот уровень определяется чувствительностью аппаратуры измерения потока тепловых нейтронов в реакторе и составляет для ВВЭР 10<sup>-3</sup> - 10<sup>-5</sup>% номинальной мощности. Измерения проводятся в динамическом режиме работы реактора, т.е. при непрерывном изменении во времени одного из параметров, влияющего на размножающие свойства активной зоны; реактор удерживается в околоскритическом состоянии за счет перекомпенсации реактивности органами регулирования. При этом другие параметры, также влияющие на реактивность,

поддерживаются неизменными. Отклонения реактивности от нулевого значения при проведении измерений не превышают, как правило,  $\pm 0,1 \beta_{эф}$  ( $\beta_{эф}$  - эффективная доля запаздывающих нейтронов).

Измерение температурного коэффициента реактивности, так же как и многих других характеристик активной зоны, относится к косвенным измерениям. Медленные изменения реактивности, обусловленные разогревом или охлаждением замедлителя, периодически перекомпенсируются перемещением органов регулирования реактора. Скорость изменения температуры замедлителя желательнее обеспечивать постоянной. В процессе опыта синхронно регистрируются: реактивность, температура и давление первого контура, положение органов регулирования, фиксируется концентрация борной кислоты в замедлителе.

Температурный коэффициент реактивности вычисляется в узком интервале температур:

$$\alpha_T = \frac{d\rho/\beta_{эф}}{dt} = \frac{d\rho/\beta_{эф}}{d\tau} \frac{dt}{d\tau} \quad (3.1)$$

где  $\tau$  — текущее время;  $\rho$  — реактивность;  $t$  — средняя температура воды в первом контуре.

Определенный таким образом коэффициент характеризует собой изменение реактивности активной зоны при изменении температуры воды в реакторе, конструктивных элементов и топлива на один градус. При этом вследствие того что измерения проводятся на нулевой мощности, исключается влияние мощностного коэффициента реактивности. Разогрев теплоносителя осуществляется за счет тепла, выделяемого при работе главных циркуляционных насосов (ГЦН). Снижение температуры теплоносителя производится отбором пара из ПГ на собственные нужды и сбросом излишков пара на технологический конденсатор. Скорость разогрева, как правило, не превышает 10, а скорость расхолаживания 30 °С/ч.

Малые абсолютные значения температурного коэффициента реактивности в реакторах ВВЭР (примерно  $10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) наряду с трудностью поддержания различных параметров неизменными в условиях АЭС требуют повышенного внимания к организации и планированию эксперимента. Для повышения точности измерений особое внимание необходимо уделять исключению влияния борного эффекта на результаты измерений. Вследствие большого значения борного коэффициента реактивности даже незначительные изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе приводят к большим систематическим ошибкам. Положение осложняется еще и тем, что температурный коэффициент реактивности сильно зависит от содержания борной кислоты в теплоносителе. Точность измерения последней в реакторах ВВЭР недостаточно высока, поэтому перед проведением измерений требуется тщательное выравни-

вание концентрации борной кислоты по всему объему реактора, Контроль за равномерностью осуществляется по пробам, отбираемым из различных точек реактора. При необходимости компенсации уменьшения объема теплоносителя за счет расхолаживания подпитка первого контура ведется водой с такой же концентрацией борной кислоты, что и в реакторе.

При изменении температуры теплоносителя изменяется давление в реакторе. Однако вследствие малого значения барометрического коэффициента реактивности (примерно  $10^{-5}$  1/кг/см<sup>3</sup>) его влияние на результаты измерений незначительно. Тем не менее необходимо исключать систематические ошибки, связанные и с этим эффектом. Влияние барометрического эффекта на результаты измерений при разогреве первого контура исключается поддержанием давления в компенсаторе объема (КО) неизменным за счет сохранения уровня регулировкой расхода дренируемых дебалансных вод на первом этапе разогрева при азотной подушке в КО. В процессе дальнейшего разогрева КО переводится на паровую подушку и давление в первом контуре поддерживается на уровне номинального за счет работы штатной системы регулирования. При расхолаживании первого контура не удастся сохранить давление неизменным в течение опыта, так как для предотвращения недопустимых термических напряжений в узлах конструкции КО его необходимо расхолаживать параллельно с циркуляционным контуром, что приводит к падению давления в реакторе. За счет периодического открытия впрыска в КО монотонное снижение давления заменяется на ступенчатое, при этом уменьшение давления за счет снижения уровня в КО вследствие уменьшения объема теплоносителя при расхолаживании компенсируется подпиткой. А поскольку температурный коэффициент реактивности вычисляется узком интервале температур, то ясно, что такой метод исключает влияние барометрического эффекта на результаты измерений. Кроме того, давление в реакторе измеряется с хорошей точностью, что позволяет исключить систематические погрешности, связанные с барометрическим эффектом и при обработке экспериментальных данных.

Эффективность борной кислоты и эффективность органов регулирования измеряются в совместных борных опытах. В этих опытах производится изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе (ввод высококонцентрированного раствора или замещение теплоносителя перного контура чистым конденсатом) при постоянной температуре. Изменение реактивности компенсируется соответствующим перемещением органов регулирования. Синхронно регистрируются реактивность, положение органов регулирования, средняя температура и давление теплоносителя. Фиксируются концентрация борной кислоты в теплоносителе и на всасе подпиточных насосов, расход подпитки, уровень в КО.

Дифференциальная эффективность борной кислоты вычисляется по следующей формуле:

$$\frac{d\rho/\beta_{\text{эф}}}{dC} = \frac{d\rho/\beta_{\text{эф}}}{d\tau} \frac{dC}{d\tau} \quad (3.2)$$

где  $C$  — концентрация борной кислоты в реакторной воде.

Интегрирование зависимости дифференциальной эффективности борной кислоты от концентрации в пределах изменения последней дает эффективность борной кислоты при данной температуре. Данные расчетов и измерений [33, 34] показывают, что дифференциальная эффективность борной кислоты практически не зависит от содержания бора в теплоносителе, слабо зависит от положения групп регулирующих ТВС активной зоне и сильно меняется при изменении температуры. Поэтому исследуется в основном последняя зависимость, а две первые зависимости используются для повышения точности измерений. Дело в том, что недостаточная точность определения содержания борной кислоты в теплоносителе, отсутствие точной корреляции между концентрацией борной кислоты в активной зоне и в месте отбора пробы не позволяют определять с достаточной степенью точности дифференциальную эффективность борной кислоты в узком интервале изменения ее концентрации. Увеличивая интервал изменения концентрации борной кислоты при обработке результатов и нахождении  $d\rho/dC$ , можно значительно повысить точность за счет повышения точности определения содержания бора в теплоносителе в начальном и конечном состоянии. Последнее достигается путем многократного отбора проб и последующего усреднения результатов анализов.

Проведение борных опытов предполагает возможность одновременного получения дифференциальных характеристик органов регулирования реактора, представляющих собой зависимость изменения реактивности при перемещении группы регулирующих ТВС на единицу высоты от высотного положения этой группы в активной зоне:

$$\frac{d\rho/\beta_{\text{эф}}}{dH} = f(H) \quad (3.3)$$

При медленном равномерном изменении концентрации борной кислоты в теплоносителе во времени перекомпенсация реактивности производится перемещением групп регулирующих ТВС шагами по 4—5 см. Дифференциальная эффективность определяется на каждом шаге перемещения группы регулирующих ТВС от  $H_i$  до  $H_{i+1}$  по соотношению (3.3) и сопоставляется с высотой группы  $(H_i + H_{i+1} + 1/2)$ . Интегральная характеристика, показывающая зависимость вводимой реактивности от высоты извлечения группы регулирующих ТВС из активной зоны, может быть получена интегрированием выражения (3.3):

$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{d\rho/\beta_{\text{эф}}}{dH} dH = q(H) \quad (3.4)$$

Измерения проводятся при разной температуре теплоносителя.

Использование метода сброса для измерения интегральной эффективности групп регулирующих кассет ограничивается большой погрешностью измерений вследствие изменения пространственного распределения плотности потока нейтронов в месте установки детектора в течение эксперимента, в то время как использование пространственно-независимых уравнений кинетики при определении реактивности предполагает постоянство во времени пространственного распределения плотности потока нейтронов [35].

Для получения дифференциальных и интегральных характеристик регулирующей группы ТВС используются также эксплуатационные данные по выгоранию "на стержнях" в конце топливного цикла. Результаты обработки таких данных имеют значительную ценность ввиду того, что они соответствуют рабочим параметрам активной зоны реактора. В обработку включаются следующие параметры реакторной установки: положение органов регулирования (ОР), концентрация борной кислоты в замедлителе, средняя температура теплоносителя первого контура, тепловая мощность реактора. В результате обработки получается зависимость  $\Delta T_{\text{эф}} = f(H_6)$ , которая может быть интерпретирована как интегральная характеристика ОР в исследованном диапазоне перемещения группы (обычно этот диапазон составляет 150-250 см). Для определения поправок к  $\Delta T_{\text{эф}}$  при изменении  $C_{\text{H}_3\text{BO}_3}$  и  $t_{1к}$  на каждом шаге перемещения ОР используется выражение

$$\Delta T_{\text{эф}} * = \Delta T_{\text{эф}} + dT/dt_{\text{H}_2\text{O}} (\bar{i}^{i+1} - \bar{i}) + dT/dC (C^{i+1} - C^i) \quad (3.5)$$

где  $\Delta T_{\text{эф}}$  фактическое значение эффективного времени работы реактора при перемещении ОР на шаге от  $H^{i+1}$  ОР на шаге от  $H^{i+1}$  до  $H^i$ ;  $dT/dt_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $dt/dC$  — температурный и борный коэффициенты реактивности, выраженные в эф. сут/град и эф. сут/(г/кг);  $\bar{t}_{1к}$  — средняя температура теплоносителя первого контура;  $C$  — концентрация борной кислоты в замедлителе.

Коэффициенты  $dT/dC$  определяются по кривым изменения приведенной критической концентрации борной кислоты в замедлителе в течение данного топливного цикла. Для вычисления коэффициентов  $dT/dt_{\text{H}_2\text{O}}$  используются данные по изменению температуры теплоносителя первого контура в режиме работы реактора на температурном эффекте со снижением давления пара во втором контуре.

Измерение нестационарного отравления реактора ксеноном-135 при нулевой мощности производится, как правило, лишь при первых пусках головного реактора, выполняется в ограниченном диапазоне изменения нагрузок и служит, в основном, для подтверждения правильности расчета и корректировки расчетных программ. Объясняется это большими затратами времени на проведение каждого эксперимента (30-40 ч).

В процессе работы энергоблока АЭС существует возможность использовать плановые изменения мощности реактора для исследования ксено-

новых переходных процессов путем обработки показаний штатных приборов контроля. Изменение мощности реактора производится перемещением регулирующей группы ТВС по высоте активной зоны: для увеличения мощности вводят положительную реактивность, и группа движется вверх; для снижения мощности группа перемещается вниз. При изменении мощности изменяется температура замедлителя; при снижении мощности вследствие уменьшения температуры замедлителя уменьшается объем воды в первом контуре, для восстановления которого производится подпитка, что может привести к изменению концентрации борной кислоты в замедлителе. Таким образом, в обработку включаются следующие параметры: тепловая мощность реактора, положение регулирующих групп ТВС, средняя температура теплоносителя первого контура, концентрация борной кислоты в замедлителе. В результате обработки строится временная зависимость критических положений групп регулирующих ТВС, мощности, температуры и других критических параметров, если они изменялись в переходном процессе.

Наибольший практический интерес представляют переходные режимы, связанные с уменьшением мощности реактора. В рассмотрение включаются данные переходных режимов, перед началом которых реактор работал на неизменном уровне мощности не менее двух суток, в течение которых в активной зоне устанавливается равновесная концентрация ксенона-135, соответствующая данной мощности реактора.

