

А. В. Кучин, Ю. Н. Овдиенко,  
В. А. Халимончук

Государственный научно-технический центр  
по ядерной и радиационной безопасности, г. Киев, Украина

## Анализ безопасности РУ с ВВЭР в случае одновременного ввода положительной реактивности за счет извлечения ОР СУЗ и ввода чистого конденсата

Представлены результаты расчетной оценки скорости ввода положительной реактивности при одновременном воздействии на реактивность предусмотренными проектом ВВЭР двумя системами управления реактивностью — извлечением регулирующей группы и уменьшением концентрации борной кислоты. Показано, что максимальная скорость ввода положительной реактивности достигается на минимально контролируемом уровне мощности и значительно ниже граничного значения  $0,07 \beta_{эфф}/с$ , регламентированного нормативным документом Украины «Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций с реакторами с водой под давлением». На основании этого сделан вывод об отсутствии необходимости в увеличении времени действия защиты ПЗ-2 на интервале транспортировки чистого конденсата для полного исключения возможности ввода положительной реактивности одновременно двумя различными способами воздействия на реактивность.

Ключевые слова: ВВЭР, анализ безопасности, реактивность.

О. В. Кучин, Ю. М. Овдієнко, В. А. Халімончук

**Аналіз безпеки РУ з ВВЕР в разі одночасного введення додатної реактивності за рахунок виймання ОР СУЗ та введення чистого конденсату**

Наведено результати розрахункової оцінки швидкості введення додатної реактивності в разі одночасного впливу на реактивність передбаченими проектом ВВЕР двома системами керування реактивністю — вийманням регулюючої групи та зменшенням концентрації борної кислоти. Показано, що максимальна швидкість введення додатної реактивності досягається на мінімально контрольованому рівні потужності й значно нижча за граничне значення  $0,07 \beta_{эфф}/с$ , регламентоване нормативним документом України «Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском». Зроблено висновок про відсутність необхідності у збільшенні часу дії захисту ПЗ-2 на інтервалі транспортування чистого конденсату для повного виключення можливості введення додатної реактивності одночасно двома різними засобами впливу на реактивність.

Ключові слова: ВВЕР, аналіз безпеки, реактивність.

© А. В. Кучин, Ю. Н. Овдиенко, В. А. Халимончук, 2011

В соответствии с нормативным документом Украины «Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций с реакторами с водой под давлением» [1] техническими средствами не допускается введение положительной реактивности одновременно двумя или более средствами влияния на реактивность. Для реализации этого требования на АЭС Украины с реакторами ВВЭР была осуществлена предупредительная защита (ПЗ-2) по факту открытия арматуры на линии подпитки-продувки, запрещающая извлечение регулирующей группы ОР СУЗ при подаче чистого конденсата в активную зону реактора. Данное мероприятие действительно исключает одновременное выполнение оперативным персоналом операций по вводу положительной реактивности двумя или более средствами воздействия на реактивность. Однако сама возможность ввода положительной реактивности одновременно двумя различными способами воздействия на реактивность после реализации этого мероприятия сохраняется, так как по факту закрытия арматуры на линии подпитки-продувки действие защиты ПЗ-2 прекращается, а транспортировка чистого конденсата в активную зону продолжается. Время транспортировки может составлять до 15 мин в зависимости от расхода теплоносителя на линии подпитки-продувки. Поэтому в течение этого промежутка времени вследствие регулировки поля энерговыделения в реакторе с целью компенсации эффектов отравления и выгорания топлива возможна ситуация, когда в активную зону реактора может вноситься положительная реактивность за счет одновременного поступления чистого конденсата и извлечения регулирующей группы ОР СУЗ. Следует отметить, что увеличение времени действия защиты ПЗ-2 на интервал транспортировки чистого конденсата в активную зону (около 15 мин) приведет к трудностям при управлении полем энерговыделения в активной зоне реактора, особенно в состояниях активной зоны реактора в конце работы топливных загрузок, когда требуется выполнять большой объем водообмена.

В то же время в соответствии с [1] скорость увеличения положительной реактивности средствами влияния на реактивность не должна превышать  $0,07 \beta_{эфф}/с$ . Каждая из двух систем регулирования реактивностью в реакторах ВВЭР в отдельности удовлетворяет данному требованию. Выполняется ли это требование и в ситуации одновременного ввода положительной реактивности двумя независимыми способами, которая все же может иметь место после модернизации ПЗ-2 на интервале времени транспортировки чистого конденсата, является предметом данного исследования. Положительные результаты такого расчетного анализа можно рассматривать в качестве обоснования отсутствия необходимости разработки достаточно сложного алгоритма увеличения времени действия защиты ПЗ-2 на интервале транспортировки чистого конденсата.

### 1. АНАЛИЗ СКОРОСТИ ВВОДА ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ РЕАКТИВНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОПЛИВНЫХ ЗАГРУЗОК РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000

#### 1.1. Нейтронно-физические характеристики стационарной топливной загрузки ВВЭР-1000

Для исследования была выбрана проектная стационарная топливная загрузка энергоблока № 2 Хмельницкой АЭС, состоящая из топлива ТВСА. В табл. 1 приведены основные типы ТВСА, используемые в этой загрузке.

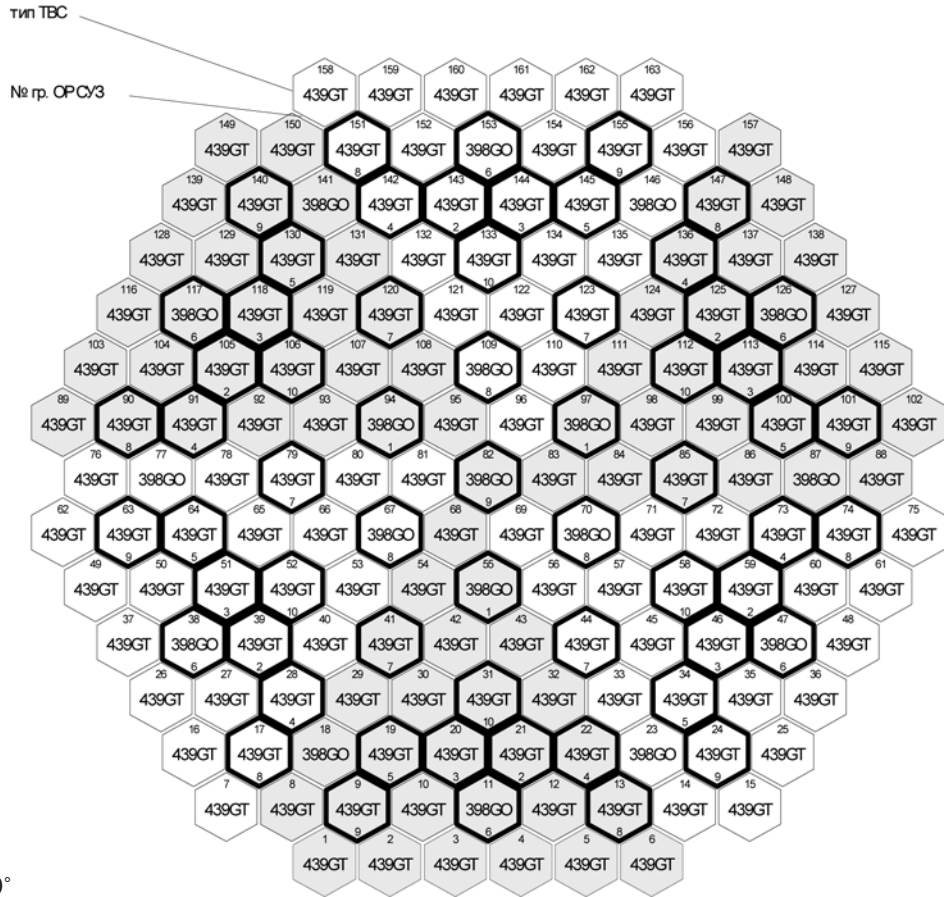


Рис. 1. Картограмма стационарной загрузки для сектора симметрии 360°

Схема расположения органов регулирования в активной зоне реактора и их разбивка на группы приведена на рис. 1.

