

В. А. Халимончук<sup>1</sup>, А. В. Кучин<sup>1</sup>,  
В. В. Токаревский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, г. Киев, Украина

<sup>2</sup> Институт проблем Чернобыля, г. Киев, Украина

## Оценка вклада парового коэффициента реактивности и концевое эффекта СУЗ в развитие аварии на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС

*Анализируются физические особенности реактора РБМК, которые привели к катастрофическому развитию аварии на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года. Как показало моделирование предшествовавшего аварии переходного процесса и ее первой фазы, решающую роль в развитии аварии сыграл ввод поглощающих стержней в нерегламентном состоянии реактора.*

*Ключевые слова:* реактор РБМК, паровой коэффициент реактивности, поглощающие стержни, оперативный запас реактивности, положительный выбег реактивности, аксиальное распределение поля нейтронов, ксеноновый переходный процесс, восстановление объемного нейтронного поля, изменение реактивности, одногрупповое диффузионное приближение, двухгрупповое диффузионное приближение, исследование первой фазы аварии, нейтронно-физические и теплогидравлические программы, эффективная доля запаздывающих нейтронов.

**В. А. Халимончук, О. В. Кучин, В. В. Токаревський**

### Оцінка внеску парового коефіцієнта реактивності та кінцевого ефекту СУЗ у розвиток аварії на енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС

*Аналізуються фізичні особливості реактора РБМК, які призвели до катастрофічного розвитку аварії на енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС 26 квітня 1986 року. Як показало моделювання перехідного процесу, який передував аварії, та її першої фази, вирішальну роль у розвитку аварії зіграло введення в активну зону поглинаючих стержнів у нерегламентному стані реактора.*

*Ключові слова:* реактор РБМК, паровий коефіцієнт реактивності, оперативний запас реактивності, додатний вибіг реактивності, аксіальний розподіл поля нейтронів, ксеноновий перехідний процес, відновлення об'ємного поля нейтронів, зміна реактивності, одногруппове дифузійне наближення, двогруппове дифузійне наближення, дослідження першої фази аварії, нейтронно-фізичні та теплогидравлічні програми, ефективна частка запізнених нейтронів.

© В. А. Халимончук, А. В. Кучин, В. В. Токаревский, 2016

**А**нализ аварии на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС показал, что физическими причинами, приведшими к катастрофическому развитию аварии, явились положительный паровой коэффициент реактивности и недостаток конструкции поглощающих стержней в РБМК [1]. В настоящее время на действующих реакторах РБМК эти факторы устарены [1, 2].

Основная цель настоящего исследования первой фазы развития аварии заключается в определении вкладов «концевого» эффекта стержней и парового эффекта.

Приведенные в статье данные основаны на работах, выполненных авторами статьи в начале 1990-х годов в тесном сотрудничестве с коллегами из РНЦ «Курчатовский институт» Краюшкиным А. В., Бурлаковым Е. В., Бабайцевым М. Н. в рамках совместных исследований по повышению безопасности РБМК. Результаты таких исследований не были ранее опубликованы (ввиду чрезвычайной загруженности решением проблем повышения безопасности РБМК-1000 в послеварийный период), что побудило в канун 30-й годовщины аварии еще раз вернуться к ее анализу.

Авторы не ставили перед собой задачу оценивать действия персонала, а также давать подробное описание состояния реактора — эти вопросы были изложены в докладе советской делегации на Сессии экспертов МАГАТЭ в августе-сентябре 1986 года в Вене. В статье упомянуты лишь отклонения от режима нормальной эксплуатации, важные для целей проводимого исследования.

Первая из гипотез развития аварии заключается в том, что реактор и оборудование работали перед аварией нормально. Выполнялся электротехнический эксперимент. Поскольку в ходе предшествовавшего аварии ксенонового переходного процесса персонал нарушил регламентное ограничение по величине оперативного запаса реактивности (ОЗР), то большая часть поглощающих (или регулирующих) стержней находилась в крайнем верхнем положении. Стержни, начав движение, ввели положительную реактивность (рис. 1). Последовавший разгон реактора вызвал закипание теплоносителя и ввод дополнительной положительной реактивности за счет парового эффекта.