При всех описанных измерениях производится одновременная регистрация физических и технологических параметров реакторной установки. Комплексы параметров, подлежащих регистрации, в зависимости от конкретного эксперимента набираются из следующего перечня: поток нейтронов; реактивность; средняя температура теплоносителя первого контура; давление в первом контуре; уровень воды в компенсаторе объема; положение и перемещение органов регулирования; концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура.

Измерение потока нейтронов и реактивности производится с помощью полупроводникового измерителя реактивности (ПИР) [36]. Реактиметр ПИР построен как логическое устройство, непосредственно реализующее решение усредненных по пространственным переменным кинетических уравнений в терминах времени генерации [35].

Ток ионизационной камеры, измеряющей мощность реактора, поступает на входной электрометрический малошумящий усилитель, на выходе из которого получается переменное напряжение  $U_1$ , пропорциональное току ионизационной камеры. Это напряжение подается на операционный усилитель через параллельно соединенные цепи сопротивлений и конденсаторов, заряд которых имитирует плотность мгновенных и шести групп запаздывающих нейтронов. На выходе операционного усилителя возникает сигнал, пропорциональный  $dn/dt$ . Далее этот сигнал делится, и в результате на выходе прибора появляется напряжение, пропорциональное реактивности, выраженное в долях  $\beta_{эф}$ . RC-цепочки

подобраны так, чтобы моделировать  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{эф}$  для  $^{235}\text{U}$ . Для других делящихся нуклидов, используемых в качестве топлива, необходимо подбирать соответствующие значения  $RC$ . Вопрос о возможности применения ПИР при измерениях на "выгоревшей" зоне, т.е. в присутствии в топливе изотопов плутония, сводится к выбору соответствующих значений параметров  $RC$ -цепочек. В измерителе реактивности выполняются соотношения [36]:

$$R_i C_i = 1/\lambda_i; \quad R_{\parallel} R_i = \beta_i/\beta_{эф}; \quad R_{\parallel} C_0 = 1/\beta_{эф}. \quad (3.6)$$

Анализ этих соотношений для реактора ВВЭР-440, находящегося в стационарном топливном цикле (со средним выгоранием топлива 28,6 МВт·сут/кг), проведенный на основании расчетов по программам ГИПР-5 [37] и КР [38], показал, что дополнительная погрешность измерения реактивности, вносимая неточностью выполнения соотношений (3.5), для выгоревшей зоны составляет около 3%. Это учитывается при обработке результатов измерений.

Средняя относительная погрешность измерения реактивности с помощью прибора ПИР, определенная опытным путем, составляет 1–1,5% [36].

В качестве детектора нейтронов используются ионизационные камеры КНК-56, скомпенсированные по гамма-фону, обладающие чувствительностью к тепловым нейтронам  $10^{-12}$  А/(нейтр·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ). Три камеры располагаются в симметричных относительно осей реактора каналах штатной системы контроля за нейтронным потоком. Питание на камеры подается по экранированным кабелям РК-75 от источников постоянного напряжения  $\pm 500$  В. Сигнал с собирающего электрода по кабелю РК-75 с двойной экранировкой (для снижения влияния помех и наводок) поступает на ПИР.

В качестве датчиков температуры используются проектные хромель-копелевые термопары. Измерение ЭДС производится с помощью штатных приборов контроля. Также штатными системами контроля измеряется давление в первом контуре, уровень в КО, положение групп регулирующих кассет. Перед измерениями проводится настройка и тарировка штатных приборов контроля, показания которых используются в эксперименте.

**Температурный коэффициент реактивности.** Изменение температуры в реакторах ВВЭР приводит к изменению эффективного коэффициента размножения нейтронов, или к изменению реактивности. Коэффициент размножения изменяется вследствие того, что меняется средняя энергия тепловых нейтронов, а значит, и эффективные сечения рассеяния и поглощения; меняется плотность конструкционных материалов и, как следствие, длина диффузии, "возраст Ферми" и размеры реактора [39]. Температурный коэффициент реактивности имеет быстроизменяющуюся составляющую, связанную с изменением температуры топлива, и медленноизменяющуюся составляющую, связанную с изменением тем-

пературы теплоносителя и других элементов активной зоны. Эксперименты при нулевой мощности позволяют разделить эти две компоненты и измерить температурный коэффициент реактивности, обусловленный только запаздывающими эффектами. Измеряемый в таких опытах коэффициент называется коэффициентом реактивности по температуре воды и топлива, так как в него входит и эффект изменения температуры топлива, но не за счет изменения мощности реактора, а за счет теплопередачи между водой и топливом. Коэффициент реактивности по температуре топлива, обусловленный Доплер-эффектом (быстрая составляющая), измеряется в отдельных экспериментах при работе реактора на мощности [40].

В реакторах ВВЭР значение и знак температурного коэффициента зависят от концентрации борной кислоты в воде первого контура, от положения органов регулирования реактора, загрузки активной зоны и степени ее выгорания и, наконец, от самой температуры. Отрицательный знак  $\alpha_T$  обеспечивает надежную и безопасную работу реакторной установки в переходных режимах. Чем больше по абсолютной величине  $\alpha_T$ , тем в большей степени проявляется способность ВВЭР к саморегулированию [8]. Кроме того, значение  $\alpha_T$  во многом определяет возможность продолжения работы реактора на мощностном и температурных эффектах после исчерпания запаса реактивности на выгорание при номинальных параметрах, а также возможность использования температурного эффекта для преодоления ксенонового переотравления в режимах с изменением мощности реактора.

По этим причинам значению и знаку  $\alpha_T$  уделяется особое внимание уже на стадии проектирования реактора. Расчетное исследование  $\alpha_T$  — весьма трудоемкая задача, ввиду того что сложен сам температурный эффект [41]. Задача еще более усложняется, когда исследуется зависимость  $\alpha_T$  от степени выгорания топлива. В этом случае необходимо учитывать изменение изотопного состава топлива, его теплофизических и геометрических характеристик, а также свойств конструкционных материалов активной зоны. В этих условиях неизмеримо возрастает роль экспериментального определения коэффициента реактивности по температуре воды и топлива. Результаты экспериментов служат для корректировки расчетных программ, которые в дальнейшем используются как для прогнозирования характеристик уже освоенных реакторов, так и для расчета топливных решеток вновь проектируемых реакторов.

Экспериментальные данные по  $\alpha_T$ , накопленные к настоящему времени, получены в основном при первых пусках реакторов ВВЭР (см., например, [42]), т.е. при нулевом выгорании топлива. С точки зрения изучения маневренных характеристик реактора очень важное значение имеют данные по зависимости  $\alpha_T$  от глубины выгорания топлива, количество которых в янтаруре очень ограничено. На рис. 3.1–3.4 приведены результаты измерений температурного коэффициента реактив-



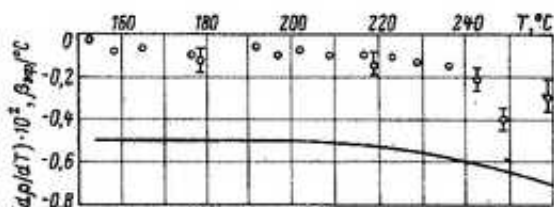


Рис. 3.1. Зависимость коэффициента реактивности по температуре воды и топлива от средней температуры теплоносителя первого контура (II блок КАЭС, начало первого топливного цикла,  $\text{C}_2\text{H}_3\text{BO}_3 = 6,2 \text{ г/кг}$ , положение групп регулирующих класет:  $H_{1-5} = 250 \text{ см}$ ,  $H_6 = 105 \div 165 \text{ см}$ ):

○ — эксперимент; — — расчет БИПР-КР

Рис. 3.2. Зависимость коэффициента реактивности по температуре воды и топлива от средней температуры теплоносителя первого контура (II блок КАЭС, начало третьего топливного цикла,  $\text{C}_2\text{H}_3\text{BO}_3 = 8,1 \text{ г/кг}$ , положение групп регулирующих ТВС:  $H_{1-5} = 250 \text{ см}$ ,  $H_6 = 196 \div 240 \text{ см}$ )

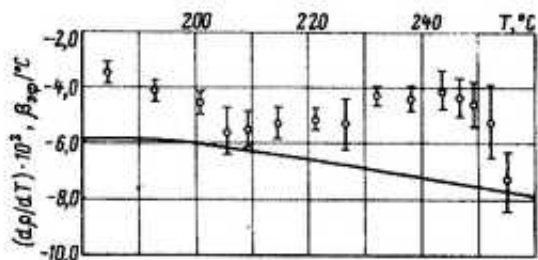
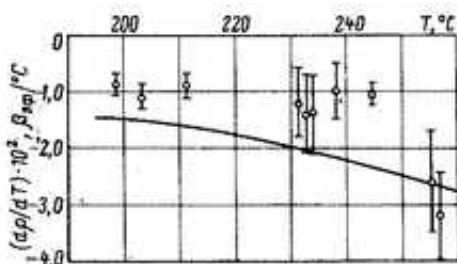


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента реактивности по температуре воды и топлива от средней температуры теплоносителя первого контура (II блок КАЭС, конец первого топливного цикла,  $\text{C}_2\text{H}_3\text{BO}_3 = 0$ ,  $T = 285 \text{ эф. сут}$ , положение групп регулирующих ТВС:  $H_{1-3} = 250 \text{ см}$ ,  $H_4 = 250 \div 100 \text{ см}$ ,  $H_5 = 250 \div 0 \text{ см}$ ,  $H_6 = 0$ ):

○ — эксперимент; — — расчет БИПР-КР

ности, полученные в экспериментах на нулевой мощности при пусках и остановках реакторов ВВЭР-440 блока № 2 Кольской АЭС.

Исследована зависимость  $\alpha_T$  от температуры, глубины выгорания топлива, концентрации борной кислоты в теплоносителе, положения органов регулирования реактора. Установлено, что знак  $\alpha_T$  отрицателен во всем исследованном диапазоне изменения температуры и концентрации борной кислоты в воде первого контура (вплоть до 8 кг/кг). Абсолют-

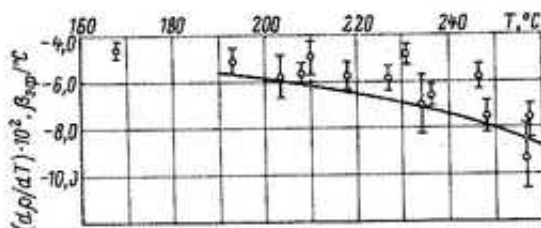


Рис. 3.4. Зависимость коэффициента реактивности по температуре воды и топлива от средней температуры теплоносителя первого контура (II блок КАЭС, конец второго топливного цикла,  $\text{C}_{\text{H}_3\text{BO}_3} = 0$ ,  $T = 253$  эф. сут, положение групп регулирующих ТВС:  $H_{1-2} = 250 \div 0$ ,  $H_3 = 180 \div 0$ ,  $H_{4-5} = 250 \div 0$ ,  $H_6 = 75 \div 0$ ):

○ — эксперимент; — — расчет БИПР-КР

ная величина практически постоянна до температуры 200–240 °С, но резко увеличивается при более высоких температурах. Отдельно влияние концентрации борной кислоты в воде первого контура и глубины выгорания топлива на величину  $\alpha_T$  не определялось, да это и не нужно для решения практических задач и может представлять интерес только для уточнения расчетных методик. В реакторах ВВЭР концентрация борной кислоты в теплоносителе снижается в течение топливного цикла от максимального значения до нуля, а глубина выгорания топлива растет в течение топливного цикла. В экспериментах исследовалось комплексное влияние этих двух факторов на  $\alpha_T$ . Получено, что температурный коэффициент реактивности растет по абсолютной величине как от начала топливного цикла к концу, так и при увеличении глубины выгорания, вплоть до проектной.