Распределение глубины выгорания топлива в объеме активной зоны на начало и конец работы стационарной топливной загрузки получено расчетным моделированием,

начиная с первой кампании до выхода в проектный стационарный топливный цикл. Для проведения расчетов использовалась программа DYN3D [2, 3].

Нейтронно-физические характеристики (НФХ) активной зоны реактора для различных моментов кампании и уровней мощности реактора приведены в табл. 2.

Таблица 1. Описание типов ТВСА, используемых при формировании проектной топливной загрузки

Тип ТВСА	Среднее обогащение по <sup>235</sup> U, вес. %	Характеристика твэлов		Характеристика твэгов		
		Количество, шт.	Обогащение по <sup>235</sup> U, вес. %	Содержание Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , вес. %	Обогащение по <sup>235</sup> U, вес. %	Количество, шт.
398GO	3,98	306	4,00	5,0	3,30	6
439GT	4,39	306	4,40	5,0	3,60	6

Таблица 2. Нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора ВВЭР-1000 при эксплуатации стационарной топливной загрузки

Состояние активной зоны		C <sub>в</sub>	α <sub>Сб</sub> · 10 <sup>2</sup>	α <sub>Тг</sub> · 10 <sup>5</sup>	α <sub>Рм</sub> · 10 <sup>2</sup>	α <sub>Тм</sub> · 10 <sup>5</sup>	Δρ <sub>ОР</sub>
Начало кампании	МКУ	10,08	-1,26	-3,61	5,6	-10,1	0,761
	100 % N <sub>НОМ</sub>	6,23	-1,21	-2,72	14,4	-33,4	0,807
Середина кампании	МКУ	7,02	-1,34	-3,73	12,2	-20,3	0,741
	100 % N <sub>НОМ</sub>	2,98	-1,30	-2,81	21,8	-48,4	0,798
Конец кампании	МКУ	4,22	-1,43	-3,79	18,7	-30,5	0,696
	100 % N <sub>НОМ</sub>	0,02	-1,40	-2,87	29,2	-63,4	0,793

Примечание. C<sub>в</sub> — критическая концентрация борной кислоты, г/кг; α<sub>Сб</sub> — коэффициент реактивности по концентрации борной кислоты, 1/(г/кг); α<sub>Тг</sub> — коэффициент реактивности по температуре топлива, 1/°C; α<sub>Рм</sub> — коэффициент реактивности по плотности теплоносителя, 1/(г/см<sup>3</sup>); α<sub>Тм</sub> — коэффициент реактивности по температуре топлива, 1/°C; Δρ<sub>ОР</sub> — интегральная эффективность регулирующей группы, %.

Расчет характеристик, приведенных в табл. 2 для состояний активной зоны на номинальном уровне мощности, выполнялся при условии стационарного отравления  $\text{Xe}^{135}$  и  $\text{Sm}^{149}$  для номинального уровня мощности реактора. При расчете характеристик РУ на МКУ концентрация  $\text{Xe}^{135}$  равнялась нулю (отравление отсутствует), а концентрация  $\text{Sm}^{149}$  соответствует стационарному отравлению на номинальном уровне мощности для соответствующего момента кампании.

### 1.2. Оценка максимальной скорости ввода положительной реактивности за счет извлечения регулирующей группы ОР СУЗ ВВЭР-1000

Анализ скорости ввода положительной реактивности только за счет извлечения регулирующей группы ОР СУЗ выполнялся для трех моментов кампании: начала, середины и конца работы топливной загрузки. В расчетах использовалась стационарная версия программы DYN3D. Для каждого момента кампании рассматривались состояния активной зоны реактора, соответствующие минимально контролируемому (МКУ) и номинальному уровням мощности.

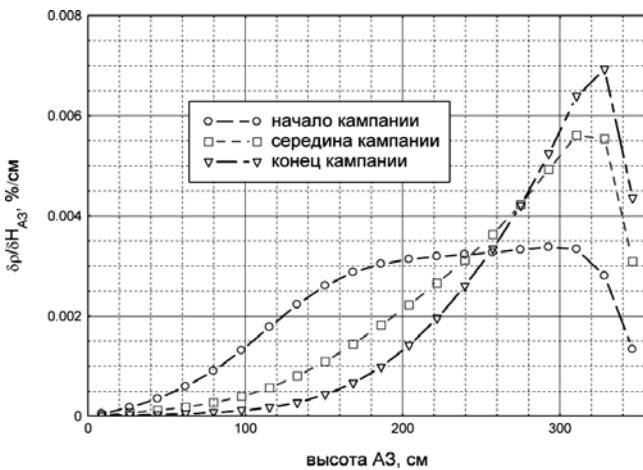


Рис. 2. Дифференциальная эффективность рабочей группы для состояний активной зоны на МКУ

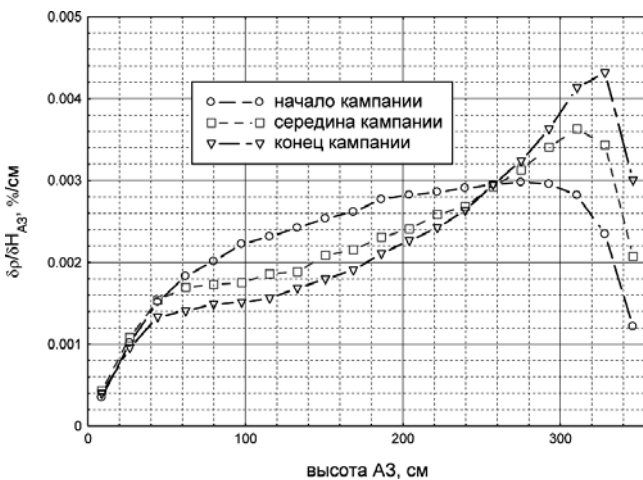


Рис. 3. Дифференциальная эффективность рабочей группы для состояний активной зоны на номинальном уровне мощности

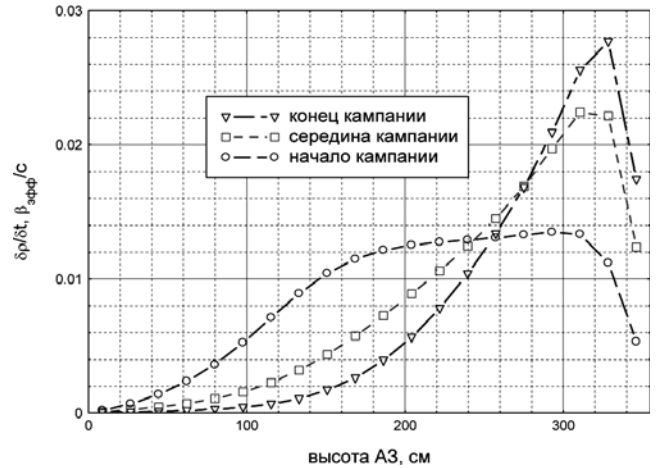


Рис. 4. Скорость введения положительной реактивности при извлечении рабочей группы для состояний активной зоны на МКУ

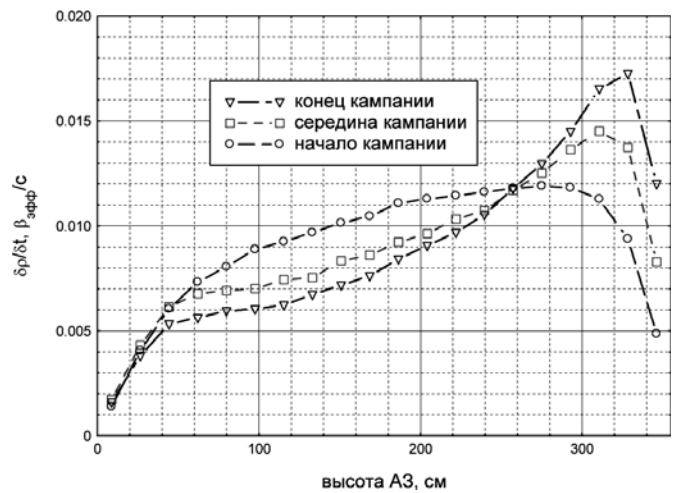


Рис. 5. Скорость введения положительной реактивности при извлечении рабочей группы для состояний активной зоны на номинальном уровне мощности

На рис. 2 и 3 приведены расчетные зависимости дифференциальной эффективности рабочей группы для состояний активной зоны на МКУ и номинальном уровне мощности для начала, середины и конца кампании. Данные расчеты выполнялись на основании расчетов стационарных состояний активной зоны реактора для различных положений регулирующей группы по высоте активной зоны при условии фиксации концентраций ядер  $\text{Xe}^{135}$  и  $\text{Sm}^{149}$ , соответствующих исходному положению регулирующей группы (РГ), т. е. в расчетах принималось, что при перемещении РГ концентрации ядер  $\text{Xe}^{135}$  и  $\text{Sm}^{149}$  не изменяются, а пространственное перераспределение теплофизических параметров за счет изменения положения ОР СУЗ учитывалось.

