

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

Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности

## Моделирование режима маневрирования мощностью на втором энергоблоке Хмельницкой АЭС

Представлены результаты расчетного моделирования режимов маневрирования мощностью, предложенные для испытаний на 2-м блоке Хмельницкой АЭС. Расчетное моделирование выполнено для моментов кампании 115 и 175 эф. сут. При выполнении расчетного анализа применялся код пространственной кинетики DYN3D, использующий нодальный метод расчета распределения потока нейтронов в активной зоне. Выполнена расчетная оценка соблюдения условий непревышения допустимых коэффициентов неравномерности, минимальных значений отклонения офсета и требуемой эффективности ОР СУЗ. Представлен сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний, и результатов расчетного моделирования.

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

### Модельовання режиму маневрування потужністю на другому енергоблоці Хмельницької АЕС

Наведено результати розрахункового моделювання режимів маневрування потужністю, запропоновані для випробувань на 2-му блоці Хмельницької АЕС. Розрахункове моделювання виконано для моментів кампанії 115 і 175 еф. діб. При виконанні розрахункового аналізу застосовувався код просторової кінетики DYN3D, що використовує нодальний метод розрахунку розподілу потоку нейтронів в активній зоні. Виконано розрахункову оцінку дотримання вимог щодо неперевищення допустимих коефіцієнтів нерівномірності, мінімальних значень відхилення офсету та необхідної ефективності ОР СУЗ. Представлено порівняльний аналіз експериментальних даних, отриманих при проведенні випробувань, та результатів розрахункового моделювання.

**В**недрение маневренных режимов эксплуатации ВВЭР-1000 на АЭС Украины – актуальная задача оптимизации работы единой энергосистемы с характерными для нее суточными колебаниями потребления электроэнергии. Работа в единой энергосистеме со значительной долей электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, требует в течение суток периодического снижения мощности реактора с номинального уровня до 75÷80 % номинального значения на 6÷8 ч с последующим восстановлением исходного значения. Для проведения испытаний по маневрированию мощностью необходимо обосновать технологическую возможность и безопасность реализации таких режимов на АЭС. В данной работе с помощью расчетного моделирования демонстрируется безопасность эксплуатации реактора ВВЭР-1000 в переходных режимах суточного графика несения нагрузки в энергосистеме. Показана способность системы управления и защиты реактора с учетом реальных условий работы технологического оборудования блока к подавлению возникающих при этом ксеноновых колебаний мощности, что позволяет обеспечить непревышение эксплуатационных пределов безопасности, установленных в требованиях технологического регламента безопасной эксплуатации (ТРБЭ) блока с ВВЭР-1000.

### Общие подходы и критерии моделирования переходных процессов в обоснование испытаний по маневрированию мощностью

В рамках данной работы представлены результаты расчетного моделирования переходных режимов эксплуатации ВВЭР-1000 с соблюдением суточного графика несения нагрузки в энергосистеме, выполненного в обоснование проведения испытаний по маневрированию мощностью на блоке № 2 Хмельницкой АЭС. График проведения испытаний по маневрированию мощностью разрабатывался для двух моментов кампании, соответствующих 115 и 175 эф. сут эксплуатации во второй кампании.

Расчетное обоснование выполнено по программе DYN3D, позволяющей моделировать медленные переходные процессы в трехмерной геометрии. Распределение глубины выгорания топлива в объеме активной зоны на момент проведения испытания получено расчетным моделированием первой кампании реактора блока № 2 Хмельницкой АЭС с учетом уже реализованного графика изменения мощности (в соответствии с реальным положением ОР СУЗ, расходом и температурой теплоносителя на входе в активную зону), а также последующим моделированием части (до 175 эф. сут) второй кампании с прогнозируемым изменением параметров активной зоны.

Разработка графика движения ОР СУЗ механической системы регулирования для снижения или повышения мощности реактора проводилась исходя из следующих условий, определенных нормативными документами [1, 2]:

минимальных (допустимых) деформаций аксиального распределения энерговыделения (офсета);

соблюдения допустимых значений коэффициентов неравномерности энерговыделения и выполнения достигаемых линейных нагрузок мощности;

соблюдения в любых состояниях переходного процесса рамочных параметров безопасности (веса аварийной защиты реактора без одного наиболее эффективного ОР СУЗ, скорости введения положительной реактивности и эффектив-

ности выброса одного ОР СУЗ), которые обоснованы и установлены в техническом обосновании безопасности (ТОБ) и ТРБЭ для ВВЭР-1000;

соблюдения допустимой скорости изменения мощности реактора, установленной в ТРБЭ;

точности поддержания параметров (офсет, мощность, концентрация борной кислоты) и приемлемости скоростей изменения концентрации борной кислоты и перемещения ОР СУЗ с точки зрения функционирования технологических систем РУ и оборудования.

### Регулирование с использованием 10-й группы ОР СУЗ

Проведение испытаний по маневрированию мощностью планировалось на Хмельницкой АЭС для двух моментов кампании:  $115 \div 120$  и  $173 \div 180$  эф. сут. При глубинах выгорания топлива, соответствующих этим моментам кампании, в режимах разгрузки реактора до 80 % возникают ксеноновые колебания, которые могут иметь неустойчивый характер [3]. С помощью регулирования за счет перемещения только 10-й рабочей группы ОР СУЗ было выполнено расчетное моделирование двух циклов суточного снижения мощности до 80 % с последующим восстановлением исходного номинального уровня.

Моделирование переходных режимов периодического снижения мощности реактора ВВЭР-1000 в течение суток на  $6 \div 8$  ч с последующим восстановлением исходного значения проводилось следующим образом. Вначале рассматривалась разгрузка реактора до 80 % номинального значения в течение 1 ч (рис. 1). После 6 ч работы на пониженном уровне мощность поднималась до номинального значения. Скорости разгрузки и нагружения мощности реактора принимались одинаковыми и равными  $0,3 \% N^{\text{ном}}/\text{мин}$ , что значительно меньше допустимых величин, регламентированных ТРБЭ. При моделировании данного переходного процесса с использованием регулирования только 10-й группой ОР СУЗ концентрация борной кислоты определялась из условия поддержания реактора в стационарном состоянии (рис. 2, 3).