В ошибку измерения  $\alpha_T$  входят аппаратурные погрешности измерения реактивности и температуры теплоносителя первого контура. Различного рода систематические погрешности, обусловленные влиянием борного эффекта, барометрического эффекта, неоднородностью нагрева активной зоны, исключаются как планированием эксперимента, так и соответствующей обработкой результатов измерений.

Для сравнения с результатами измерений выполнены расчеты по программам БИПР-5 и КР с использованием библиотеки констант [43]. Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов показывает, что наблюдается согласие расчетных и экспериментальных данных в плане тенденции к снижению  $\alpha_T$  при увеличении температуры теплоносителя и выгорания. Однако отклонение расчетных данных от экспериментальных в большинстве случаев не укладывается в пределах экспериментальных погрешностей.

Поскольку в споре расчета с экспериментом приоритет всегда принадлежит эксперименту, если, конечно, последний правильно построен в методическом плане, тщательно проведен, обеспечен высокочувствительной аппаратурой и корректно обработан, то можно сделать вывод, что используемые расчетные программы для исследования температурного

коэффициента реактивности нуждаются в дальнейшей корректировке. Для этой цели могут быть использованы и экспериментальные данные по  $\alpha_T$ , приведенные в этом разделе.

Экспериментом установлено, а расчетом подтверждено, что свойства саморегулируемости реактора ВВЭР, зависящие от знака и значения  $\alpha_T$ , повышаются от начала к концу топливного цикла и при выходе реактора в стационарный топливный цикл. В таком же порядке увеличивается положительная реактивность, высвобождаемая при снижении температуры на одно и то же значение, следовательно, увеличиваются маневренные возможности реактора при использовании температурного эффекта для продления топливного цикла и для преодоления ксенонного перетравления.

Эффективность жидкого поглотителя. В реакторах ВВЭР основной запас реактивности на выгорание и шлакование топлива скомпенсирован борной кислотой, растворенной в замедлителе. Зная критическую концентрацию борной кислоты в замедлителе при разогревом, "отравленном" реакторе на номинальной мощности, можно определить энерговыработку реактора между перегрузками. Для этого необходимо рассчитать или измерить дифференциальную эффективность борной кислоты  $\alpha_b = dp/dc$ , показывающую изменение реактивности при изменении концентрации борной кислоты на 1 г/кг. Значение  $\alpha_b$ , кроме того, влияет определенным образом на маневренные характеристики реактора ВВЭР: чем выше дифференциальная эффективность борной кислоты, тем большая скорость изменения запаса реактивности реактора может быть обеспечена при заданном расходе подпитки, концентрации борной кислоты в замедлителе и в подпиточной воде, а, значит, тем большими возможностями для маневрирования мощностью обладает реактор.

В табл. 3.1 приведены результаты расчета и измерений, полученные на первых пусках реакторов ВВЭР-440 с одинаковыми топливными загрузками. Измерения проводились по методике, изложенной выше. Расчет выполнен по программе БИПР-5. Приведенные экспериментальные погрешности представляют собой среднеквадратические погрешности измерения реактивности и концентрации борной кислоты в замедлителе, причем основной вклад в результирующую ошибку вносит погрешность измерения концентрации борной кислоты в замедлителе. Более высокая точность измерений на АЭС "Довиса" получена за счет использования высокочувствительной аппаратуры для определения концентрации борной кислоты в различных точках реактора и технологических схем.

Как видно из табл. 3.1, наблюдается хорошая воспроизводимость экспериментальных данных и совпадение измеренных значений  $\alpha_b$  с расчетными в пределах ошибок измерений (за исключением блока № 2 КАЭС). Зависимость  $\alpha_b$  от температуры теплоносителя объясняется "смягчением" спектра нейтронов при уменьшении температуры и, как следствие, увеличением поглощения тепловых нейтронов изотопом бор-10. Зависимость  $\alpha_b$  от высоты положения регулирующей группы ТВС СУЗ и от количества погруженных трули в активную зону слабо выражена и не представляет практического интереса.

Наиболее сильно  $\alpha_b$  зависит от глубины выгорания топлива, особенно в первых двух топливных циклах. Эта зависимость исследована расчетным путем применительно к реактору ВВЭР-440 [34]. Результаты экспериментальных исследований, выполненных на действующих промышленных реакторах ВВЭР, совпадают в пределах ошибок измерений с данными расчетов.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных по величине  $\alpha_b$ . Этот факт по-

Т а б л и ц а 3.1. Дифференциальная эффективность борной кислоты для первой Армянской АЭС и I блока АЭС "Ловиса" (Финляндия)

Положения групп СУЗ	Дифференциальная эффективность					
	Кольская АЭС, II блок		Армянская АЭС			
	$(120 \pm 2) ^\circ\text{C}$		$(263 \pm 2) ^\circ\text{C}$		$(131 \pm 2) ^\circ\text{C}$	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
K6-0, K5-50 см	-	-	-	-	-	-3,45
K4-K1-250 см	-	-	-	-	-	-3,50
K6-0, K5-200 см	-	-	-	-	-	-3,52
K4-K1-250 см	-	-	-	-	-	-3,56
K6-50 см		-3,54		-3,13	-3,61±0,20	-3,52
K5-K1-250 см						-3,56
K6-100 см	-5,35±0,60	-3,55	-4,2±0,5	-3,15	-3,60	-3,60
K5-K1-250 см						
K6-150 см		-3,56		-3,16		
K6-K1-250 см						
K6-200 см		-3,58		-3,16		
K5-K1-250 см						

звляет сделать вывод о том, что для исследования различных режимов эксплуатации реакторов ВВЭР с изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе, в частности режимов с маневрированием мощностью реактора, с успехом могут быть использованы расчетные программы БИПР и КР для определения  $\alpha$ .

Эффективность органов управления реактором. Большое влияние на маневренные характеристики реактора ВВЭР оказывает величина так называемого оперативного запаса реактивности. Это запас реактивности, который может быть реализован при перемещении управляющей группы ТВС СУЗ от промежуточного до крайнего верхнего положения. Оперативным он называется потому, что может быть реализован с высокой скоростью. Величина оперативного запаса реактивности выбирается из условия обеспечения достаточной дифференциальной эффективности управляющей группы ТВС на рабочем участке перемещения при допустимой неравномерности энерговыделения по объему активной зоны реактора. Рекомендуемая высота положения управляющей группы ТВС для реакторов ВВЭР-440 составляет 150–200 см от низа активной зоны [8]. Однако эти рекомендации составлены на основании экспериментальных данных, полученных в "свежей" зоне. В результате выгорания и перегрузок топлива физические свойства активной зоны, в том числе и дифференциальная эффективность управляющей группы ТВС, постоянно меняются и существенно отличаются от характеристик "свежей" активной зоны. А это может привести к изменению оптимального интервала положения регулирующей группы ТВС СУЗ. Поэтому необходимы соответствующие исследования изменения дифференциальной характеристики управляющей группы ТВС в течение кампании топливной загрузки.

На рис. 3.5–3.8 приведены результаты измерений дифференциальной эффективности управляющей группы ТВС СУЗ реактора ВВЭР-440. Анализ этих результатов показывает, что в начале топливного цикла максимум дифференциальной характеристики находится на высоте группы 100–120 см от низа активной зоны.

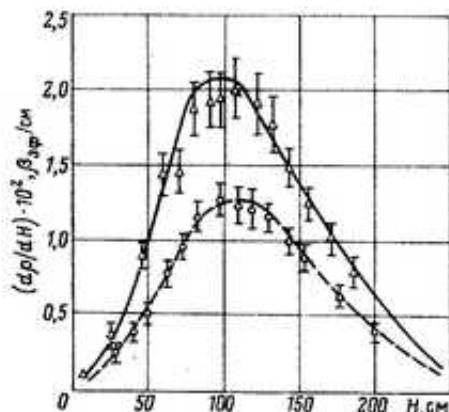
топливной загрузки реакторов II блока Кольской АЭС, I блока

Углеродной кислоты		$\frac{d\rho}{dC}, \frac{\beta_{эф}}{г/кг}$			
I блок		I блок АЭС "Ловиса"			
$(261 \pm 2) ^\circ C$		$(122 \pm 1) ^\circ C$		$(260 \pm 1) ^\circ C$	
Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
	-3,06		-3,47		-3,06
	-3,13		-3,52		-3,13
-3,13±0,15	-3,13	-3,49±0,05	-3,54	-3,36±0,05	-3,13
	-3,15		-3,55		-3,15
	-3,16		-3,56		-3,16
	-3,16		-3,58		-3,16

В процессе эксплуатации реактора на мощности управляющая группа ТВС находится в промежуточном положении 150–200 см от низа активной зоны. При этом 50–100 см топливной части кассет находится вне пределов активной зоны (под ней) и практически не выгорает. Та же часть, которая находится в активной зоне, интенсивно выгорает. Это приводит к тому, что в конце цикла выгорания максимум дифференциальной характеристики управляющей группы ТВС смещается в область высот 190–210 см. Такое положение сохраняется и в стационарном топливном цикле. Опытные результаты сопоставлены с расчетными, полученными по программе БИПР-5 с учетом конкретных условий эксперимента (температуры,

Рис. 3.5. Дифференциальная характеристика управляющей (шестой) группы СУЗ реактора ВВЭР-440 II блока КАЭС (начало первого топливного цикла):

$\bar{T} = 120 ^\circ C$  { --- расчет БИПР  
 {  $\diamond$  - эксперимент  
 $\bar{T} = 262 ^\circ C$  { --- расчет БИПР  
 {  $\nabla$  - эксперимент



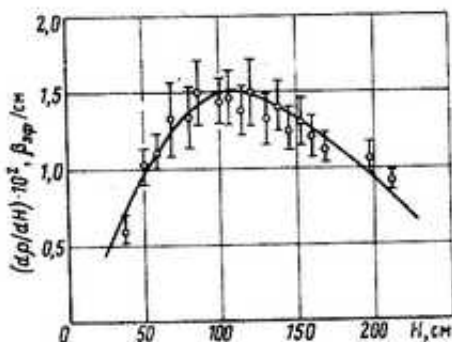


Рис. 3.6. Дифференциальная характеристика управляющей (шестой) группы СУЗ реактора ВВЭР-440 II блока КАЭС (начало второго топливного цикла,  $T = 235 \pm 2$  °С,  $C_{H_3BO_3} = 5.7 \div 6.5$  г/кг,  $H_{1-5} = 250$  см):

○ — эксперимент; — — расчет  
БИПР

концентрации борной кислоты, положения других групп регулирующих ТВС, энерговыработки реактора к моменту измерений). Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что если в начале топливного цикла наблюдается хорошее согласие расчета и эксперимента, то в конце топливного цикла это согласие нарушается, причем различие увеличивается с увеличением глубины выгорания топлива. Этот вывод полностью подтверждается результатами измерений эффективности регулирующей группы СУЗ при эксплуатации реактора на мощ<sup>2</sup>ности (рис. 3.9).

Расхождение между экспериментом и расчетом при достижении больших выгораний ядерного топлива можно объяснить как несовершенством методики расчета, так и тем, что при имитации процесса выгорания топливной загрузки в расчетах положение управляющей группы кассет принимается неизменным, обычно 175 см, в то время как в процессе реального выгорания управляющая группа перемещается в диапазоне 100 – 250 см.

Показанные на рис. 3.5 – 3.8 экспериментальные ошибки представляют собой среднеквадратические погрешности измерения реактивности и положения регулирующих ТВС с помощью штатной системы (электромагнитные катушки, сельсин-приемники).