Полученные же на основании данных рис. 2 и 3 зависимости скорости введения положительной реактивности при извлечении рабочей группы со скоростью 2 см/с приведены на рис. 4 и 5. Здесь и далее во всех расчетах, относящихся к ВВЭР-1000, значения реактивности нормированы на консервативное значение эффективной доли запаздывающих нейтронов, равное 0,005.

Как следует из данных рис. 4 и 5, максимальная скорость введения реактивности за счет извлечения ОР СУЗ достигается в моменты времени, когда ОР СУЗ рабочей группы проходят зоны с наибольшей эффективностью.

### 1.3. Оценка максимальной скорости ввода положительной реактивности за счет поступления чистого конденсата в активную зону ВВЭР-1000

Изменение концентрации борной кислоты в первом контуре выполняется системой борного регулирования через систему подпитки-продувки первого контура. Уменьшение концентрации борной кислоты осуществляется за счет подачи чистого конденсата на линии подпитки-продувки открытием соответствующей арматуры. Максимальный расход теплоносителя (60 т/ч) на линии подпитки-продувки определяется производительностью насосов и пропускной способностью регулирующего клапана [4].

Скорость изменения концентрации борной кислоты в первом контуре за счет поступления чистого конденсата ( $dC_b/dt$ ) и расход чистого конденсата, подаваемого в первый контур по линии подпитки-продувки, связаны дифференциальным уравнением

$$\frac{dC_b}{dt} = -\frac{q}{M} C_b, \quad (1)$$

где  $q$  — расход чистого конденсата;  $M$  — масса теплоносителя в первом контуре.

Решение этого уравнения можно записать в следующем виде:

$$C_b(t) = C_b(\text{нач}) \cdot \exp\left(-\frac{q}{M} t\right). \quad (2)$$

Данное соотношение определяет изменение концентрации борной кислоты в зависимости от времени, начиная от  $C_b(\text{нач})$ .

Исходя из уравнения (1) максимальная скорость уменьшения концентрации борной кислоты и, следовательно, максимальная скорость ввода положительной реактивности за счет разбавления чистой водой от системы подпитки-продувки будет реализована при следующих условиях:

максимальной подпитке чистого конденсата — 60 т/ч; минимальной массе теплоносителя в первом контуре; максимальной начальной концентрации борной кислоты в первом контуре.

При рассмотрении коротких нестационарных процессов, в которых не обеспечивается выравнивание концентрации борной кислоты во всем объеме первого контура, следует учитывать массу теплоносителя без массы в компенсаторе давления, деаэраторе, вспомогательных трубопроводах и т. д. В этом случае минимальная масса теплоносителя составляет около 200 т [4].

В табл. 3 приведены расчетные значения средней скорости ввода положительной реактивности на интервале времени 50 с (изменяется очень незначительно) за счет введения в активную зону реактора ВВЭР-1000 чистого

дистиллята  $\frac{d\rho}{dt} = -\frac{q}{M} \cdot C_b(\text{нач}) \cdot \exp\left(-\frac{q}{M} t\right) \cdot \alpha_{C_B}$  для трех

моментов кампании при работе реактора на МКУ и номинальном уровне мощности. При этом для расчета реактивности за счет разбавления бора для всех состояний реактора консервативно использовалось значение коэф-

фициента реактивности по концентрации борной кислоты  $\alpha_{C_B} = -0,015$  1/(г/кг). Исходные значения критической концентрации борной кислоты для различных состояний реактора приведены в табл. 2. Расход теплоносителя на линии подпитки и масса теплоносителя в первом контуре, которые использовались в оценках, приведен выше. Из представленных в табл. 3 данных видно, что максимальная скорость введения положительной реактивности за счет разбавления концентрации борной кислоты наблюдается в начале кампании на МКУ мощности, а минимальная — на номинальном уровне мощности в конце кампании. При этом максимальная скорость введения реактивности за счет извлечения РГ ОР СУЗ на порядок выше скорости ввода положительной реактивности за счет введения в активную зону чистого дистиллята.

Таблица 3. Скорость ввода положительной реактивности за счет введения в активную зону реактора ВВЭР-1000 чистого дистиллята

Исходный уровень мощности реактора	Скорость ввода положительной реактивности, $\beta_{\text{эфф}}/с$		
	Начало кампании	Середина кампании	Конец кампании
МКУ	0,00255	0,0018	0,0011
100 % $N_{\text{НОМ}}$	0,0016	0,0008	$5,7 \cdot 10^{-5}$

На основе данных, приведенных здесь и представленных в п. 1.2, можно сказать, что максимальная скорость введения реактивности за счет одновременного извлечения ОР СУЗ и ввода чистого конденсата будет достигаться, очевидно, тогда, когда ОР СУЗ рабочей группы проходят зоны с наибольшей эффективностью.

### 1.4. Оценка максимальной скорости ввода положительной реактивности за счет одновременного извлечения рабочей группы ОР СУЗ и уменьшения концентрации борной кислоты в ВВЭР-1000

**Начало кампании.** Для анализа максимальной скорости ввода положительной реактивности за счет одновременного извлечения рабочей группы ОР СУЗ и разбавления концентрации борной кислоты использовался динамический блок программы DYN3D [2, 3]. В расчетах рассматривались реальные состояния активной зоны реактора. Использовалась полномасштабная модель активной зоны в 360° симметрии с аксиальным разбиением на 20 равномерных слоев. Предполагалось, что регулирующая группа извлекается из активной зоны с рабочей скоростью 2 см/с и одновременно уменьшается концентрация борной кислоты за счет ввода чистого конденсата в соответствии с уравнением (2). Во всех состояниях активной зоны в работе находятся 4 ГЦН. Рассматривалось извлечение регулирующей группы начиная с крайнего нижнего регламентного положения.

В начале работы топливной загрузки рассмотрены состояния активной зоны на следующих уровнях мощности: МКУ, 25 %  $N_{\text{НОМ}}$ , 50 %  $N_{\text{НОМ}}$ , 75 %  $N_{\text{НОМ}}$ , 100 %  $N_{\text{НОМ}}$ . Для состояния на МКУ выбирался исходный уровень мощности реактора 0,01 МВт или  $3,3 \cdot 10^{-4}$  %  $N_{\text{НОМ}}$ . Извлечение РГ из активной зоны и уменьшение концентрации борной кислоты приводит к росту нейтронной и тепловой мощности реактора. Увеличение нейтронной мощности сверх уставки срабатывания защиты ПЗ-2 должно приводить к выработке

сигнала запрета на извлечение ОР СУЗ из активной зоны. Чтобы рассмотреть более продолжительный интервал времени извлечения РГ для определения максимальной скорости ввода положительной реактивности, в данных расчетах срабатывание защиты ПЗ-2 не рассматривалось.