При моделировании переходных процессов использовалась полномасштабная модель активной зоны реактора (сектор симметрии  $360^\circ$ ), что вызвано необходимостью оценки в любом состоянии переходного процесса таких характеристик, как эффективность аварийной защиты с учетом застревания наиболее эффективного ОР СУЗ и эффективность выброса одного ОР СУЗ с целью установления их соответствия предельным значениям, обоснованным и установленным ТОБ.

Снижение мощности реактора должно вызвать смещение аксиального распределения энерговыделения в верхнюю часть активной зоны (увеличивается аксиальный офсет — отношение разницы между значениями мощности верхней и нижней половин активной зоны к общей мощности реактора) за счет большего снижения температуры теплоносителя вверх. Для компенсации этого увеличения аксиального офсета регулирующая группа ОР СУЗ погружается с 87 до 76 % (рис. 2). Данное погружение 10-й группы ОР СУЗ оказалось более эффективным, чем влияние снижения температуры в верхней части активной зоны, поэтому поле энерговыделения сместилось в нижнюю часть активной зоны и аксиальный офсет уменьшился на 3,5 % (рис. 4), что не превышает установленных ограничений.

В дальнейшем (приблизительно через 1 ч после начала снижения мощности) регулирующая группа поднимается до уровня 85 % (практически возвращается в исходное положение), что приводит к увеличению АО на 6 %. Более интенсивное выжигание ядер ксенона в верхней части активной зоны способствует дальнейшему увеличению АО на 3 %. Поэтому перед началом набора мощности необходимо снова погрузить рабочую группу до положения порядка 72 % и компенсировать данное погружение уменьшением концентрации борной кислоты. С одной стороны, это позволит иметь запас на поднятие стержней, который необходим для компенсации уменьшения АО, вызываемого увеличением мощности. С другой стороны, смещение поля нейтронов в нижнюю часть активной зоны (АО уменьшается) позволяет более интенсивно выжигать ксенон внизу активной зоны, тем самым выравнивая его концентрацию в аксиальном направлении. При увеличении мощности реактора (момент времени  $T = 7$  ч) уменьшение АО компенсируется извлечением рабочей группы ОР СУЗ, которая фиксируется в положении 87 % от низа активной зоны, что соответствует значению перед началом маневра. После вывода реактора на номинальную мощность АО устанавливается на уровне, приблизительно соответствующем исходному состоянию перед началом переходного процесса, что является следствием равномерного выжигания (изменения) ядер ксенона в верхней и нижней частях активной зоны.

В течение переходного процесса АО выдерживается в границах рекомендуемой в ТРБЭ области офсет-мощностной диаграммы, а максимальное отклонение АО составляет около 5 %.

Через 24 ч после начала первого снижения мощности выполняется следующее маневрирование мощностью реактора. При этом характер изменения мощностью реактора и параметров активной зоны (глубина погружения регулирующей группы ОР СУЗ, концентрация борной кислоты и т. д.) остается неизменным. В этом случае изменение аксиального офсета (профиля энерговыделения) происходит аналогично первому маневрированию (рис. 4). Небольшое увеличение концентрации борной кислоты во время второго снижения мощности по сравнению с первым снижением связано с уменьшением средней концентрации ксенона в реакторе (рис. 5).

На рис. 6 представлено изменение коэффициентов неравномерности энерговыделения ( $K_q$ ,  $K_v$ ,  $K_f$  и  $K_o$ ) в ходе переходного процесса. Максимальное увеличение коэффициента неравномерности  $K_q$  от исходного значения 1,26 до 1,31 наблюдается в момент времени 6,5 ч, когда рабочая группа ОР СУЗ погружена до положения 72 %, а мощность реактора составляет 2400 МВт (80 %). Следует сказать, что допустимое значение  $K_q$  в этом случае увеличивается пропорционально уменьшению мощности реактора. В этот же момент времени своего максимального значения достигает и  $K_f \approx 1,49$  (в исходном состоянии  $K_f = 1,45$ ). Максимальные значения  $K_v$  и  $K_o$  реализуются в момент времени 1,2 ч и составляют  $K_v = 1,55$  (ТВС № 9, слой № 5 от низа активной зоны) и  $K_o = 1,77$  (ТВС № 24, слой № 5). После подъема мощности реактора до 100 % коэффициенты неравномерности энерговыделения практически возвращаются к своим первоначальным значениям, которые они имели до начала снижения мощности. Это говорит о том, что профили энерговыделения остаются почти неизменными.

На рис. 1, 2 и 4 представлены также экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний. Различия в результатах испытаний и данных моделирования определяются:

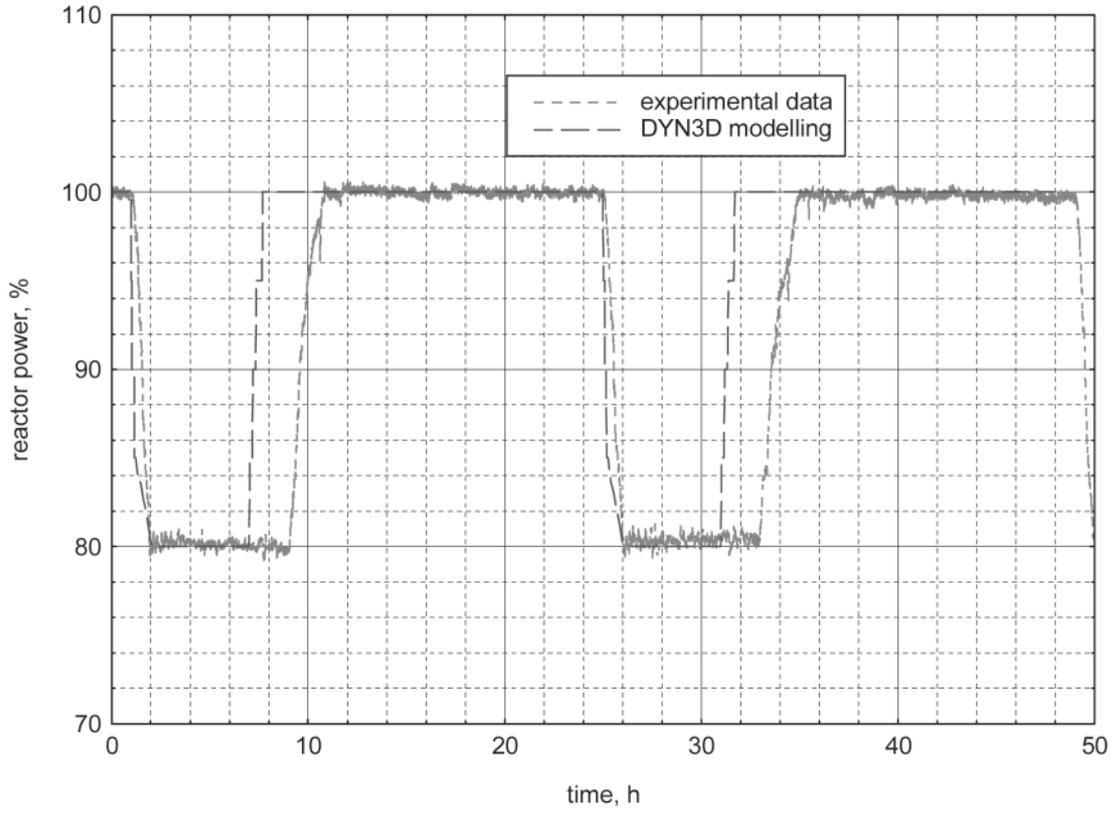


Рис. 1. Изменение мощности реактора

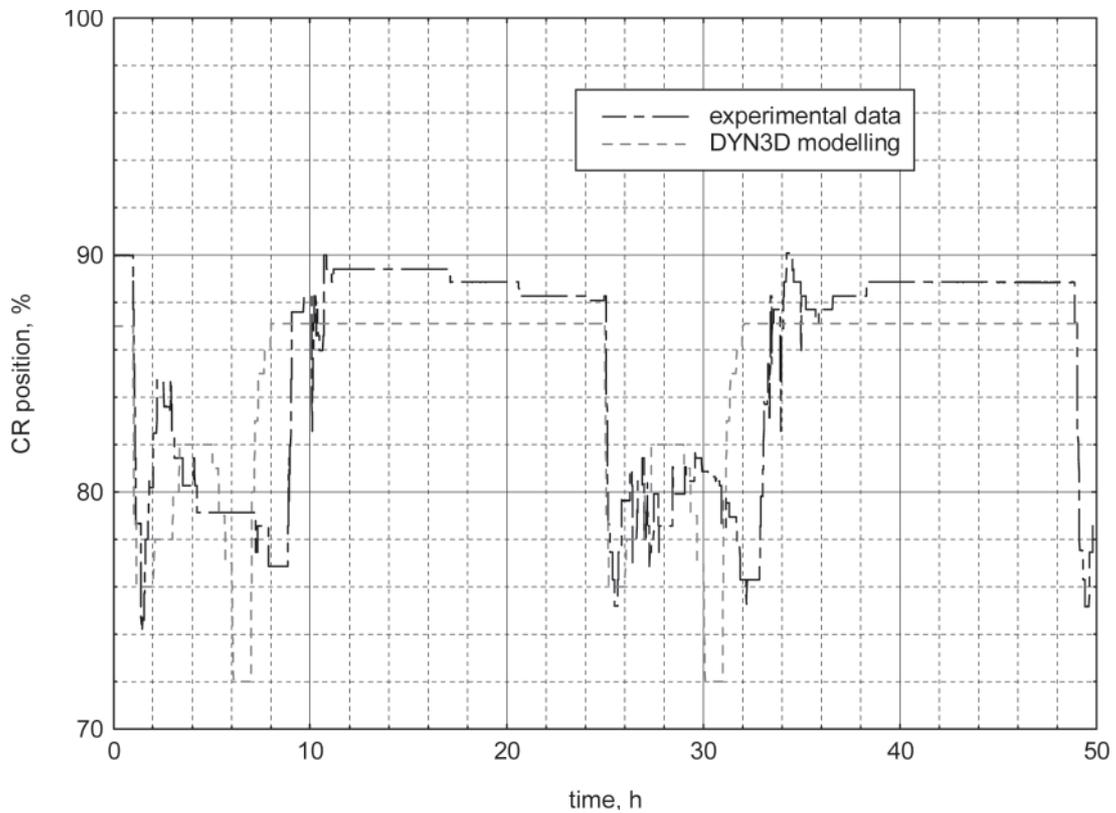


Рис. 2. Изменение положения рабочей группы ОР СУЗ

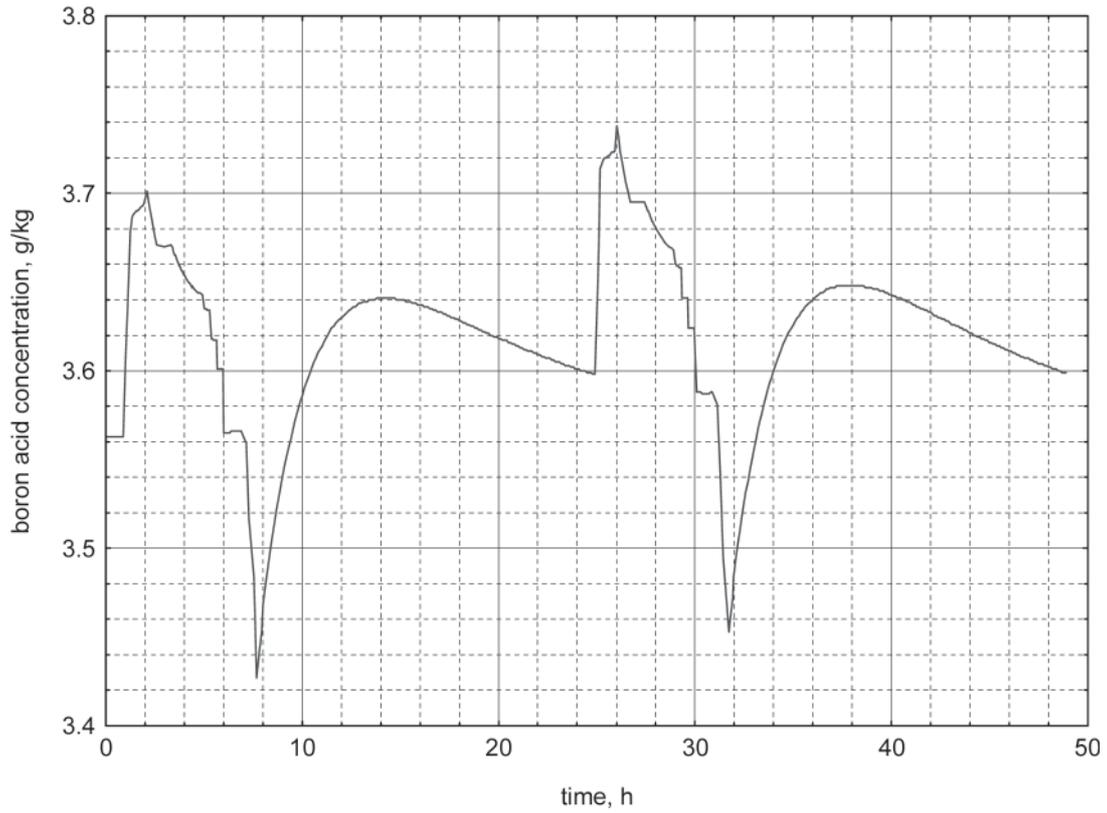


Рис. 3. Изменение концентрации борной кислоты (расчет по DYN3D)