Хотя управляющая группа ТВС и перемещается в некотором диапазоне в течение топливного цикла, ее среднее положение находится на высоте 175 см. Исследования показывают, что вследствие изменения формы дифференциальной харак-

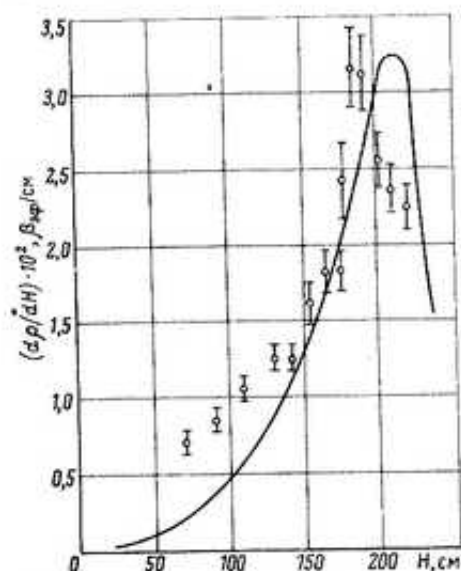


Рис. 3.7. Дифференциальная характеристика управляющей (шестой) группы СУЗ реактора ВВЭР-440 II блока КАЭС (конец первого топливного цикла,  $T = 284$  эф. сут,  $T = 181$  °С,  $C_{H_3BO_3} = 0.7 \div 1.2$  г/кг,  $H_{1-5} = 250$  см):

○ — эксперимент; — — расчет  
БИПР

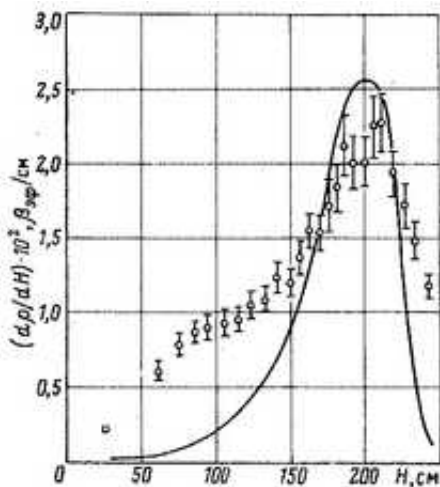


Рис. 3.8. Дифференциальная характеристика управляющей (шестой) группы СУЗ реактора ВВЭР-440 II блока КАЭС (конец второго топливного цикла,  $T = 253$  эф.сут,  $T = 141 \pm 1$  °C,  $C_{H_3VO_3} = 1,67 \div 2,76$  г/кг):

○ — эксперимент; — — — расчет БИПР

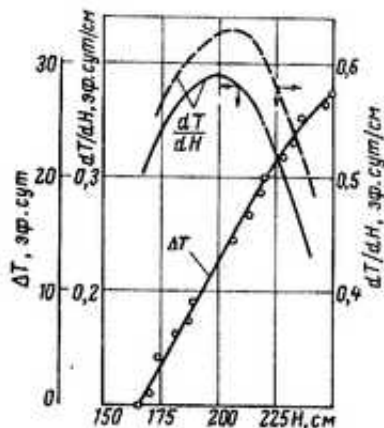


Рис. 3.9. Характеристики управляющей группы СУЗ в рабочем состоянии (II блок КАЭС, четвертый топливный цикл):

○ — опыт; — — — расчет БИПР

теристики в процессе выгорания оперативный запас реактивности на управляющей группе ТВС изменяется от 0,7 в начале топливного цикла до 1,1% в конце цикла при подержании группы на высоте 175 см от низа активной зоны. Увеличение запаса реактивности на управляющей группе ТВС СУЗ в процессе выгорания позволяет использовать этот запас для более широкого маневрирования мощностью реактора.

Строго говоря, изменение формы дифференциальной характеристики управляющей группы ТВС при выгорании топлива еще не увеличивает оперативный запас реактивности, поскольку последний устанавливается, как было упомянуто выше, на основании других концепций, но, тем не менее, способствует этому. Дело в том, что, как будет показано в следующих разделах этой главы, при выгорании топлива снижаются коэффициенты неравномерности энерговыделения по объему активной зоны, а этот факт в совокупности с достаточно высокой дифференциальной эффективностью управляющей группы при ее перемещении в диапазоне 100 – 250 см (не менее  $0,5 \cdot 10^{-4}$  1/см) и достаточной эффективностью всех органов регулирования в режиме быстродействующей аварийной защиты первого рода позволяет устанавливать повышенный оперативный запас реактивности.

**Настационарное отравление реактора ксеноном.** Как было показано в предыдущей главе, нестационарное отравление реактора ксеноном при изменении мощности в значительной мере определяет маневренные характеристики реакторов ВВЭР. Кривые нестационарного отравления получают в экспериментах на вновь пускаемых и действующих реакторах

(в том числе и на нулевой мощности), а также расчетом по различным программам. Расчетные программы, которые уточняются по мере накопления экспериментальных данных, позволяют с хорошей точностью предсказывать эффекты нестационарного отравления при переходных процессах для любого реактора ВВЭР. Наибольшее количество экспериментальных данных по эффекту нестационарного отравления получено при первых пусках реакторов ВВЭР [33, 40, 42]. Получение таких данных после ввода АЭС в эксплуатацию затруднительно из-за большой длительности опытов. В то же время глубина "иодной ямы", а следовательно, и маневренные характеристики реактора зависят как от исходного и конечного уровня мощности при сбросе нагрузки, так и от момента топливного цикла, поскольку все величины, от которых зависит глубина "иодной ямы" (макроскопическое сечение поглощения нейтронов в решетке, макроскопическое сечение деления топлива, микроскопическое сечение поглощения нейтронов ксеноном и др.), претерпевают изменения в процессе выгорания топлива.

Таким образом, единственным доступным способом подробного исследования влияния выгорания топлива на кривые нестационарного отравления являются расчетные методы. Среди этих методов различают трехмерные (БИПР-5) и нульмерные [43], в которых не учитывается изменение распределения потока нейтронов в объеме реактора во время переходного процесса. Хорошее согласие результатов, полученных в трехмерных и нульмерных расчетах, позволяет использовать в исследованиях только нульмерные методики, требующие значительно меньших затрат машинного времени, чем трехмерные расчеты.

Расчетом по нульмерной методике исследовано влияние выгорания топлива в первом топливном цикле на кривые нестационарного отравления (рис. 3.10). Константы для начала и конца цикла выгорания рассчитаны для первой топливной загрузки реактора ВВЭР-440. Как видно из приведенных данных, максимум отравления как в начале, так и в конце топливного цикла наступает через одно и то же время после снижения мощности реактора. Однако величина максимального отравления (глубина "иодной ямы") и скорость уменьшения запаса реактивности существенно снижаются с увеличением выгорания топлива. А это безотносительно к другим факторам, влияющим на маневренность реактора, увеличивает возможности преодоления ксенонового переотравления в режимах изменения мощности реактора и улучшает его маневренные характеристики.

С увеличением выгорания топлива до проектной величины естественно ожидать еще большего уменьшения максимального нестационарного ксенонового отравления. Поэтому для исследования маневренных характеристик реактора ВВЭР в стационарном топливном цикле выполнены расчеты кривых нестационарного отравления по нульмерной программе ФИКС [43] применительно к стационарной топливной загрузке реактора ВВЭР-440 (рис. 3.11). В стационарном топливном цикле воз-



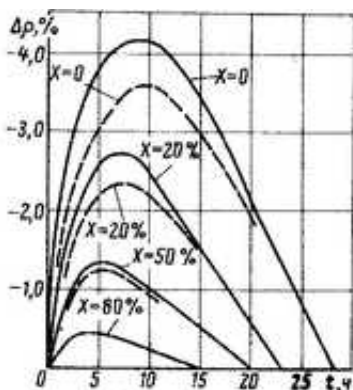


Рис. 3.10. Изменение запаса реактивности реактора ВВЭР-440 ( $\Delta\rho$ ) после резкого снижения мощности со 100 до  $X\%$  в начале (—) и в конце (---) первого топливного цикла (расчет)

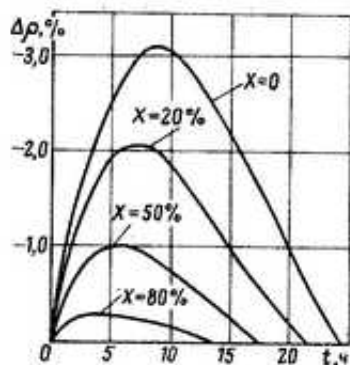


Рис. 3.11. Изменение запаса реактивности ( $\Delta\rho$ ) реактора ВВЭР-440 после резкого снижения мощности со 100 до  $X\%$  (начало стационарного топливного цикла, расчет).

возможности маневрирования мощностью реактора становятся более широкими, чем в первом топливном цикле, из-за уменьшения глубины "иодных ям".

В процессе работы энергоблока АЭС существует возможность использовать плановые изменения мощности реактора для исследования ксеноновых переходных процессов путем обработки показаний штатных приборов контроля. В обработку включаются следующие параметры: тепловая мощность реактора, положение регулирующих групп ТВС, средняя температура теплоносителя первого контура, концентрация борной кислоты в замедлителе. В результате обработки строится временная зависимость критических положений групп регулирующих ТВС, мощности, температуры и других критических параметров, если они изменялись в переходном процессе.

Наибольший практический интерес представляют переходные режимы, связанные с уменьшением мощности реактора. В рассмотрение включаются данные переходных режимов при условии, что реактор работал на неизменном уровне мощности не менее двух суток, в течение которых в активной зоне устанавливается равновесная концентрация ксенона-135, соответствующая данной мощности реактора.

Для примера на рис. 3.12 и 3.13 приведены экспериментальные кривые изменения положения управляющей группы ТВС и других критических параметров во времени при плановых изменениях мощности энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-440.

Эта данные получены на II блоке Кольской АЭС в течение первых четырех лет его эксплуатации. Регистрация наиболее быстро меняющегося параметра (положение управляющей группы ТВС) производится с пе-

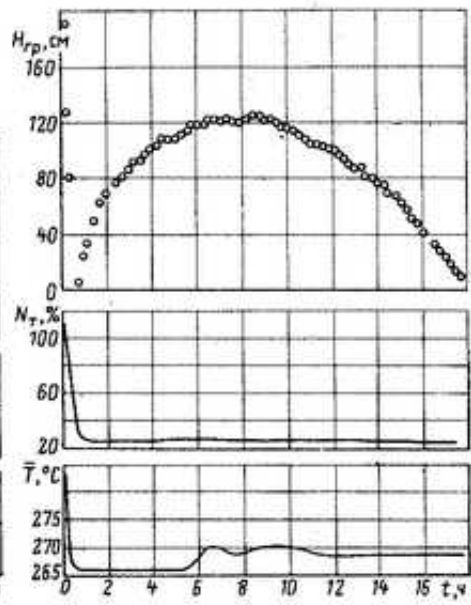
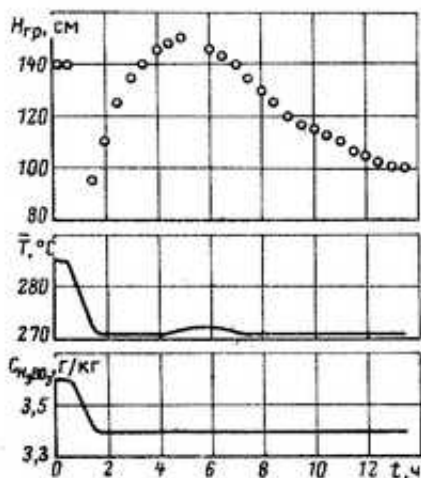


Рис. 3.12. Переходный процесс на ксеноне-135 при изменении мощности реактора со 100 до 50% номинальной (II блок КАЭС, первый топливный цикл,  $T = 30$ , 9 эф. сут):

$H_{гр}$  – положение управляющей группы СУЗ;  $N_T$  – тепловая мощность реактора,  $T$  – средняя температура теплоносителя,  $C_{H_3BO_3}$  – концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура

Рис. 3.13. Переходный процесс на ксеноне-135 при изменении мощности реактора со 107 до 25% номинальной (II блок КАЭС, четвертый топливный цикл,  $T = 138$ , 8 эф. сут,  $C_{H_3BO_3} = 3.1$  г/кг)

риодичностью 15–30 мин по показаниям сельсин-приемников на пульте оператора. Кроме того, изменение мощности, температуры и положения органов регулирования фиксируется на лентах самописцев штатной системы контроля. Измерение концентрации борной кислоты в замедлителе в случаях ее изменения производится методом титрования проб с последующим сопоставлением измеренных результатов с результатами расчета по расходу подпитки. Для оценки глубины "йодной ямы" необходимо как можно точнее определить высоту органов регулирования после снижения мощности реактора. Однако вследствие того что какое-то время после разгрузки уходит на стабилизацию реактора на новом уровне мощности, возникает неопределенность в положении органов регулирования и в мощности реактора в этот важный момент времени. Кроме того, для определения глубины "йодной ямы" в таких измерениях требуется привлечение ряда расчетных характеристик, имеющих недостаточную точность. Поэтому полученные данные с гораздо боль-

шим эффектом могут использоваться для решения эксплуатационных задач, связанных с маневрированием мощности энергоблока АЭС.