*Минимально контролируемый уровень мощности.* На рис. 6—8 приведены результаты расчетов изменения реактивности и скорости ввода реактивности, нейтронной и тепловой мощности реактора в переходном процессе, связанном с одновременным вводом реактивности за счет извлечения ОР СУЗ из трех различных исходных положений (71 см, 200 см и 284 см, которые охватывают допустимый диапазон положения на МКУ) и подачи чистого конденсата на МКУ мощности. Анализ результатов расчета показы-

вает, что максимальная скорость внесения положительной реактивности достигается, как и предполагалось в п. 1.3, в момент прохождения регулирующей группой аксиальной зоны с максимальной эффективностью. Поэтому в дальнейших расчетах для состояний реактора на МКУ нет необходимости оценивать максимальную скорость внесения реактивности для различных исходных положений РГ: достаточно исходное положение РГ выбрать из допустимого диапазона в районе максимальной ее эффективности.

Как показывают результаты расчетов, максимальная скорость внесения положительной реактивности составляет приблизительно  $0,015 \beta_{эфф}/с$  (рис. 7). После 40-й секунды переходного процесса начинается существенное увеличение нейтронной и тепловой мощности реактора (рис. 8), что приводит к росту температуры топлива

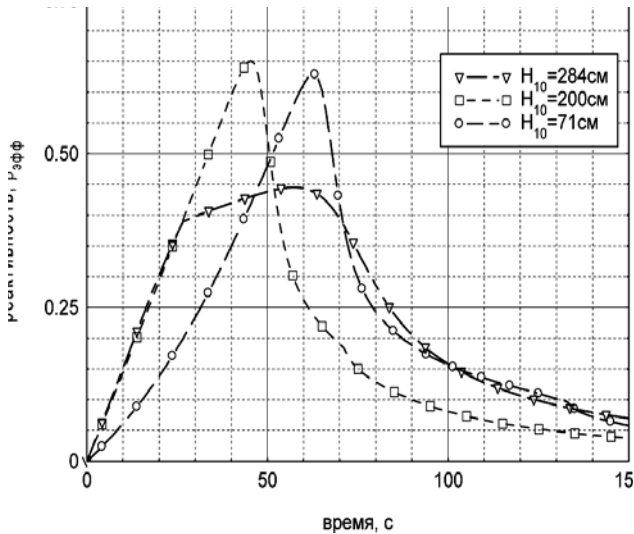


Рис. 6. Изменение реактивности при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты для состояний активной зоны на МКУ (начало кампании)

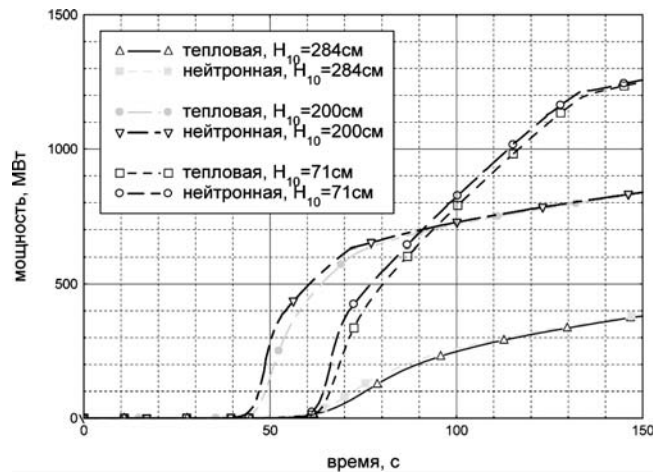


Рис. 8. Изменение нейтронной и тепловой мощности реактора при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты для состояний активной зоны на МКУ (начало кампании)

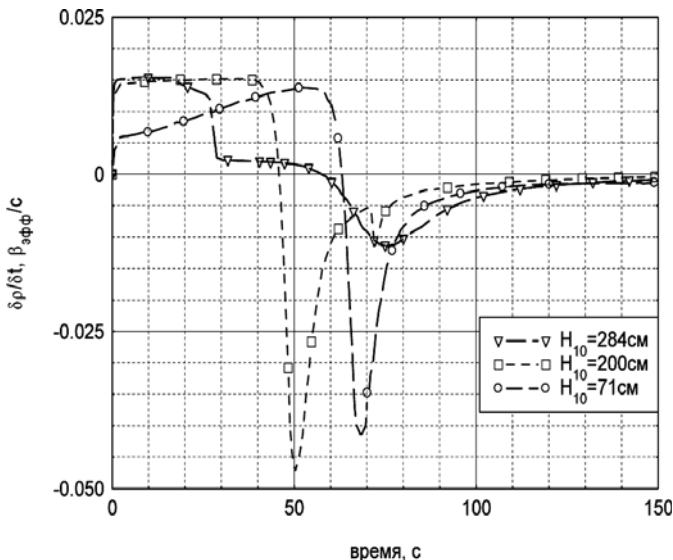


Рис. 7. Изменение скорости введения положительной реактивности при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты для состояний активной зоны на МКУ (начало кампании)

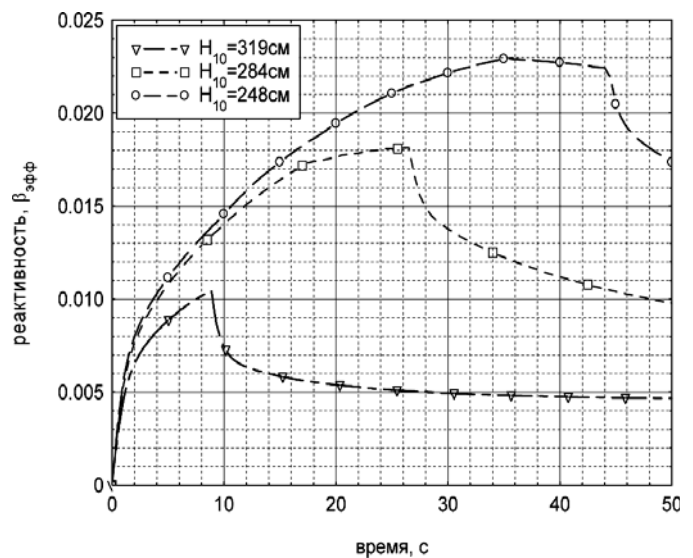


Рис. 9. Изменение реактивности при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты для состояний активной зоны на номинальном уровне (начало кампании)

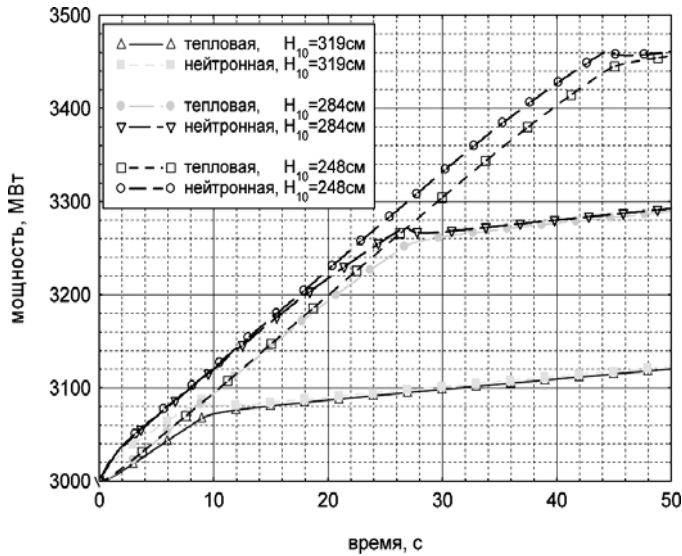


Рис. 10. Изменение нейтронной и тепловой мощности реактора при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты для состояний активной зоны на номинальном уровне мощности (начало кампании)

и теплоносителя. В результате действия обратных связей введенная положительная реактивность начинает уменьшаться, вследствие чего скорость изменения реактивности становится отрицательной.