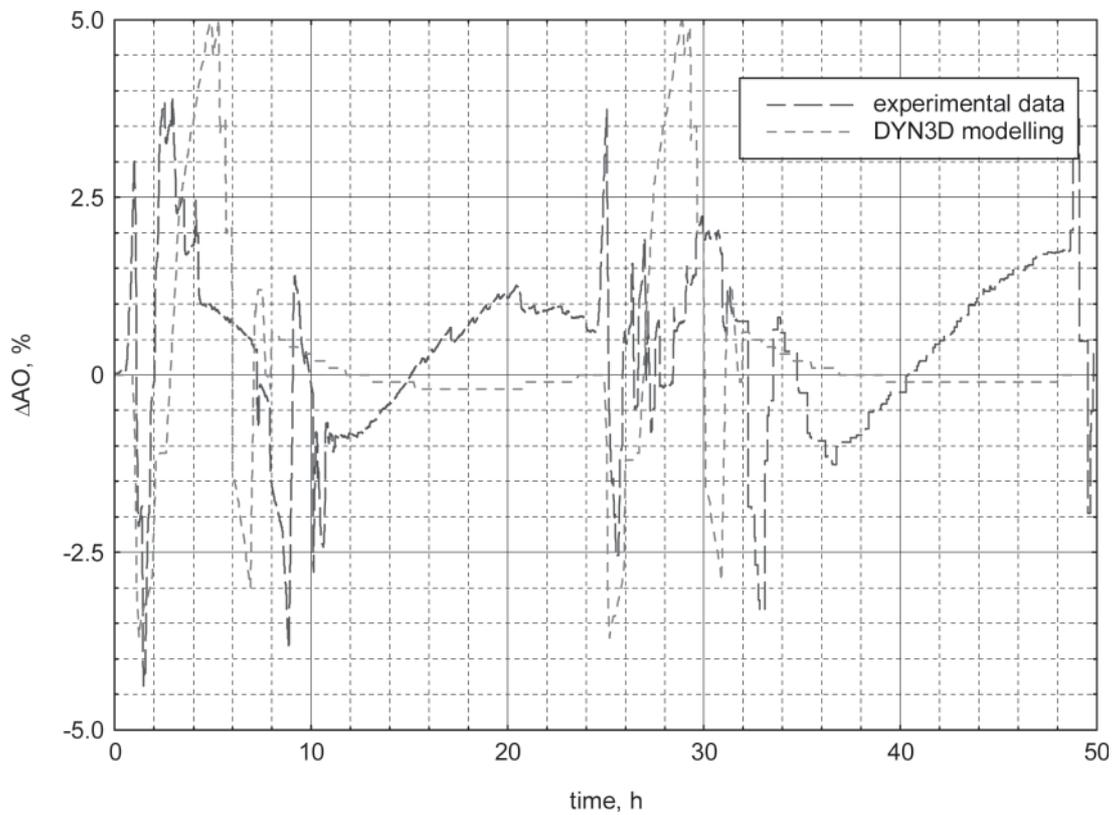


Рис. 4. Изменение аксиального офсета

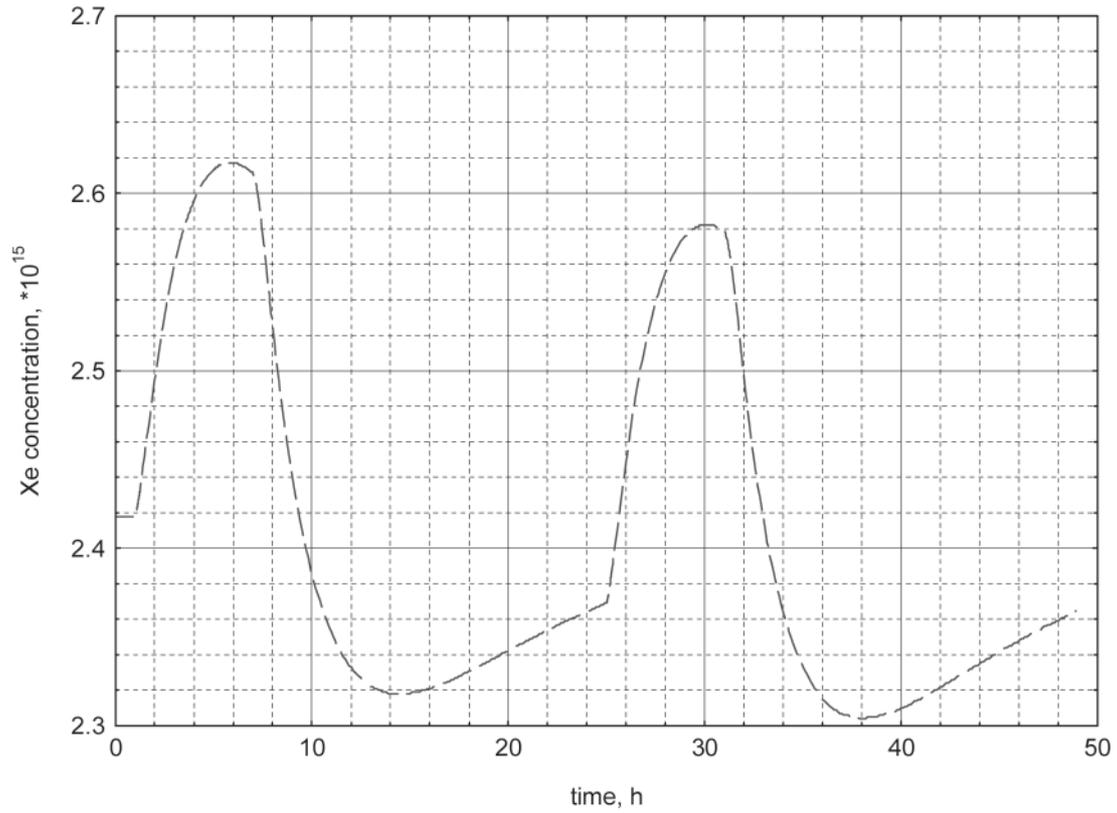


Рис. 5. Концентрація ядер ксенона в ході переходного процесу

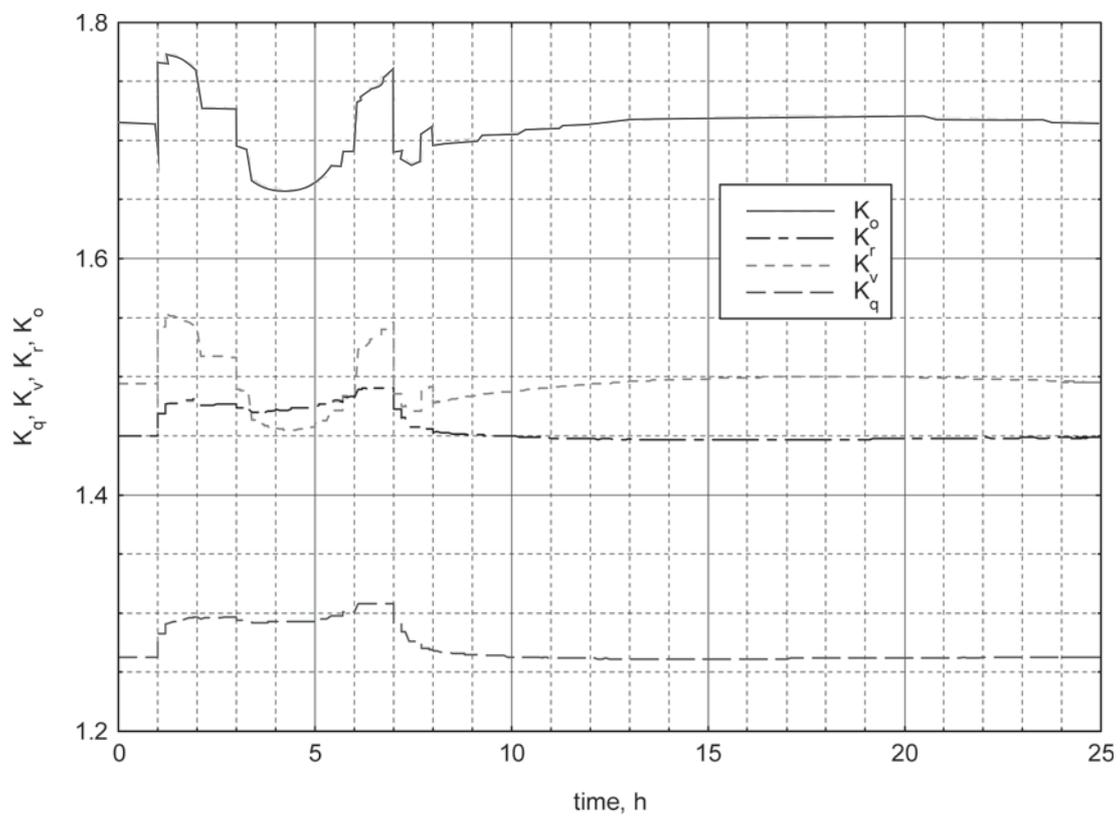


Рис. 6. Изменение коэффициентов неравномерности энерговыделения в ході переходного процесу

отличиями между расчетными и экспериментальными значениями таких параметров активной зоны, как эффективность стержней рабочей группы, коэффициенты реактивности;

несоответствием времени работы реактора на пониженном уровне мощности в расчете и при проведении испытаний (время работы на пониженном уровне мощности в ходе испытаний на 1 ч превышало предполагаемое);

отличиями в режиме ввода борной кислоты в активную зону;

некоторой разницей в распределении полей энерговыделения в исходном состоянии перед маневром, а также в исходном положении рабочей группы.

Данные факторы обуславливают различия в движении рабочей группы ОР СУЗ (рис. 2), которое обеспечивает поддержание аксиального офсета в необходимых пределах. Следует сказать, что отличия в положении рабочей группы в ходе переходного процесса в большей степени относятся к абсолютным значениям высоты группы и в меньшей – к величине перемещения.

### Регулирование с использованием 10-й группы и центрального стержня ОР СУЗ

На втором этапе испытаний (175 эф. сут) проводилось опробование регулирования мощности реактора с использованием 10-й группы и центрального стержня ОР СУЗ. Сравнение результатов предварительно выполненного расчетного моделирования с экспериментальными данными для двух циклов снижения и подъема мощности реактора представлено на рис. 7 – 10.