Данные по критическим положениям органов регулирования реактора в процессе нестационарного отравления ксеноном позволяют проводить исследования изменения глубины "иодной ямы" при выгорании и перегрузках топлива как качественно, так и количественно с точностью, определяемой совершенством расчетных методик. Так, анализ опытных данных с привлечением расчетных значений эффективности борной кислоты, эффективности управляющей группы ТВС, мощностного и температурного коэффициентов реактивности, полученных применительно к каждой топливной загрузке по программам БИПР-5 и КР, показал, что:

глубина "иодной ямы" при снижении мощности реактора от 100 до 50% номинальной уменьшается от первого топливного цикла к четвертому;

максимум отравления при скорости снижения мощности примерно 1%/мин наступает через 5—6 ч после начала разгрузки;

глубина "иодной ямы" в четвертом топливном цикле на 0,35% (в единицах реактивности) меньше, чем в первом топливном цикле.

Для анализа были выбраны близкие друг к другу условия проведения опытов — исходный и конечный уровни мощности реактора, концентрация борной кислоты в замедлителе, скорость разгрузки, энерговыработка в топливном цикле (исключения составляют исходные положения управляющей группы ТВС). Необходимо заметить, что чем ближе друг к другу условия проведения опытов, тем меньше ошибки вносятся при анализе и тем выше точность исследования. Количество данных по ксеноновым переходным процессам, получаемых в процессе эксплуатации одного энергоблока АЭС, работающего к тому же в базовом режиме, конечно, недостаточно для глубокого изучения вопроса. Решение такой задачи может быть достигнуто путем накопления и систематизации опытных данных, полученных на всех действующих АЭС с реакторами ВВЭР.

**Распределение энерговыделения в реакторе.** Малые длины миграции нейтронов в уран-водных размножающих решетках обуславливают большую чувствительность нейтронного поля к неоднородностям активной зоны. Основной и наиболее сильный источник неравномерности тепловыделения в реакторах ВВЭР — высокоэффективные органы регулирования [8]. Как аксиальная, так и радиальная неравномерности тепловыделения сильно зависят от положения органов регулирования реактора по высоте активной зоны; наиболее сильно зависит аксиальная неравномерность. Основной путь получения приемлемого значения аксиальной неравномерности, используемый в реакторах ВВЭР последних поколений, — выбор оптимального положения управляющей группы ТВС по высоте активной зоны [8].

Под оптимальным понимается такое положение, при котором умеренное искажение нейтронного поля сочетается с достаточной для отработ-

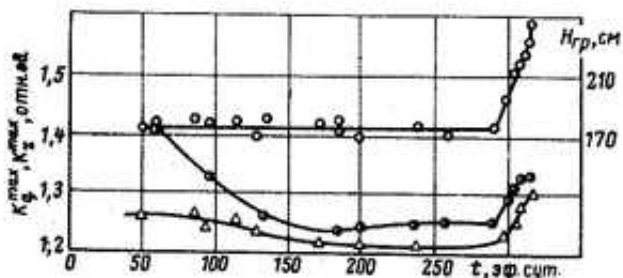


Рис. 3.14. Изменение коэффициентов неравномерности  $K_q^{max}$  и  $K_z^{max}$  в реакторе ВВЭР-440 при выгорании топлива (II блок КАЭС, четвертый топливный цикл,  $N_T = 107\%$  номинальной):

○ — положение управляющей группы СУЗ; ◉ —  $K_z^{max}$ ; △ —  $K_q^{max}$

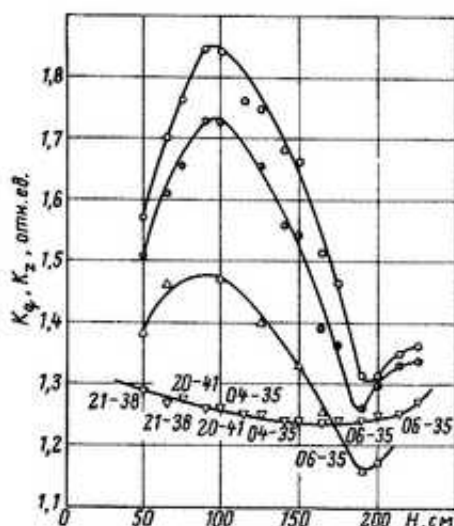
ки различного рода возмущений по нагрузке дифференциальной и интегральной эффективностью управляющей группы ТВС. С другой стороны, высотное положение управляющей группы, наряду с ее интегральной характеристикой, определяет оперативный запас реактивности, величина которого заметным образом влияет на маневренные характеристики реактора [44].

Расчетными исследованиями установлено, а экспериментальными подтверждено, что в процессе выгорания топлива в реакторах ВВЭР происходит самовыравнивание энерговыделения из-за неравномерного выгорания, пропорционального энерговыделению, и неравномерного проявления других эффектов реактивности (мощностного и отравления) [8]. В данном разделе приведены результаты экспериментального исследования влияния выгорания топлива и высотного положения управляющей группы ТВС СУЗ на коэффициенты неравномерности тепловыделения по ТВС  $K_q$  и по высоте ТВС  $K_z$  в реакторе ВВЭР.

Исследование распределения энерговыделения по объему активной зоны реактора осуществляется с помощью систем внутриреакторного контроля. Методика проведения измерений и обработки результатов подробно изложена в [44]. На рис. 3.14 показано изменение значений максимальных коэффициентов неравномерности энерговыделения  $K_q^{max}$  и  $K_z^{max}$  для четвертой топливной загрузки ВВЭР-440 блока № 2 Кольской АЭС. Измерения выполнены на стационарном уровне мощности (107 % номинальной) при положении управляющей группы в диапазоне 170–180 см. Цифры около экспериментальных точек обозначают координаты активной зоны, соответствующие положению максимально напряженных кассет. Как видно из приведенных данных, основное уменьшение  $K_q^{max}$  и  $K_z^{max}$  происходит в первые 200 эф. сут работы реактора; наибольшее влияние выгорание топлива оказывает на  $K_z^{max}$ ; по мере ввода в активную зону невыгоревших участков топливных частей регулирующих ТВС в конце топливного цикла  $K_q^{max}$  и  $K_z^{max}$  увеличиваются;

Рис. 3.15. Зависимость коэффициентов неравномерности распределения мощности по кассетам  $K_q^{max}$  и по высоте активной зоны  $K_z$  от высоты управляющей группы СУЗ (эксперимент, II блок КАЭС,  $T = 110$  эф. сут,  $N_T = 107\%$  номинальной):

○ —  $K_z$  в канале № 8 (ячейки 13–54); ● —  $K_z$  в канале № 1 (ячейки 13–42); △ —  $K_z$  в канале № 4 (ячейки 03–42); ▽ —  $K_q^{max}$



максимум поля энерговыделения по мере выгорания топлива перемещается по объему активной зоны.

Максимальная неравномерность энерговыделения по высоте активной зоны при нормальном режиме работы реактора наблюдается, как правило, в топливе, окружающем ТВС управляющей группы. Измерительные каналы № 1 и 8 расположены в непосредственной близости к регулирующим ТВС; поэтому с достаточной степенью точности можно предположить, что приведенные на рис. 3.15 значения  $K_z$  максимальны не только для тех двенадцати ТВС, в которых измеряется аксиальное распределение плотности потока тепловых нейтронов, но и для всех ТВС активной зоны.

На рис. 3.15 показано изменение  $K_q$  и  $K_z$  в зависимости от положения управляющей группы; данные получены экспериментальным путем на реакторе ВВЭР-440 блока № 2 Кольской АЭС. В исходном состоянии мощность реактора составляла 107 % номинальной, высота управляющей группы 227 см от низа активной зоны, концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура 3,7 г/кг. При неизменных параметрах реакторной установки водообменом снижалась концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура; компенсация выделяющейся положительной реактивности осуществлялась перемещением управляющей группы вниз. Через каждые 10–15 см перемещения группы водообмен прекращался, параметры реакторной установки стабилизировались и проводилась синхронная регистрация температур теплоносителя на выходе из рабочих ТВС, показаний датчиков прямого заряда в сухих каналах и всех основных параметров первого контура. Оперативно оценивались коэффициенты неравномерности энерговыделения. Если значения этих коэффициентов не превосходили допустимых для данного режима работы реактора, водообмен продолжался и группа снижалась еще на

10–15 см. Таким образом был исследован интервал перемещения управляющей группы ТВС 225–50 см от низа активной зоны. Распечатка показаний термодатчиков "массового" замера температур на выходе из рабочих ТВС осуществлялась с помощью быстрой печати блочной информационно-вычислительной машины ИВ-500 МА. Сигналы от датчиков прямого заряда усиливались и регистрировались вторичной аппаратурой "Джай-лык".

Результаты измерений показывают, что  $K_q$  довольно слабо зависит от положения управляющей группы по высоте активной зоны в диапазоне 100–200 см. Более сильная зависимость наблюдается в коэффициенте неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны. В рабочих ТВС, расположенных рядом с управляющими ТВС,  $K_z$  принимает максимальное значение (ТВС с координатами 13–54, 13–42). В рабочих ТВС, удаленных от управляющих ТВС, неравномерность заметно меньше (ТВС 03–42). Максимальная аксиальная неравномерность распределения энерговыделения в ТВС 13–54 составила 1,84 при высоте управляющей группы 90–100 см от низа активной зоны.

По мере перемещения группы управляющих ТВС вниз координата ТВС с максимальной мощностью в активной зоне удаляется от регулирующих ТВС. В то же время координата ТВС с максимальной аксиальной неравномерностью сохраняется, причем полная мощность этой ТВС уменьшается и становится ниже средней по активной зоне при  $H^{ГР} = 115$  см.

Полученные в эксперименте результаты качественно совпадают с данными расчетов полей энерговыделения по программе БИПР-5.