**Номинальный уровень мощности.** Так как на номинальном уровне мощности регламентный диапазон перемещения РГ составляет 70–95 %, в качестве исходных глубин погружения РГ были выбраны 248 см, 284 см и 319 см. Результаты расчетов приведены на рис. 9–11. В состоянии на номинальном уровне мощности величина внесенной реактивности получается существенно меньше, чем в состоянии на МКУ, —  $0,023 \beta_{эфф}$  и  $0,65 \beta_{эфф}$  соответственно

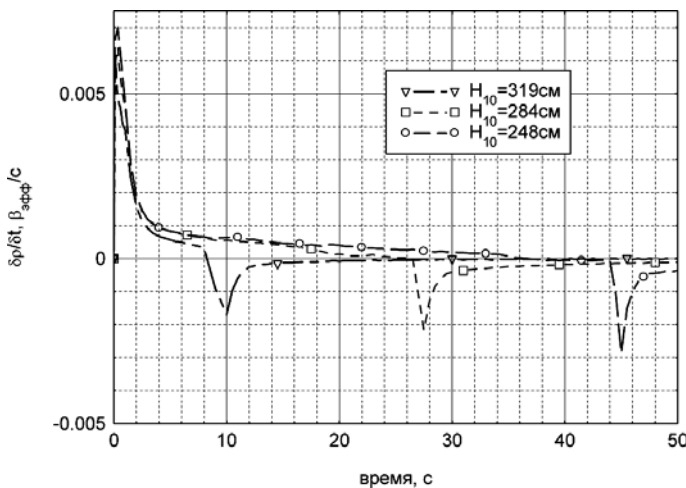


Рис. 11. Изменение скорости введения положительной реактивности при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты для состояний активной зоны на номинальном уровне мощности (начало кампании)

(см. рис. 6 и 9). Это объясняется тем, что на номинальном уровне мощности действие обратных связей начинается существенно раньше (практически с момента движения РГ), что приводит к снижению роста положительной реактивности и, в свою очередь, к тому, что скорость введения положительной реактивности на номинальном уровне мощности также меньше, чем на МКУ.

Из рис. 11 видно, что максимальная скорость ввода положительной реактивности наблюдается в расчете с исходным положением РГ 248 см, находящимся в области максимального значения дифференциальной эффективности на ее восходящей ветви (рис. 3) и достигает значения  $0,007 \beta_{эфф}/с$  в начале переходного процесса.

На рис. 12 приведены составляющие реактивности в течение переходного процесса при извлечении РГ из положения 248 см. Данные величины рассчитаны программой DYN3D на основе теории возмущений. Из показанных кривых следует, что вносимая положительная реактивность за счет извлечения РГ значительно превышает реактивность от уменьшения концентрации борной кислоты. Компенсация введенной положительной реактивности происходит в большей степени за счет увеличения температуры топлива и в меньшей — за счет увеличения температуры замедлителя (см. рис. 12). Результирующее значение реактивности получается существенно меньше, чем составляющие реактивности от одновременного извлечения РГ и уменьшения концентрации борной кислоты.

**Уровни мощности 75, 50 и 25 %  $N_{ном}$ .** Аналогичные результаты расчетной оценки максимальной скорости ввода положительной реактивности при работе реактора на уровнях мощности 75, 50 и 25 % при эксплуатации реактора в начале кампании представлены в табл. 4. Во всех вариантах рассматривались три исходных положения РГ, соответствующих регламентной области в зависимости от исследуемого уровня мощности.

В состояниях активной зоны реактора на уровнях мощности 25, 50 и 75 %  $N_{ном}$  максимальная скорость роста реактивности достигается в начале переходного процесса с момента начала движения РГ. По мере увеличения

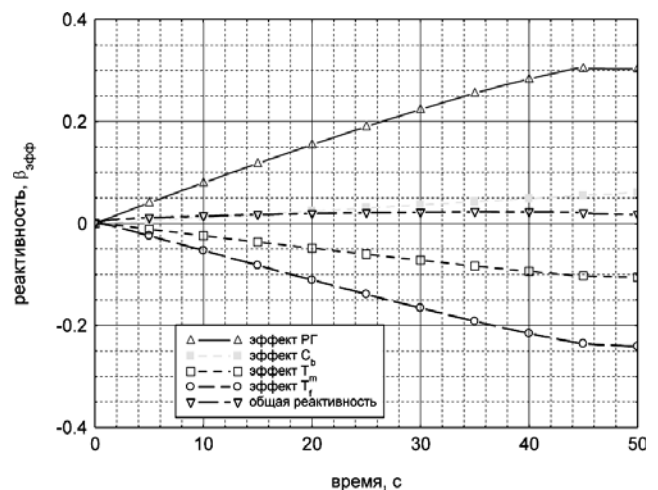


Рис. 12. Изменение составляющих реактивности при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты для состояния активной зоны на номинальном уровне мощности при исходном положении РГ 248 см (начало кампании)

Таблица 4. Результаты расчетов на уровнях мощности 75, 50 и 25 %  $N_{ном}$  (начало кампании)

Уровень мощности реактора, %	Положение ОР рабочей группы, см	Максимальная скорость ввода положительной реактивности, $\beta_{эфф}/с$	Время достижения максимальной скорости ввода реактивности, с
75	248	0,0085	0,2
	284	0,0088	0,2
	319	0,0080	0,2
50	248	0,0094	0,2
	284	0,0099	0,2
	319	0,0094	0,2
25	160	0,0106	0,2
	284	0,0110	0,2
	319	0,0108	0,2

нейтронной и тепловой мощности реактора действие обратных связей ограничивает рост реактивности, в результате чего скорость роста реактивности уменьшается. Во всех трех вариантах расчета максимальная скорость роста реактивности наблюдается в состоянии активной зоны с исходным положением регулирующей группы 284 см.

**Конец кампании.** Следующее состояние реактора, для которого выполнялись расчеты по оценке максимальной скорости введения реактивности, — состояние активной зоны на конец работы топливной загрузки. В этом состоянии дифференциальная эффективность регулирующей группы в верхней части активной зоны получается приблизительно в 2 раза больше, чем для начала кампании (см. рис. 2 и 3). При этом скорость ввода положительной реактивности за счет введения в активную зону чистого дистиллята снижается вследствие меньшей концентрации борной кислоты в конце кампании [см. уравнение (2)].

**Минимально контролируемый уровень мощности.** На рис. 13 и 14 показано изменение реактивности и скорости введения положительной реактивности при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты для состояний активной зоны реактора на МКУ. При этом рассматривались исходные положения РГ 284 и 319 см, поскольку такие глубины погружения охватывают зону с максимальной дифференциальной эффективностью группы. Извлечение регулирующей группы рассматривалось до верхнего значения из допустимого диапазона перемещения РГ 95 % (337 см). Для варианта с исходным положением РГ в начале переходного процесса 319 см скорость роста реактивности выше, чем в варианте с исходным положением РГ 284 см, а максимальное значение достигается на момент остановки группы.

Для варианта с исходным положением РГ 284 см максимальная скорость роста реактивности достигается приблизительно на 28-й секунде переходного процесса и ограничивается действием обратных связей вследствие увеличения температуры топлива и теплоносителя. Результаты расчетов показали, что максимальная внесенная реактивность составляет  $0,69 \beta_{эфф}$  (рис. 13), а максимальная скорость увеличения реактивности в обоих вариантах —  $0,0295 \beta_{эфф}/с$  (рис. 14).