В данном варианте предполагалась разгрузка реактора до 80 % номинального значения с использованием 10-й группы и центрального стержня ОР СУЗ (рис. 7 и 8). В расчетах принималось, что регулирующая группа ОР СУЗ в исходном состоянии имеет глубину погружения 90 % от низа активной зоны. Одновременно с началом понижения мощности реактора, ОР СУЗ центральной ТВС погружается до крайнего нижнего положения (погружение кластера происходит в течение 20 мин). Здесь, как и ранее, также используется подход, заключающийся в выравнивании аксиального распределения концентрации ксенона по высоте активной зоны в переходном процессе таким образом, чтобы после вывода реактора на номинальный уровень мощности профили энерговыделения ТВС и твэлов оставались неизменными. Изменения концентрации борной кислоты и АО в ходе предложенного варианта регулирования представлены на рис. 9 и 10. В данном варианте регулирования диапазон изменения концентрации борной кислоты получается меньше вследствие того, что в активную зону дополнительно погружается центральный стержень ОР СУЗ.

Применение для регулирования мощности реактора кластера центральной ТВС увеличивает радиальную деформацию поля энерговыделения. Так, в начале подъема кластера из нижнего положения при выводе реактора на номинальный уровень мощности (подъем кластера, как и ранее погружение, осуществляется также в течение 20 мин), относительная мощность максимально нагруженной ТВС ( $K_q$ ) составляет 1,36, тогда как при регулировании только рабочей группой ОР СУЗ максимальное значение  $K_q$  составляло 1,31. Также незначительно повышаются и остальные коэффициенты неравномерности энерговыделения (рис. 11), однако при этом все они находятся в допустимых