Факт самовыравнивания поля энерговыделения по объему активной зоны в процессе выгорания топлива может быть использован для расширения диапазона допустимых нагрузок энергоблока АЭС путем увеличения оперативного запаса реактивности реактора [44]. Для этого достаточно показать, что при выбранном положении управляющей группы ТВС для данного момента топливного цикла линейные тепловые нагрузки на твэлы не превышают допустимых, а дифференциальная эффективность управляющей группы ТВС на рабочем участке соответствует требуемой. Ниже проведен анализ применительно к стационарной топливной нагрузке реактора ВВЭР-440. Исследована возможность длительной эксплуатации реактора на номинальной мощности при высоте управляющей группы 100 см от низа активной зоны.

Рассмотренные выше неравномерности энерговыделения характеризуют собой "макрополе", т.е. поле по топливным сборкам, на которое накладывается "тонкая структура" — отклонения нейтронного поля и связанных с ним тепловыделений от средних значений в каждом районе активной зоны [8]. Для определения линейных тепловых нагрузок в максимально нагруженных твэлах необходимо кроме  $K_q$  и  $K_z$  знать коэффициент неравномерности энерговыделения по твэлам внутри ТВС —  $K_k$ . Из-за отсутствия возможности экспериментального исследования

$K_K$  на промышленном реакторе в анализе использованы данные расчетов из работы [45]. Коэффициенты неравномерности в мощности ТВС, не имеющих температурного контроля, получены расчетом по программе БИПР-5.

Линейная нагрузка на твэлы с максимальным энерговыделением определяется по формуле

$$q_l = \bar{q}_l K_q K_z K_K^{max} K_{инж}, \quad (3.7)$$

где  $\bar{q}_l$  — средняя линейная нагрузка на твэл в режиме максимальной мощности при нормальной эксплуатации реактора;  $K_K^{max}$  — максимальный коэффициент неравномерности энерговыделения в твэл исследуемой кассеты;  $K_{инж}$  — инженерный коэффициент, учитывающий возможное отклонение значений местного теплового потока и местной энтальпии от расчетных значений вследствие технологических допусков при изготовлении топливных таблеток, тепловыделяющих элементов, сборок, перераспределения расходов по каналам и неточности расчетных методик.

Линейные тепловые нагрузки на твэлы рассчитаны для центральных ТВС с координатами в активной зоне 04–35 и 20–41, имеющих максимальные  $K_q$  в диапазоне перемещения управляющей группы 150–80 см; для ТВС с координатой 13–54, имеющей максимальный  $K_z$ , и для периферийных ТВС 09–60, 11–62, имеющих максимальные  $K_K$  и  $K_{инж}$ . Анализ, выполненный в консервативном приближении, показывает, что имеющиеся линейные тепловые нагрузки на твэлы не создают ограничений для работы реактора ВВЭР-440 на проектной мощности в стационарном топливном цикле (начиная с четвертого года работы реактора) при высоте управляющей группы около 100 см от низа активной зоны. При этом умеренное искажение нейтронного поля сочетается с достаточной для отработки различного рода возмущений дифференциальной эффективностью управляющей группы ТВС, составляющей  $(7-9) \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ .

При уменьшении мощности реактора управляющая шестая группа перемещается вниз вплоть до нуля, после чего начинает движение следующая в штатной последовательности пятая группа. С понижением мощности допустимые значения коэффициентов неравномерности энерговыделения увеличиваются; это связано с уменьшением средних тепловых нагрузок на твэлы. Из результатов, полученных на реакторе ВВЭР-440, известно [44], что при работе реактора на пониженном уровне мощности с полностью введенными поглотителями управляющей группы коэффициенты неравномерности энерговыделения по объекту активной зоны не превышают допустимых значений.

Таким образом, экспериментальное изучение процессов, происходящих в реакторе с использованием оперативных систем внутриреакторного контроля, показало, что можно использовать резерв в значении максимальной линейной тепловой нагрузки на твэлы для улучшения маневренных характеристик реакторов ВВЭР.

### 3.2. Процессы в твэлах при нестационарных режимах работы

Тепловыделяющие элементы являются одними из наиболее ответственных узлов реактора. Процессы, происходящие в твэлах, оказывают большое влияние на работу ядерного реактора. Твэлы больших энергетических реакторов работают, как правило, в условиях высоких температур, мощных потоков ионизирующих излучений, высоких механических и тепловых нагрузок, в контакте с теплоносителем и т.д. Под влиянием этих факторов меняются физико-механические свойства материалов, снижается их эксплуатационная надежность. Тем не менее топливо в виде двуокиси урана, используемое в большинстве энергетических реакторов на тепловых нейтронах, имеет удовлетворительное качество.

По зарубежным данным доля поврежденных твэлов с топливом из  $UO_2$  в реакторах PWR и HWR не превышает 0,03% [46]. При изменении мощности реактора в твэлах возникают термические напряжения, обусловленные большими градиентами температур и зависящие от формы и размеров твэла и коэффициентов теплопроводности составляющих его материалов. Циклические изменения мощности реактора приводят к малоцикловой усталости материала оболочки. Как и любые нестационарные режимы, режимы циклического изменения мощности реактора должны приводить к снижению работоспособности твэлов. Поэтому важно выявить основные факторы, снижающие надежность работы твэлов в переменных режимах, и принять меры к их ликвидации.

В последние годы за рубежом уделяется большое внимание изучению работоспособности твэлов при работе реакторов в нестационарных режимах и в режимах маневрирования мощностью. США, ФРГ, Франция и ряд других стран осуществляют совместную программу по систематическому изучению поведения твэлов при всплеске мощности [47]. Были предложены следующие методы борьбы с повреждением оболочек в нестационарных режимах:

- оптимизация топлива за счет изменения конструкции таблеток (уменьшение высоты и диаметра, вариация геометрической формы торцов, заполнение центральной части природным ураном для снижения давления газообразных продуктов деления, добавление химических веществ к топливу для удержания продуктов деления);

- нанесение покрытия на внутреннюю стенку оболочки твэла для создания химического барьера для продуктов деления;

- сцепление оболочки с сердечником.

Все эти меры не привели к существенному повышению работоспособности и не устранили силового взаимодействия сердечника с оболочкой [47].

Методики изучения влияния колебания мощности на работоспособность твэлов, используемые различными программами, незначительно отличаются друг от друга и связаны с предварительным облучением опытных топливных сборок в стационарном режиме до определенного выгорания топлива и последующим испытанием облученных сборок



в другом реакторе, приспособленном к импульсной нагрузке, либо имеющем устройства для циклического изменения тепловой нагрузки на твэлы. После окончания опыта изучается герметичность оболочки твэла, строение топливного сердечника, геометрические размеры твэла и др.

В Европе, США, Японии поставлено большое количество экспериментов в целях изучения поведения твэлов в нестационарных режимах. Эти эксперименты проводились в рамках совместной международной программы, которая предусматривала первоначальное стационарное облучение твэлов в легководных реакторах в Кале и Юлихе (ФРГ), в Агесте и Оскарсхамне (Швеция), в Халлене (Норвегия) и последующее изучение поведения облучения твэлов в нестационарных режимах в реакторах DR-3 (Бельгия), R-2 (Швеция) и "Петтен" (Норвегия) [48, 49].

Для проведения испытания твэлов с переменными нагрузками реакторы R-2 и "Петтен" оборудованы петлями, заполняемыми  $^3\text{He}$ . Высокое сечение поглощения нейтронов этим газом позволяет в широком диапазоне быстро изменять мощность испытываемой сборки путем изменения давления газа в петле. В реакторах ФРГ в течение трех лет облучено несколько тысяч твэлов до выгорания 30 МВт·сут/кг при линейной нагрузке 250 Вт/см. Последующие эксперименты с изменением мощности в реакторе "Петтен" показали, что разрушение оболочек облученных твэлов возникало при скачках мощности до 400–500 Вт/см в зависимости от начального выгорания; с ростом выгорания вероятность отказов твэлов увеличивается (рис. 3.16) [48]. Выявлено также возрастание числа поврежденных оболочек твэлов вследствие механического взаимодействия с окисным сердечником по мере увеличения выхода осколочного газа из топлива.

Обнаруженная взаимосвязь между газовыделением и повреждением твэлов наряду с металлографическими исследованиями показывает, что продукты деления вызывают коррозионное растрескивание под напряжением и непосредственно участвуют в повреждении твэлов в результате взаимодействия топлива с оболочкой. По мнению авторов работы [50], наиболее вероятным продуктом деления, вызывающим коррозионное растрескивание оболочек твэлов под напряжением, является вод.

Исследования структуры облученного топлива и микроструктуры твэлов, подвергавшихся всплеску мощности, позволили выдвинуть гипотезу о том, что при критических линейных мощностях твэлов при взаимодействии топлива с оболочкой начинает проявляться механизм обратной термической связи по топливу, усугубляющий этот процесс [23]. Таким образом, при увеличении мощности газообразные продукты деления выделяются в зазоры между таблетками и оболочкой твэла, скапливаясь на локальных участках. Это, в свою очередь, приводит к повышению градиента температуры на зазоре и к увеличению температуры топлива, что способствует еще большему выделению газообразных продуктов деления.

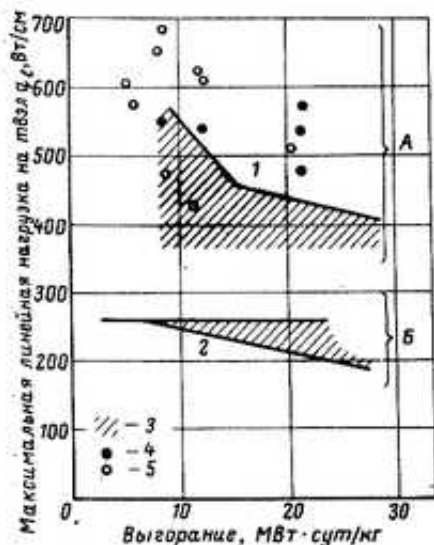


Рис. 3.16. Влияние скачков мощности на работоспособность предварительно облученных ТВЭЛов:

*A* — максимальное локальное значение  $q_l$  после скачка мощности; *B* — среднее значение  $q_l$  перед скачком мощности; 1 — граница области повреждаемости; 2 — изменение нагрузки на ТВЭЛ при предварительном облучении; 3 — область сохранения работоспособности (расчет); 4 — повреждение нет (эксперимент); 5 — повреждение (эксперимент)

На основе проведенных исследований было предложено следующее объяснение повреждения ТВЭЛов при взаимодействии топлива с оболочкой [50]. После продолжительной работы при низком уровне мощности быстрый подъем мощности вызывает растягивающие напряжения в оболочке ТВЭЛов, приводящие к локальным пластическим деформациям (появление на оболочке борозд). Растягивающие напряжения в дальнейшем релаксируются благодаря ползучести топлива и оболочки. Через определенное время после скачка скорость выделения продуктов деления достигает максимума. Это может способствовать дополнительному повышению температуры топлива и задержке релаксации напряжений в оболочке. Если на некотором участке ТВЭЛа одновременно выполняются условия критических концентраций продуктов деления и критических напряжений, то возможно хрупкое растрескивание оболочки в результате взаимодействий последней с топливом. Это объяснение относится к ТВЭЛам, работающим при относительно низкой линейной мощности. Условия повреждения ТВЭЛов за счет взаимодействия топлива с оболочкой для ТВЭЛов с высокой нагрузкой могут отличаться от приведенных выше. Они могут также всецело определяться возникающими в момент скачка мощности напряжениями, если при выделении продуктов деления появится достаточное количество активного иода на оболочке ТВЭЛа.

Шведскими учеными разрабатывается конструкция ТВЭЛа, по предварительным экспериментальным данным более стойкая к колебаниям мощности. Она характеризуется наличием на внутренней поверхности циркониевой оболочки 16 продольных ребер высотой до 20 мкм. Опытные образцы таких ТВЭЛов с холодным диаметральный зазором 50 мкм между оболочкой и окисным сердечником после предварительного об-

тушения до выгорания 6 МВт·сут/кг подвергали воздействию скачков мощности от 320 до 720 Вт/см. В таблетках возникали продольные трещины, однако твэлы оказались неповрежденными.