На рис. 15 приведено изменение составляющих реактивности при одновременном извлечении рабочей группы

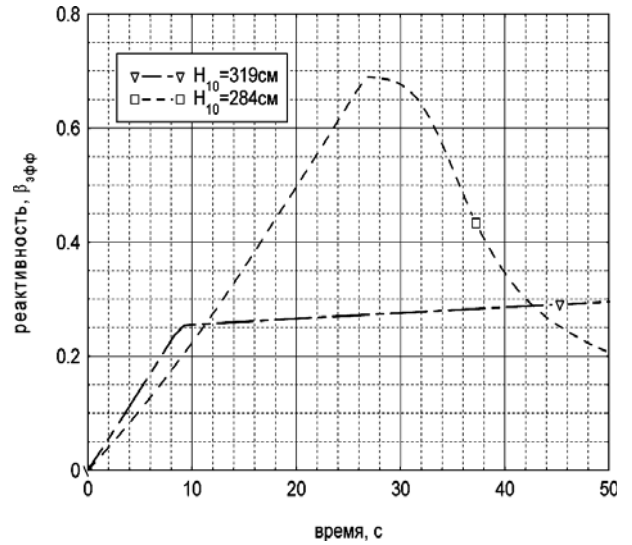


Рис. 13. Изменение реактивности при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты для состояний активной зоны на МКУ (конец кампании)

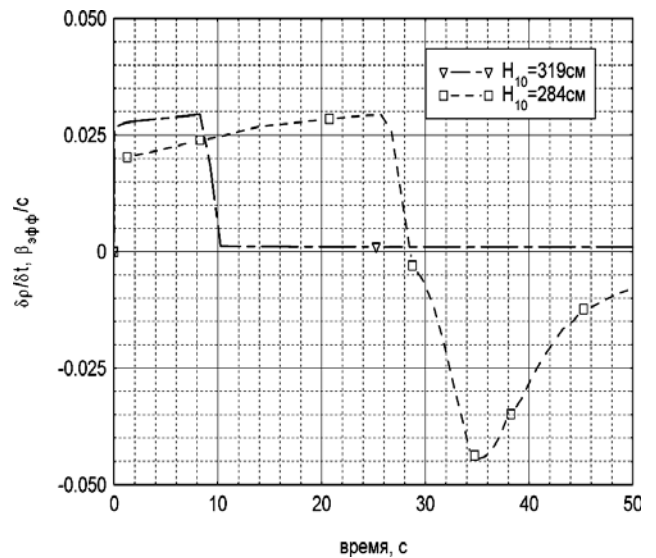


Рис. 14. Изменение скорости введения положительной реактивности при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты для состояний активной зоны на МКУ (конец кампании)

и уменьшении концентрации борной кислоты для состояния активной зоны на МКУ при исходном положении РГ 284 см. Из рисунка видно, что основное увеличение реактивности происходит за счет извлечения рабочей группы. После 28-й секунды начинают действовать обратные связи по температуре топлива и теплоносителя. Вклад в реактивность от уменьшения концентрации борной кислоты очень слабый.

**Номинальный уровень мощности и 50 % номинального.** Расчеты выполнялись для исходных положений регулирующей группы 284 и 319 см.

В состоянии на номинальном уровне мощности максимальная внесенная реактивность составила  $0,020 \beta_{эфф}$

Таблица 5. Максимальная скорость ввода положительной реактивности для различных состояний активной зоны реактора ВВЭР-1000

Исходный уровень мощности реактора	Скорость ввода положительной реактивности, $\beta_{эфф}/с$		
	Начало кампании	Середина кампании	Конец кампании
МКУ	0,015	0,0255	0,030
25 % $N_{НОМ}$	0,010	—	—
50 % $N_{НОМ}$	0,0099	0,0132	0,0153
75 % $N_{НОМ}$	0,0088	—	—
100 % $N_{НОМ}$	0,0070	0,0079	0,0091

и была достигнута в варианте с исходным положением ОР СУЗ в 284 см. Это значение вследствие действия обратных связей существенно меньше, чем для состояния на МКУ ( $0,69 \beta_{эфф}$ ). Максимальная же скорость ввода положительной реактивности наблюдалась в расчете с исходным положением РГ 319 см и составила  $0,0091 \beta_{эфф}/с$  в начале переходного процесса.

При работе реактора на уровне мощности 50 %  $N_{НОМ}$  максимальная внесенная реактивность составила  $0,045 \beta_{эфф}$ , а максимальная скорость увеличения реактивности —  $0,0109 \beta_{эфф}/с$  и  $0,0153 \beta_{эфф}/с$  соответственно для вариантов с исходными положениями РГ 284 и 319 см.

**Середина топливной кампании.** Нейтронно-физические характеристики (НФХ) для состояния активной зоны в середине работы топливной загрузки охватываются для начала и конца работы топливной загрузки. Максимальные значения дифференциальной эффективности РГ и скорости ввода концентрации борной кислоты также находятся между соответствующими значениями для начала и конца работы топливной загрузки (см. рис. 2—5). Поэтому следует ожидать, что и скорость введения положительной реактивности при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты будет находиться между

значениями для начала и конца кампании. В данных расчетах рассматривалось извлечение регулирующей группы от исходного положения 284 и 319 см (так как эти глубины погружения охватывают зону с максимальной дифференциальной эффективностью группы) до верхнего значения из допустимого диапазона перемещения РГ 95 % (337 см).

Результаты этих расчетов в табл.5 сравниваются с результатами расчетов для двух предыдущих моментов кампании (на начало и конец).

Наибольшая скорость ввода положительной реактивности наблюдается в конце кампании при работе реактора на МКУ и составляет  $0,03 \beta_{эфф}/с$ . Данное значение скорости изменения реактивности в основном определяется извлечением регулирующей группы (см. рис. 15). В начале и середине топливной кампании при работе реактора на МКУ скорость увеличения реактивности меньше, чем в конце кампании.

При увеличении исходного уровня мощности реактора обратные связи ограничивают рост реактивности, что приводит к уменьшению скорости ввода положительной реактивности для всех моментов кампании. Минимальные значения ввода положительной реактивности наблюдаются на номинальном уровне мощности и изменяются от  $0,0070 \beta_{эфф}/с$  в начале кампании до  $0,0091 \beta_{эфф}/с$  в конце кампании.

## 2. АНАЛИЗ СКОРОСТИ ВВОДА ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ РЕАКТИВНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОПЛИВНЫХ ЗАГРУЗОК РЕАКТОРОВ ВВЭР-440

### 2.1. Нейтронно-физические характеристики стационарной топливной загрузки ВВЭР-440

Для выполнения данных исследований была выбрана проектная стационарная топливная загрузка энергоблока № 2 Ровенской АЭС, которая реализуется после перевода реактора на топливо второго поколения.

Распределение глубины выгорания топлива в объеме активной зоны стационарной топливной загрузки получено, как и для реактора ВВЭР-1000 (см. 1), математическим моделированием нескольких кампаний. Анализ скорости ввода положительной реактивности выполнялся для трех моментов кампании: начала, середины и конца работы топливной загрузки. Для каждого момента рассматривались состояния активной зоны реактора, соответствующие различным уровням мощности реактора, начиная от МКУ и заканчивая номинальным.

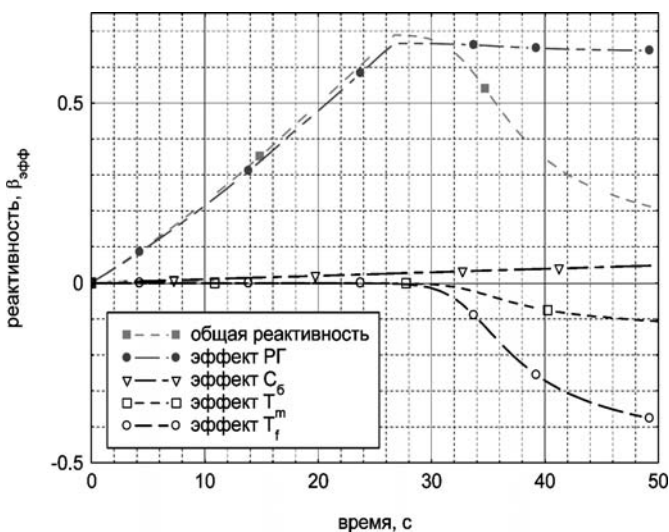


Рис. 15. Изменение составляющих реактивности при одновременном извлечении рабочей группы и уменьшении концентрации борной кислоты для состояния активной зоны на МКУ при исходном положении РГ 284 см (конец кампании)



Таблица 6. Нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора ВВЭР-440 при эксплуатации стационарной топливной загрузки

Состояние активной зоны		$C_B$ , г/кг	$\alpha_{C_B} \cdot 10^2$ , 1/(г/кг)	$\alpha_{T1} \cdot 10^5$ , 1/°C	$\alpha_{Rm} \cdot 10^2$ , 1/(г/см <sup>3</sup> )	$\alpha_{Tm} \cdot 10^5$ , 1/°C	$\Delta\rho_{OP}$ , %	$\beta_{эфф}$
Начало кампании	МКУ	8,41	-1,14	-3,85	11,57	-17,88	2,17	0,0063
	100 % $N_{НОМ}$	4,52	-1,11	-3,06	19,21	-35,38	2,24	
Середина кампании	МКУ	6,48	-1,19	-3,94	16,22	-24,27	1,93	0,0060
	100 % $N_{НОМ}$	2,53	-1,17	-3,17	24,26	-43,56	2,06	
Конец кампании	МКУ	4,17	-1,25	-4,01	21,31	-31,28	1,85	0,0057
	100 % $N_{НОМ}$	0,17	-1,23	-3,28	29,67	-52,37	2,00	

НФХ активной зоны реактора ВВЭР-440 для различных моментов кампании и уровней мощности реактора приведены в табл. 6.