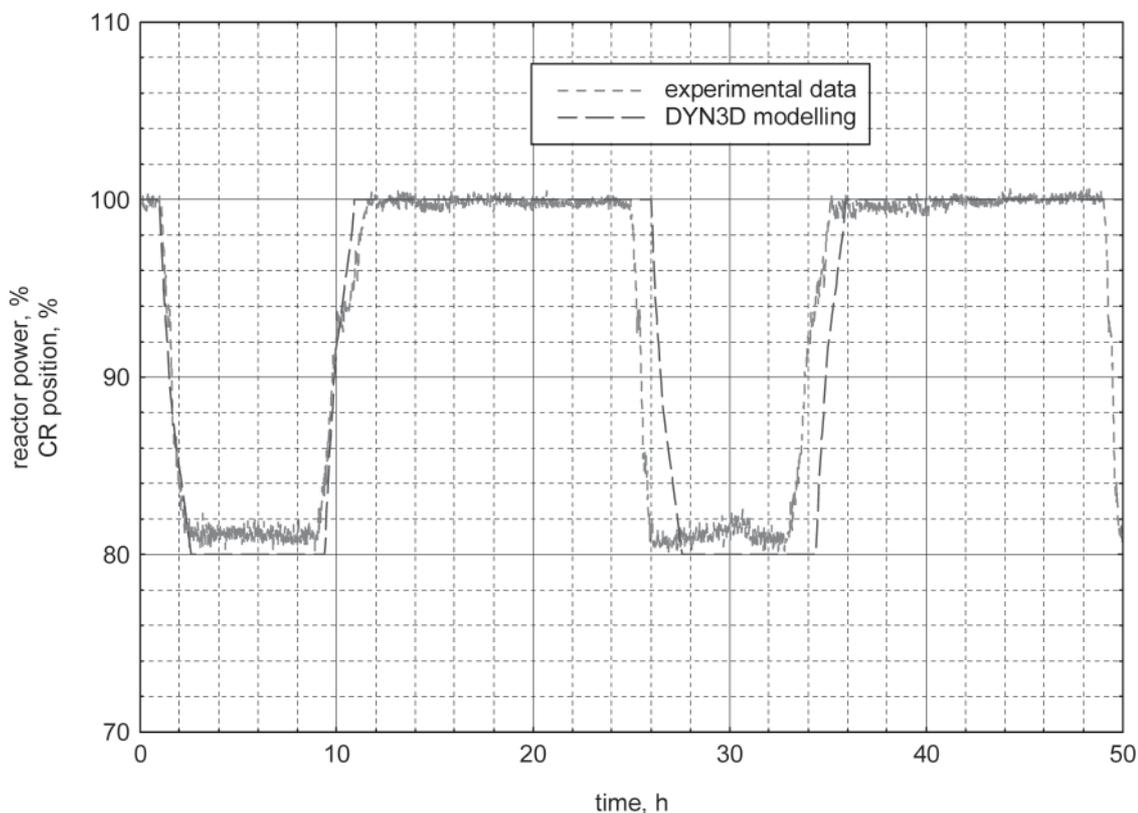


Рис. 7. Изменение мощности реактора

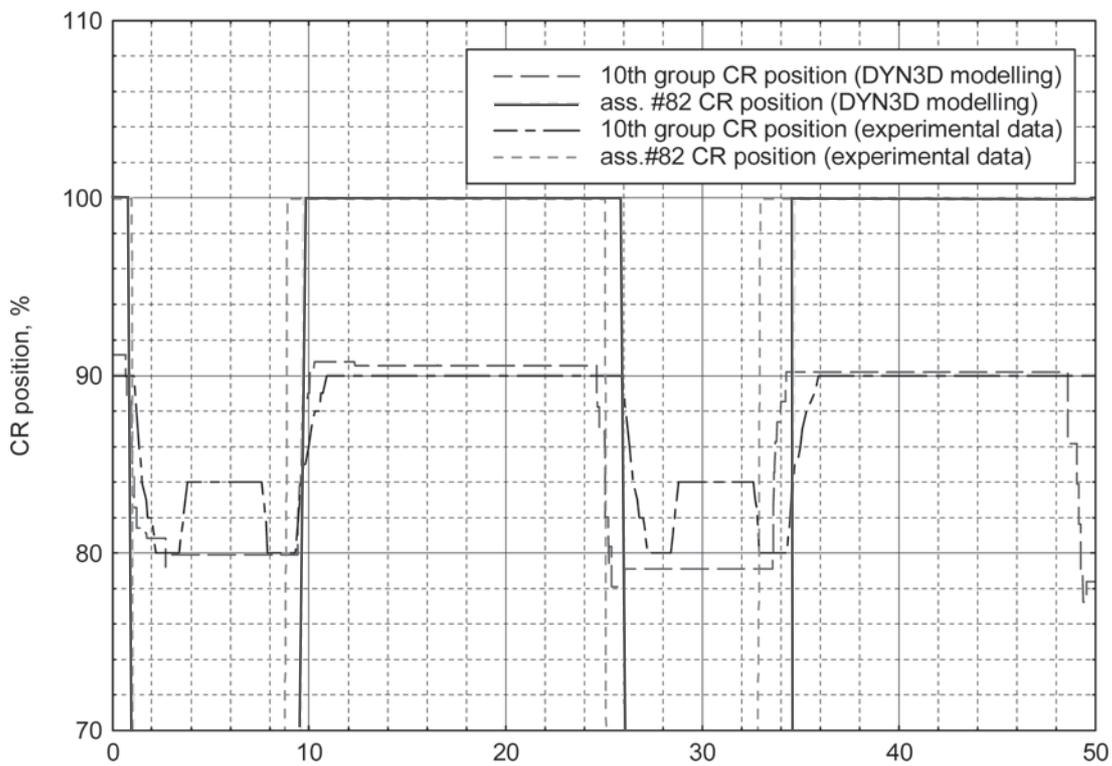


Рис. 8. Изменение положения органов регулирования

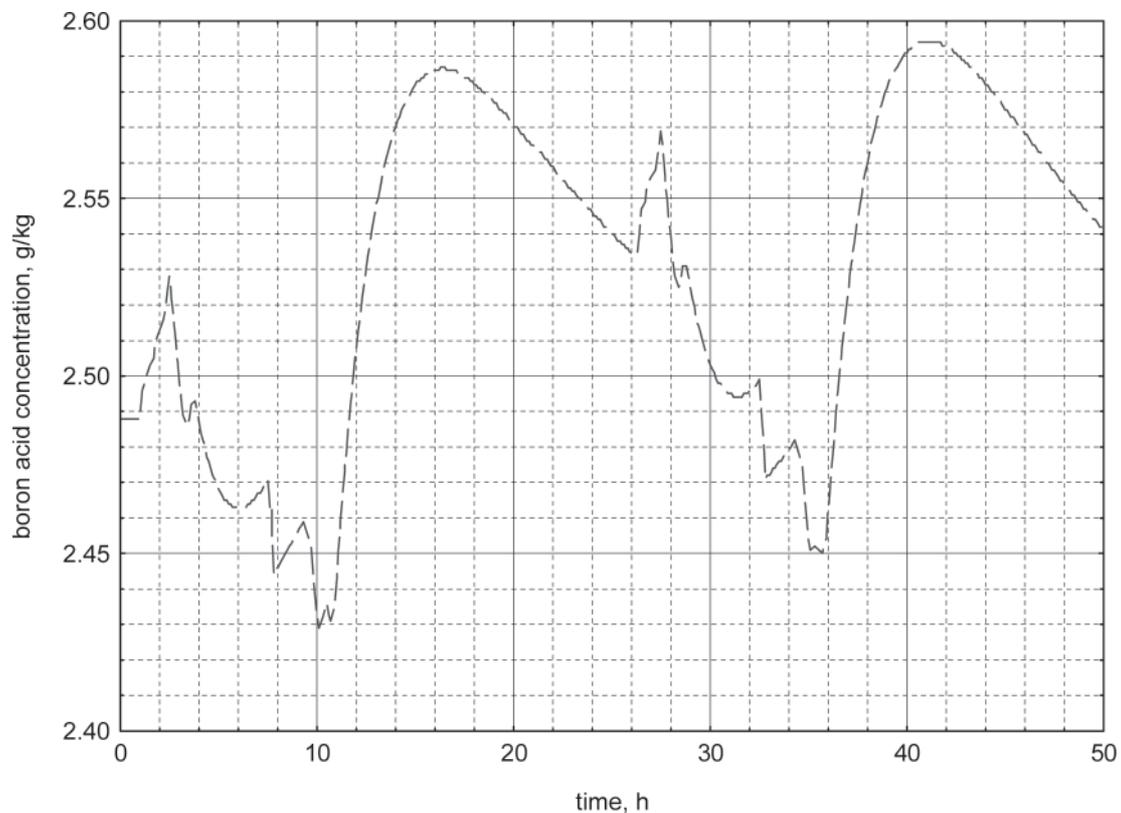


Рис.9. Изменение концентрации борной кислоты (расчет по DYN3D)