Интересен опыт фирмы "Вестингауз", которая установила, что путем повышения давления внутри топливных стержней можно увеличить их надежность и улучшить эксплуатационные характеристики [51]. Повышение давления внутри стержней частично уравнивает наружное давление теплоносителя и тем самым снижает ползучесть оболочки, а также уменьшает или предотвращает взаимодействие топливных таблеток с оболочкой. При рабочих температурах сжимающее напряжение в топливном стержне с повышенным внутренним давлением составляет почти половину напряжения, которое было в стержне без повышения внутреннего давления. Исследования большого количества твэлов, заполненных гелием под давлением, облучавшихся в реакторах АЭС в Сакстоне и Сорите до выгорания 10 МВт·сут/кг, показали, что долговечность оболочки возрастает с увеличением внутреннего давления гелия; усталостное сопротивление оболочки даже при низком внутреннем давлении 17,5 ат уменьшается втрое; в зависимости от циклических характеристик мощности реактора и уровня давления долговечность оболочки может быть увеличена в 2–10 раз. Высокая теплопроводность гелия под высоким давлением обуславливает пониженную температуру топлива в твэлах с повышенным внутренним давлением по сравнению с твэлами обычного исполнения.

Понижение температуры топлива может быть использовано для повышения надежности и пределов безопасности за счет снижения напряжений и деформаций, которым подвергается оболочка твэлов; получения более высокой выходной мощности при той же температуре топлива; уменьшения расхода урана-235 вследствие обратно пропорциональной зависимости реактивности от температуры топлива; увеличения допустимого количества циклических изменений мощности реактора.

В работе [22] приведены конкретные пути исследований для обеспечения надежной работы твэлов отечественных реакторов в переходных процессах. Для повышения пороговой мощности разрушения твэлов рассматривается возможность ступенчатого вывода реактора на номинальную мощность после остановки или работы на пониженном уровне мощности. Эта идея предполагает выдерживание твэлов на двух-трех промежуточных уровнях мощности в течение времени, достаточного для релаксации напряжений в оболочке на 40–60% от первоначальных значений в результате ползучести топлива. Продолжительность релаксации и уровень напряжения в оболочке могут быть понижены за счет разработки топливного сердечника, отличающегося высокой скоростью ползучести или пониженной температурой хрупко-пластического перехода. Этот путь связан с введением в  $UO_2$  небольших добавок (например, других окислов, образующих легкоплавкие эвтектики), которые почти не снижают температуру плавления, но увеличивают скорость ползучес-

ти  $UO_2$  в диапазоне температур 700–1000 °С. Для определения основного фактора, определяющего коррозионное растрескивание циркониевых оболочек, намечено детальное изучение этого процесса.

Все вышеприведенные данные свидетельствуют о сложности и важности проблемы создания твэлов для реакторов, работающих с переменными нагрузками. Большинство проведенных исследований носит специальный характер и требует больших материальных затрат. В то же время модели процессов, происходящих в топливе в переходных режимах, созданные на основе этих исследований, позволяют изучать некоторые вопросы поведения твэлов в нестационарных режимах на действующих реакторах АЭС практически без дополнительных материальных затрат. Такие исследования позволяют разрабатывать мероприятия, направленные на увеличение эксплуатационной надежности твэлов.

Единственным из всех доступных методов исследования процессов, происходящих в твэлах в нестационарных режимах на действующей АЭС, является метод, основанный на спектрометрическом анализе изотопного состава продуктов деления в теплоносителе первого контура. Такой метод позволяет проводить изучение влияния различных факторов на процессы разгерметизации всех твэлов активной зоны в целом. В сочетании с последующим изучением состояния твэлов, выгруженных из реактора в горячей камере, этот метод может служить инструментом для более глубокого изучения процессов, происходящих в отдельном твэле.

Контроль за герметичностью оболочек твэлов на работающем реакторе может производиться как периодически — с отбором проб и последующим их анализом методами радиохимии, так и непрерывно — с регистрацией реперных изотопов путем измерения каскадного гамма-излучения от трубопроводов с теплоносителем первого контура. Для анализа факторов, влияющих на разгерметизацию оболочек твэлов в нестационарных режимах, непрерывный контроль за состоянием активной зоны является, несомненно, наиболее информативным. Кроме непрерывности получаемая информация должна отличаться еще одним свойством — полнотой, т.е. должна быть получена информация о всех основных радионуклидах осколочного происхождения, содержащихся в теплоносителе. Всем этим требованиям отвечает система определения концентрации продуктов деления в теплоносителе первого контура реактора без отбора пробы. Эта система, получившая название "Байпас", состоит из устройства непрерывной доставки теплоносителя к детектирующему устройству, самого детектирующего устройства и анализирующей аппаратуры. Подробное описание системы, методики измерений и обработки результатов приведено в работе [52]. Возможность записи спектров на магнитную ленту с довольно большой частотой позволяет проводить анализ быстропротекающих процессов в твэлах активной зоны при резких изменениях мощности реактора путем последующей обработки спектров радионуклидов в теплоносителе первого контура.

Различают два типа нарушений герметичности оболочек твэлов:

1) микронеплотности, через которые могут проникать только газообразные продукты деления;

2) крупные дефекты, при которых возможен непосредственный контакт топлива с водой; в этом случае в теплоноситель могут проникать как газообразные, так и другие осколки деления.

Влияние нестационарных режимов работы реактора на герметичность оболочек твэлов определяется по соотношению различных продуктов деления в воде первого контура и по суммарной осколочной активности в теплоносителе до и после возмущения по мощности. Кроме того, поведение активности отдельных продуктов деления во времени в нестационарных режимах позволяет уточнять имеющиеся представления о механизме процессов, протекающих в твэлах.

Наиболее неблагоприятное воздействие на состояние оболочек твэлов оказывают следующие нестационарные режимы работы ядерной энергетической установки: глубокое расхолаживание реактора, быстрый подъем мощности после длительной работы с пониженной нагрузкой или стоянки, работа быстродействующей аварийной защиты реактора.

На рис. 3.17 показано изменение содержания некоторых радионуклидов в теплоносителе реактора ВВЭР-440 при сбросе мощности и последующем быстром восстановлении нагрузки через 27 ч. При быстром снижении мощности реактора со 107 до 20% номинальной отмечается всплеск активности как отдельных изотопов, так и суммарной активности теплоносителя. Это связано с тем, что при работе на высоком уровне мощности вследствие разности коэффициентов термического расширения  $UO_2$  и циркония радиальный зазор между топливом и оболочкой сокращается до минимума. Вследствие этого затруднена миграция осколков деления по радиальному зазору. При сбросе мощности температура топлива уменьшается, в то время как температура оболочки практически не изменяется; это приводит к увеличению радиального зазора и увеличению миграции осколков деления, скопившихся под оболочкой, по радиальному зазору к месту дефекта в оболочке твэла. После снижения мощности реактора и при его работе с пониженной нагрузкой активность всех приведенных на рис. 3.17 радионуклидов падает в связи с уменьшением количества деления ядер топлива и радиоактивным распадом изотопов. При достаточно длительной работе реактора на пониженной мощности активность теплоносителя первого контура устанавливается на уровне, соответствующем уровню мощности реактора.

При подъеме мощности реактора и увеличении интенсивности реакции деления активность продуктов деления в теплоносителе возрастает за счет увеличения выхода осколков под оболочки твэлов. Из-за разности температурных коэффициентов расширения  $UO_2$  и циркония топливо вступает в контакт с оболочкой. Возникающие термические напряжения в топливе приводят к растрескиванию спеченной двуокиси урана и дополнительному увеличению выхода продуктов деления под оболоч-

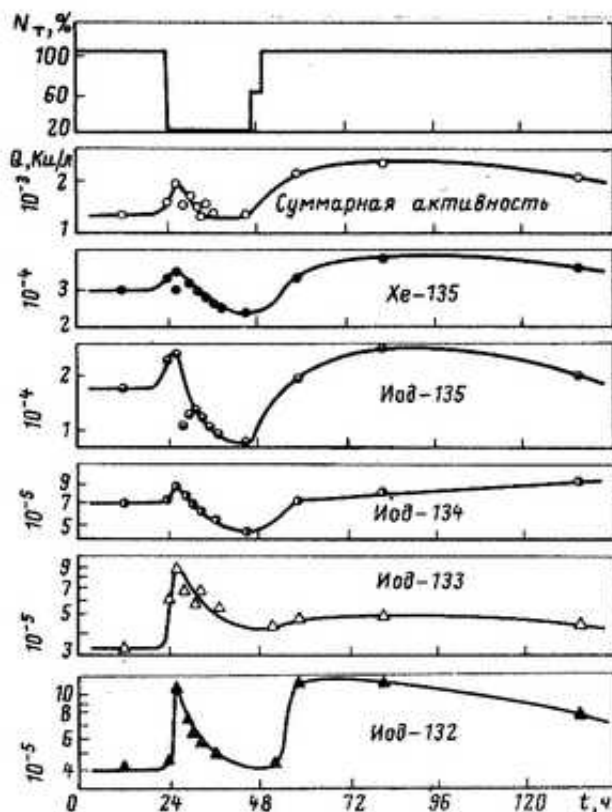


Рис. 3.17. Изменение содержания некоторых радионуклидов в теплоносителе реактора ВВЭР-440 в переходном режиме по мощности

ку. По этой причине активность изотопов в теплоносителе после выхода реактора на исходный уровень мощности превышает величину активности до сброса мощности. После достаточно длительного периода работы реактора на стационарном уровне мощности после восстановления нагрузки суммарная осколочная активность теплоносителя и активность отдельных изотопов устанавливаются на первоначальном уровне.

Приведенные на рис. 3.18 кривые иллюстрируют изменения активности некоторых радионуклидов в теплоносителе первого контура во времени после срабатывания быстродействующей аварийной защиты реактора. Поскольку момент срабатывания защиты не может быть предусмотрен заранее, а система "Байпас" не автоматизирована настолько, чтобы накапливать информацию по сигналу срабатывания аварийной защиты, часть данных в начале переходного процесса теряется. Тем не менее и та информация, которую удастся получить, имеет большую ценность и по-

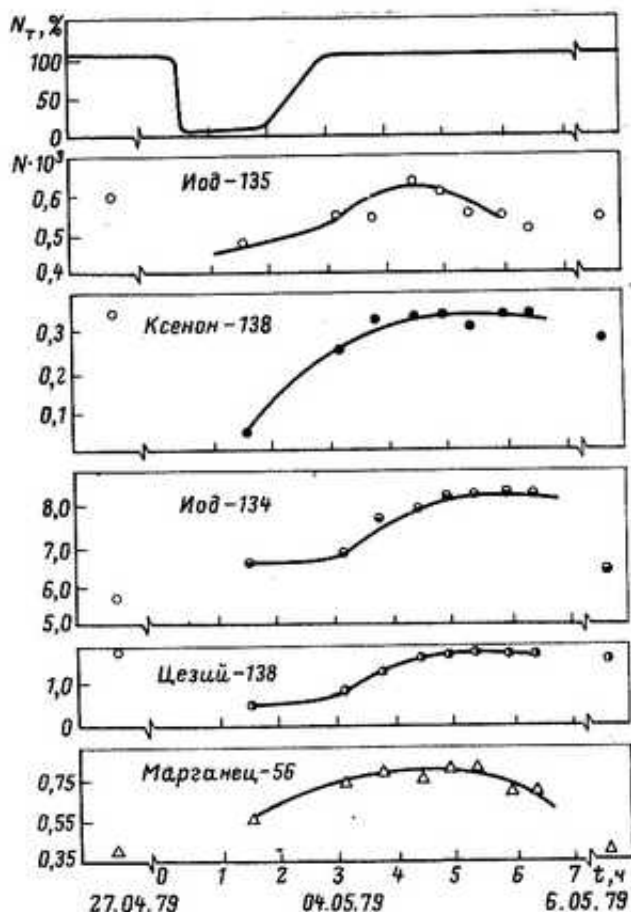


Рис. 3.18. Изменение содержания некоторых радионуклидов в теплоносителе реактора ВВЭР-440 после срабатывания аварийной защиты первого рода

зволяет судить о процессах, происходящих в твэлах. Изменение активности радионуклидов в теплоносителе при подъеме мощности реактора после срабатывания аварийной защиты имеет такой же характер, как и в предыдущем случае. Через двое суток активность теплоносителя по отдельным изотопам возвращается к исходному уровню.