### 2.2. Оценка максимальной скорости ввода положительной реактивности за счет извлечения регулирующей группы ОР СУЗ ВВЭР-440

В качестве особенности данных исследований следует отметить, что реактор ВВЭР-440 в отличие от ВВЭР-1000 имеет другую конструкцию ОР СУЗ рабочей группы, обладающую значительно большей эффективностью.

Зависимости дифференциальной эффективности рабочей группы для состояний активной зоны на МКУ и номинальном уровне мощности для начала, середины и конца кампании приведены на рис. 16 и 17. Расчеты выполнялись аналогично представленным в п. 1.

На рис. 18 и 19 приведены зависимости скорости введения положительной реактивности при извлечении рабочей группы для состояний активной зоны на номинальном уровне мощности и МКУ для начала, середины и конца кампании. В расчетах этих зависимостей использованы приведенные в табл. 6 эффективные доли запаздывающих

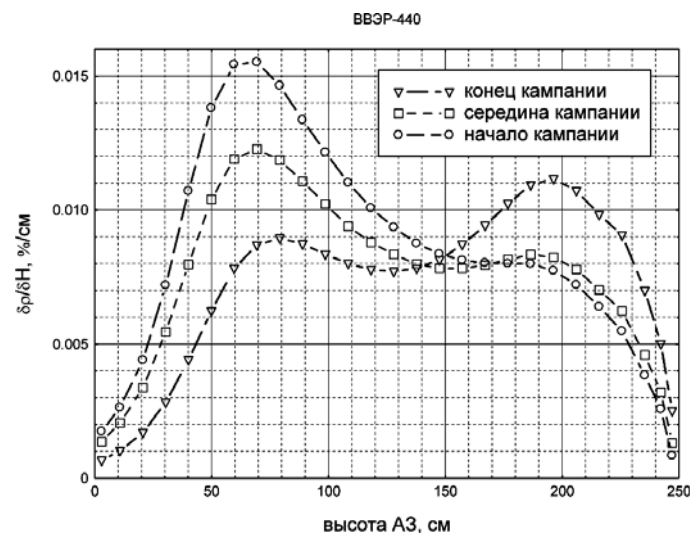


Рис. 16. Дифференциальная эффективность рабочей группы для состояний активной зоны на МКУ в начале, середине и конце кампании

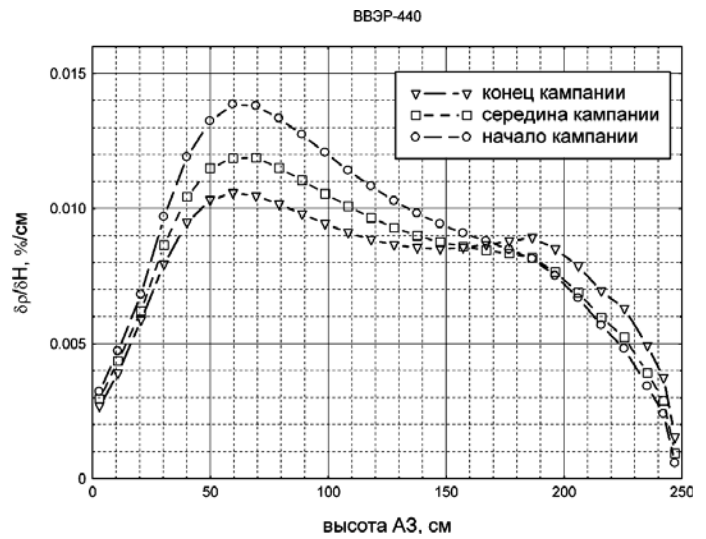


Рис. 17. Дифференциальная эффективность рабочей группы для состояний активной зоны на номинальном уровне мощности для начала, середины и конца кампании

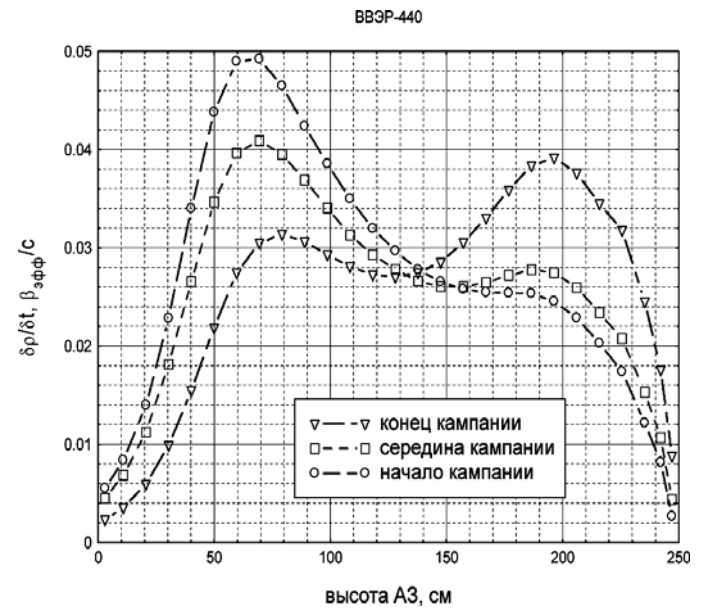


Рис. 18. Скорость введения положительной реактивности при извлечении рабочей группы для состояний активной зоны на МКУ для начала, середины и конца кампании

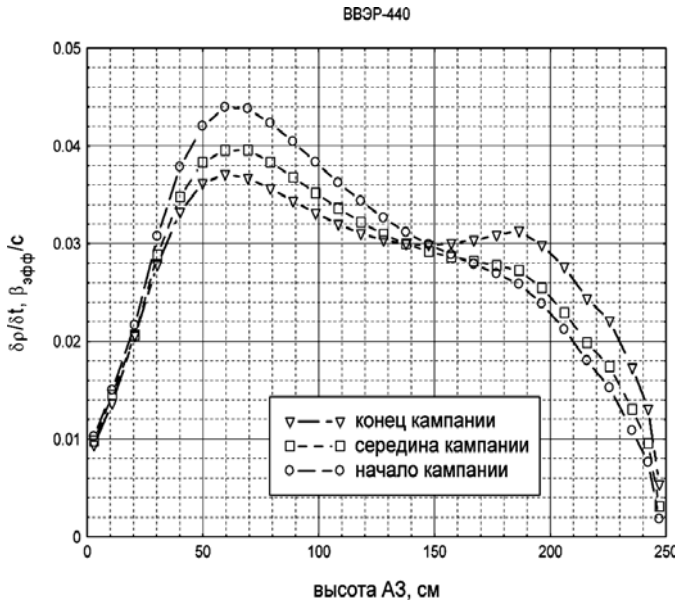


Рис. 19. Скорость введения положительной реактивности при извлечении рабочей группы для состояний активной зоны на номинальном уровне мощности для начала, середины и конца кампании

нейтронов для начала, середины и конца кампании проектного топливного цикла.