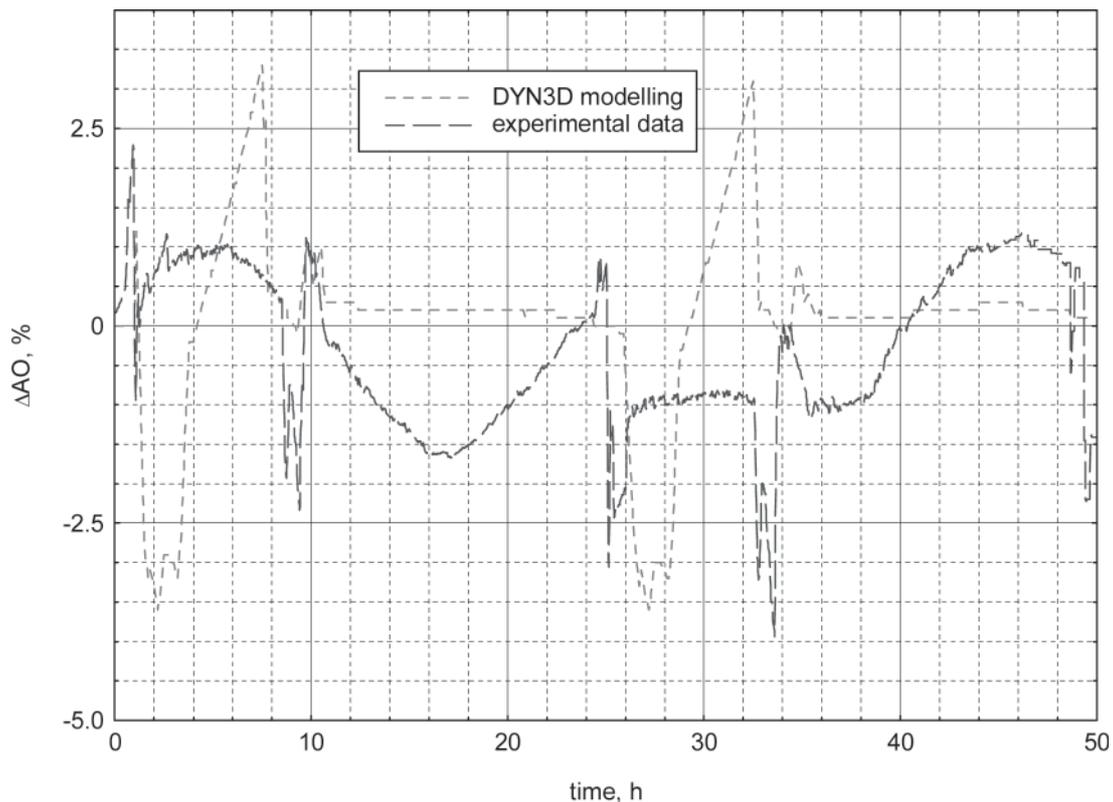


Рис. 10. Изменение аксиального офсета

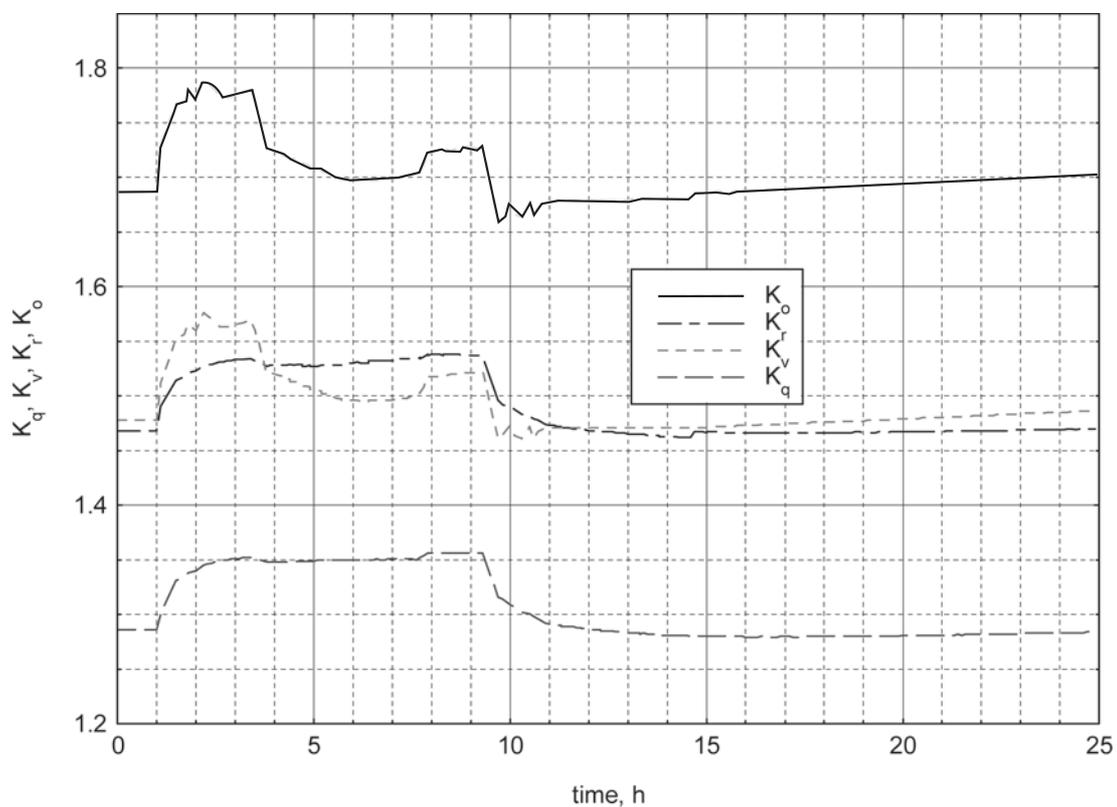


Рис. 11. Изменение коэффициентов неравномерности энерговыделения в течение переходного процесса

пределах. Отметим, что для проведения маневра с использованием данного способа регулирования требуется введение меньшего количества борной кислоты, что упрощает в переходном процессе процедуру водообмена и снижает количество жидких радиоактивных отходов.

На рис. 7, 8 и 10 представлены также экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний. В отличие от результатов моделирования маневрирования мощностью реактора с использованием регулирования только рабочей группой ОР СУЗ, в данной ситуации рабочая группа при эксплуатации на пониженном уровне мощности для более интенсивного выжигания ядер ксенона в верхней части активной зоны не извлекалась. Это, возможно, обусловило большую амплитуду колебаний аксиального офсета после завершения маневра (около 2 %).

### Выводы

В работе представлены результаты моделирования двух режимов маневрирования мощностью в сопоставлении с экспериментальными данными. Как показывают результаты расчетного моделирования, режим маневрирования с

использованием 10-й группы и центрального стержня ОР СУЗ по сравнению с регулированием за счет перемещения только рабочей группы характеризуется большим увеличением коэффициентов неравномерности энерговыделения. Однако при этом требуется введение меньшего количества борной кислоты для проведения маневра, что упрощает в переходном процессе процедуру водообмена и снижает количество жидких радиоактивных отходов.

Результаты экспериментов, полученные при проведении испытаний, подтверждают корректность выполненного моделирования и указывают на возможность внедрения маневренных режимов.

### Литература

1. Отчет о проведении второго этапа испытаний маневренных характеристик энергоблока № 2 ОП ХАЭС. № 2. ЯБ.0271. ОТЧ-06.
2. Извещение 320.3793 об изменении 320.00.00.00.000 Д61, ФГУП ОКБ «Гидропресс».
3. *Y. Ovdienko, V. Khalimonchuk*. Calculating studies of xenon transient connected with step-wise power decrease for burned core // Nuclear and Radiation Safety, sstc n&rs. – № 3. – 2005.