Необходимо отметить, что кривые, приведенные на рис. 3.17 и 3.18, типичны для исследуемых нестационарных режимов работы реактора. Наблюдается хорошая воспроизводимость экспериментальных результатов по изменению радионуклидов в воде первого контура при резких изменениях мощности реактора. Сохранение содержания радионуклидов в теплоносителе до и после завершения переходного процесса в не-

изменных пределах свидетельствует о том, что состояние оболочек твэлов в целом, по крайней мере, не ухудшается.

Опыт эксплуатации тепловыделяющих элементов из двуокиси урана в циркониевой оболочке на отечественных АЭС с реакторами ВВЭР свидетельствует об их высокой работоспособности. В массовом количестве достигнута проектная глубина выгорания в среднем по выгрузасмому топливу. В большом количестве топливных сборок эта величина превосходит проектную на 25–30%. Эти показатели получены с учетом работы ядерного топлива в начальные периоды освоения мощности блоков с характерным для этих периодов повышенным количеством аварийных остановок и изменений нагрузки.

### 3.3. Температурный режим работы твэлов

Существенное влияние на работу реактора оказывают процессы коррозии конструкционных материалов циркуляционного контура, внутрикорпусных устройств и активной зоны. Отложение продуктов коррозии на теплопередающих поверхностях, в частности на оболочках твэлов, приводит к уменьшению коэффициента теплопередачи и вследствие этого к повышению температуры оболочки и топливного сердечника и снижению надежности работы твэлов. Увеличение температуры топлива приводит, кроме того, к потере реактивности вследствие проявления эффекта Доплера и сокращению длительности работы реактора на номинальных параметрах в топливном цикле, а следовательно, к уменьшению глубины выгорания выгружаемого топлива и снижению экономических показателей всего энергоблока АЭС. Поэтому чистоте теплопередающих поверхностей, и в первую очередь оболочек твэлов, должно уделяться особое внимание при эксплуатации реактора. Особенно остро этот вопрос встает в свете повышенных требований к эксплуатационной надежности твэлов, работающих с переменными нагрузками. Рассмотрим основные факторы, оказывающие влияние на процессы осаждения продуктов коррозии на внутренних элементах реакторной установки, и в особенности на оболочках твэлов.

Продукты коррозии, перешедшие в теплоноситель, находятся в растворимой (ионной и коллоидной) и нерастворимой формах [53]. Образующиеся в процессе коррозии крупнодисперсные фракции оседают в застойных зонах и в зонах с пониженной скоростью теплоносителя. Ионы, коллоиды и мелкодисперсная фракция (менее 2 мкм) разносятся циркулирующим теплоносителем и откладываются на поверхностях контура [54]. Лишь небольшая часть общего количества продуктов коррозии находится в теплоносителе. По данным [55] более 98% продуктов коррозии находится в виде отложений на поверхности контура и в виде осадка в застойных зонах.

Количество отложений в значительной степени зависит от концентрации продуктов коррозии в теплоносителе [53]. В некоторых исследова-



ниях [53, 56] показано, что материал, на который откладываются продукты коррозии, также оказывает влияние на количество отложений. Отложения на цирконии и его сплавах меньше, чем на нержавеющей стали; в свою очередь, отложения на нержавеющей стали меньше, чем на углеродистой [56].

Химический состав продуктов коррозии, циркулирующих в теплоносителе и откладывающихся на поверхности контура, зависит от материалов, из которых он изготовлен. Исследования показывают, что в отложениях присутствуют те же элементы, что и в основном металле — поставщике продуктов коррозии [54]. Циркуляционный контур реакторов с водой под давлением типа ВВЭР выполнен из аустенитной и углеродистой сталей, оболочки твэлов и челловые трубы топливных кассет — из сплава циркония с ниобием. В таких системах отложения состоят, в основном, из следующих элементов: Fe; Ni; Cr; Mn [57].

Особую роль в процессе отложений продуктов коррозии играют температура и тепловой поток. В зоне радиационных и тепловых потоков происходит преимущественное образование отложений [58]. Отложения продуктов коррозии на теплопередающих поверхностях, в частности на твэлах, могут привести к уменьшению теплопроводности, т.е. к увеличению термического сопротивления и перегреву оболочки и топлива. Исследованию отложений на поверхности твэлов в различных реакторах посвящено достаточно большое количество работ [58–66]. В результате исследований установлено, что на твэлах образуется тонкая окисная пленка черного или темно-серого цвета, прочно сцепленная с оболочкой. Толщина окисной пленки растет с увеличением теплового потока и времени испытаний. На окисной пленке обнаружены коррозионные отложения различного состава, оттенков (красновато-коричневый, красновато-бурый, темно-коричневый) и толщины, легко удаляемые механически. Состав, цвет и толщина отложений зависят от материалов контура, теплового потока, водно-химического режима и времени выдержки твэла в реакторе. Вследствие пористости слой отложений имеет более высокое термосопротивление, чем слой сплошного магнетита с такой же плотностью. Например, отложения на твэлах в реакторе "Сакстон" чрезвычайно пористы и содержат по объему только 5% твердого вещества [58].

Для определения влияния отложений продуктов коррозии на температурные поля внутри твэлов выполнены соответствующие теплофизические расчеты применительно к реактору ВВЭР-440. Все необходимые константы — геометрические, теплофизические — взяты из [67]. Для расчета температуры поверхности топливного сердечника получено следующее выражение:

$$\bar{t}_1 = t_0 + \frac{q_l^{max}}{\pi^2} \left( \frac{\delta_{от}}{\lambda_{от} R_4} + \frac{\delta_{об}}{\lambda_{об} R_3} + \frac{1}{R_2 \xi} \right), \quad (3.8)$$

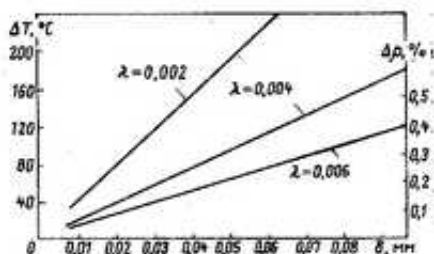


Рис. 3.19. Изменение средней температуры топлива  $\Delta T$  и реактивности реактора  $\Delta \rho$  ВВЭР-440 в зависимости от толщины отложений продуктов коррозии на оболочках твэлов  $\delta$  при различных значениях коэффициента теплопроводности отложений  $\lambda$ , Вт/мК

где  $t_0$  — температура наружной поверхности слоя отложений;  $q_1^{max}$  — максимальная линейная мощность твэла;  $\delta_{от}$ ,  $\delta_{об}$  — толщина отложений и оболочки соответственно;  $\lambda_{от}$ ,  $\lambda_{об}$  — коэффициент теплопроводности материала отложений и оболочки;  $R_2$  — внутренний радиус оболочки;  $R_3$  — внешний радиус оболочки;  $R_4 = R_3 + \delta_{об}$ ;  $\xi$  — проводимость диаметрального зазора между оболочкой и сердечником.

Прирост средней температуры поверхности топливного сердечника за счет отложений определялся по формуле

$$\Delta \bar{t}_1 = \frac{q_1^{max}}{\pi^2} \frac{\delta_{от}}{\lambda_{от} R_4} \quad (3.9)$$

Вследствие небольших толщин оболочки, отложений и диаметрального зазора перепады температур с достаточно хорошей точностью рассчитываются по формулам для плоской стенки.

Расчеты выполнены для трех наиболее характерных значений коэффициента теплопроводности в интервале изменения толщины отложений от 0,01 до 0,1 мм (рис. 3.19). Увеличение средней температуры топлива при прочих равных условиях приводит к уменьшению запаса реактивности реактора за счет отрицательного коэффициента реактивности по температуре двуоксида урана. Значение  $d\rho/dt_{UO_2} = -0,323 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  получено расчетом по программе КР для стационарного топливного цикла реактора ВВЭР-440. На рис. 3.19 приросту средней температуры топлива сопоставлено уменьшение запаса реактивности реактора вследствие осаждения продуктов коррозии на оболочках твэлов.

Полученные в результате расчета данные указывают на то, что борьба с отложениями на оболочках твэлов должна вестись самым решительным образом и что успех в этой борьбе сулит большие экономические выгоды.

Количество отложений зависит от теплового потока, причем толщина слоя отложений примерно пропорциональна уровню мощности твэла [63]. Таким образом, более энергонапряженные твэлы подвержены более сильным "загрязнениям" продуктами коррозии, что делает условия эксплуатации этих твэлов еще более жесткими из-за уменьшения запаса по температуре до плавления топливного сердечника. В то же время увеличение отложений на наиболее напряженных твэлах приводит к

дальнейшему росту температуры топлива, т.е. этот процесс характеризуется положительной обратной связью.

Увеличение градиентов температур в твэле способствует росту температурных напряжений и снижает эксплуатационную надежность твэлов как в стационарных, так и в переменных режимах работы реактора. Уменьшение запаса реактивности приводит к снижению экономических показателей реакторной установки вследствие снижения глубины выгорания выгружаемого из реактора топлива и к ухудшению маневренных характеристик реактора.

Проблема борьбы с отложениями продуктов коррозии на оболочках твэлов возникла давно; в этом направлении проведены соответствующие исследования. Так, в работе [68] была исследована растворимость магнетита в воде в зависимости от температуры и pH (значение pH изменялось в пределах от 5,0 до 10,6 путем добавки KOH). В результате исследований было установлено, что при изменении pH от 5,0 до 9,3 растворимость магнетитов в воде падает в диапазоне температур от 100 до 300 °С. Практика эксплуатации энергетических реакторов подтверждает вывод о том, что градиенты растворимости магнетита воздействуют на перенос продуктов коррозии в контуре. Так, на реакторах "Индиан-Пойнт", "Сакстон", "Роу-Янки" (США) и "Энрико Ферми" (Италия) после повышения pH теплоносителя наблюдалось увеличение реактивности [69]. Этот эффект объясняется тем, что увеличение pH вызывает растворение и перенос продуктов коррозии с оболочек твэлов. Изменение pH теплоносителя допустимо только в реакторах, весь циркуляционный контур которых выполнен из аустенитных сталей. Корпус и компенсатор объема отечественных реакторов ВВЭР выполнены из сталей перлитного класса (22К) и нормами водно-химического режима предусмотрено поддержание pH теплоносителя первого контура в узких пределах.

Задача борьбы с отложениями продуктов коррозии на теплопередающих поверхностях должна решаться путем ликвидации самого источника появления продуктов коррозии в циркуляционном контуре реактора. Это может быть достигнуто за счет снижения скорости коррозии конструкционных материалов до минимума. Кроме того, желательнее воздействовать на процессы смыва-осаждения продуктов коррозии таким образом, чтобы равновесие в этих процессах было смещено в сторону смыва.

Решение поставленной задачи, которое реализовано на блоках АЭС с реактором ВВЭР-440, рассмотрено в следующей главе.