При моделировании нестационарных переходных процессов изменение концентрации борной кислоты за счет ввода чистого дистиллята учитывалось в соответствии с уравнением (2). Исходные значения критической концентрации борной кислоты для различных состояний реактора приведены в табл. 6. Расход теплоносителя на линии подпитки максимальный — 60 т/ч. Для определения массы теплоносителя в первом контуре используется объем первого контура 200 м<sup>3</sup> в соответствии с [5].

**2.3. Оценка максимальной скорости ввода положительной реактивности за счет поступления чистого конденсата в активную зону ВВЭР-440**

В табл. 7 дана скорость ввода положительной реактивности за счет введения в активную зону только чистого дистиллята. Для расчета реактивности за счет разбавления бора для всех состояний реактора консервативно использовалось значение коэффициента реактивности по концентрации борной

кислоты  $\alpha_{Сб} = -0,015$  1/(г/кг), значение эффективной доли запаздывающих нейтронов — из табл. 6. Из приведенных данных видно, что максимальная скорость введения положительной реактивности за счет разбавления концентрации борной кислоты наблюдается в начале кампании на МКУ мощности, а минимальная — на номинальном уровне мощности в конце кампании. При этом максимальная скорость введения реактивности за счет извлечения РГ ОР СУЗ на порядок выше скорости ввода положительной реактивности за счет введения в активную зону чистого дистиллята.

Таблица 7. Скорость ввода положительной реактивности за счет введения в активную зону реактора ВВЭР-440 чистого дистиллята

Исходный уровень мощности реактора	Скорость ввода положительной реактивности, $\beta_{эфф}/с$		
	Начало кампании	Середина кампании	Конец кампании
МКУ	0,0022	0,0018	0,0012
100 % $N_{НОМ}$	0,0012	0,00071	5,7E-05

**2.4. Оценка максимальной скорости ввода положительной реактивности за счет одновременного извлечения рабочей группы ОР СУЗ и разбавления концентрации борной кислоты в ВВЭР-440**

В данных расчетах рассмотрены реальные состояния активной зоны реактора. Использована полномасштабная модель активной зоны в 360° симметрии, в аксиальном направлении активная зона представлялась 27 аксиальными слоями. Основная цель данных расчетов — определение максимальной скорости ввода положительной реактивности  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ . При оценке максимальной скорости ввода положительной реактивности предполагалось, что регулирующая группа извлекается из активной зоны с рабочей скоростью 2 см/с и одновременно уменьшается концентрация борной кислоты за счет ввода чистого конденсата в соответствии с уравнением (2). Во всех состояниях активной зоны в работе находятся 6 ГЦН. В расчетах максимальной скорости ввода положительной реактивности срабатывание защиты АЗ-4 не рассматривалось. Для начала и середины топливной кампании в качестве исходного положения ОР СУЗ ( $H_{РГ}$ ) выбрано крайнее нижнее положение в соответствии с ТРБЭ [6], а для конца кампании — положение РГ, соответствующее максимальной дифференциальной эффективности, как более консервативное. Сводные результаты расчетов представлены в табл. 8.

Таблица 8. Максимальные значения реактивности ( $\rho_{max}$ ) и скорости ввода положительной реактивности  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  для различных состояний активной зоны реактора ВВЭР-440, характеризующихся уровнем мощности и исходной глубиной погружения ОР СУЗ рабочей группы

Исходный уровень мощности реактора	Начало кампании			Середина кампании			Конец кампании		
	$H_{РГ}$ , см	$\rho_{max}, \beta_{эфф}$	$\frac{\partial \rho}{\partial t}, \beta_{эфф}/с$	$H_{РГ}$ , см	$\rho_{max}, \beta_{эфф}$	$\frac{\partial \rho}{\partial t}, \beta_{эфф}/с$	$H_{РГ}$ , см	$\rho_{max}, \beta_{эфф}$	$\frac{\partial \rho}{\partial t}, \beta_{эфф}/с$
МКУ	50	0,82	0,052	50	0,80	0,044	186	0,75	0,037
50 % $N_{НОМ}$	100	0,09	0,048	100	0,094	0,039	186	0,062	0,034
100 % $N_{НОМ}$	125	0,048	0,035	125	0,035	0,033	186	0,027	0,032

Из представленных данных видно, что наибольшая скорость одновременного ввода реактивности двумя независимыми способами на ВВЭР-440 достигается, как и на реакторе ВВЭР-1000, на МКУ, что связано со слабым действием на этом уровне мощности отрицательных обратных связей. Однако для ВВЭР-440 это наблюдается в начале кампании, а для ВВЭР-1000, наоборот, в конце кампании (табл. 5), что, очевидно, определяется отличиями в поведении дифференциальных характеристик ОР СУЗ этих реакторов на МКУ (см. рис. 2 и 16).

## Выводы

В результате выполнения данной работы можно сделать следующие выводы:

1. Для состояний активной зоны реактора ВВЭР-1000 наибольшая скорость ввода положительной реактивности наблюдается в конце кампании при работе реактора на МКУ и составляет  $0,03 \beta_{эфф}/с$ .

2. Для состояний активной зоны реактора ВВЭР-440 наибольшая скорость ввода положительной реактивности наблюдается в начале кампании при работе реактора на МКУ и составляет  $0,052 \beta_{эфф}/с$ .

3. На номинальном и промежуточных уровнях мощности вследствие возросшего действия отрицательных обратных связей из-за увеличения скорости роста температуры топлива и теплоносителя скорость ввода положительной реактивности двумя способами воздействия на реактивность меньше, чем на МКУ. Таким образом, присущее данному типу реактору свойство самозащитности способствует тому, что скорость роста реактивности при работе реактора на мощности снижается.

Следовательно, выполненная модернизация, заключающаяся в запрете на извлечение регулирующей группы ОР СУЗ при подаче чистого конденсата в активную зону, исключает одновременное выполнение оперативным персоналом операций по вводу положительной реактивности двумя средствами воздействия на реактивность. Но поскольку по факту закрытия арматуры на линии подачи чистого конденсата запрет на извлечение регулирующей группы ОР СУЗ снимается, а транспортировка чистого конденсата еще продолжается, некоторое время сохраняется возможность ввода положительной реактивности одновременно двумя различными способами воздействия на реактивность и формально имеет место невыполнение требования документа [1]. Однако эта ситуация безопасна, поскольку в данном случае максимально возможная скорость ввода положительной реактивности, оцененная в консервативном приближении,

значительно ниже граничного значения в  $0,07 \beta_{эфф}/с$ , регламентированного в [1]. Учитывая, что при действии сигнала ПЗ-2 ограничиваются возможности управления полем энерговыделения, можно утверждать, что нет необходимости в увеличении времени действия защиты ПЗ-2 на интервале транспортировки чистого конденсата.

## Список литературы

1. НП 306.2.145–2008. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций с реакторами с водой под давлением.

2. Grundmann, U. DYN3D, Version 3.2, Code for calculation of transient in Light Water Reactors (LWR) with Hexagonal or Quadratic Fuel Elements. Description of Models and Methods. Report FZR-434 / U. Grundmann, U. Rohde, S. Mittag, S. Kliem. — Rossendorf, 2005.

3. Grundmann, U. DYN3D, Version 3.2, Code for Calculations of Transients in Light Water Reactors (LWR) with Hexagonal or Quadratic Fuel Elements. Code Manual and Input Data Description / U. Grundmann, U. Rohde, S. Mittag. — 3-rd Edition. — Research Center Rossendorf, October 2004.

4. Проведение нейтронно-физических расчетов в обоснование испытаний работы блока в суточном графике нагрузки на Хмельницкой АЭС: Отчет ФГУ РНЦ КИ, инв. № 32/1–57–405 от 29.11.05.

5. Ривненская АЭС. Энергоблок № 2. Отчет по анализу безопасности. Анализ проектных аварий. Дополнительные материалы в связи с внедрением топлива второго поколения. Анализ нарушений нормальной эксплуатации и проектных аварий при работе энергоблока на мощности 07/08–09.310. ОД.1. № 22.2.145. ОБ.01.03.01. — 1234 с.

6. Технологический регламент безопасной эксплуатации блока № 2 РАЭС.

Надійшла до редакції 31.01.2011.