Вторая гипотеза заключается в том, что в реакторе до момента нажатия кнопки АЗ начали развиваться некие процессы в теплотехническом оборудовании, которые привели к росту паросодержания.

Если в рамках первой гипотезы подразумевается, что поглощающие стержни сыграли решающую роль в развитии аварии, то в рамках второй гипотезы предполагается, что основную и определяющую роль в аварии играл паровой эффект, а эффект стержней, если и был, то не имел существенного значения.

Нейтронно-физические исследования, посвященные аварии на энергоблоке № 4 ЧАЭС, описаны в ряде работ [3—10]. Как уже упоминалось, в настоящей работе ставится задача оценить вклад парового эффекта и эффекта стержней в развитие первой фазы аварии.

То, что реактор РБМК имел положительный паровой эффект реактивности, было известно ранее [11, 12] (заметим, что положительный паровой эффект характерен также для реактора CANDU). Недостаток же конструкции поглощающих стержней вплоть до аварии не был адекватно оценен. Его проявление, как выяснилось, становилось ощутимым в нерегламентных состояниях реактора с малым значением ОЗР. Согласно регламенту, ОЗР не должен был быть меньше 15 эффективных стержней, причём это ограничение устанавливалось главным образом

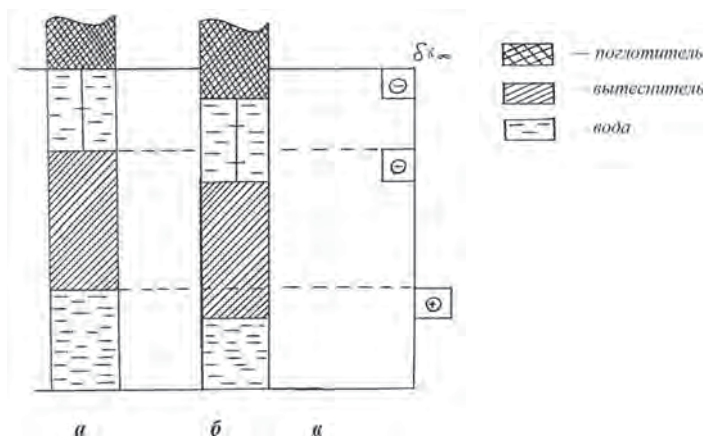


Рис. 1. Изменение размножающих свойств по высоте активной зоны при вводе стержней регулирования и аварийной защиты РР из крайнего верхнего положения («концевой» эффект реактивности): а — стержень РР извлечен из активной зоны; б — стержень РР частично погружен в активную зону; в — изменение размножающих свойств в результате погружения стержня РР

из условия управления полем энерговыделения, которое затруднено при малых ОЗР. Однако именно в предаварийной ситуации на реакторе энергоблока № 4 возникло такое нерегламентное состояние с ОЗР в 6—8 стержней.

### Методика расчета

В работе вначале изучается ксеноновый переходный процесс снижения мощности реактора перед аварией. Для моделирования используется одномерная аксиальная двухгрупповая программа. Двухгрупповые сечения в ней определяются с учетом аксиальных распределений выгорания, концентрации ксенона, температуры топлива и графита, плотности теплоносителя. Для учета регулирующих стержней применяется специальная методика гомогенизации гетерогенной системы, представляющей собой размножающую среду, в которую вставлена решетка поглотителей, имитирующих регулирующие стержни. Стержни перемещаются с помощью специального оптимизационного алгоритма, в котором помимо компенсации реактивности за счет изменения концентрации ксенона и теплогидравлических параметров минимизируется также изменение формы аксиального нейтронного поля. Принцип работы оптимизационного алгоритма выбран так, чтобы перемещения стержней были подобны тем, которые выполняет оператор.

Для анализа первой фазы аварии используются две различные трехмерные программы: одногрупповая грубо-сеточная программа TREP — совместно с программами нестационарной теплогидравлики DIKRUS [13, 14] и KOBRA [5], а также двухгрупповая полномасштабная программа STEPAN — совместно с блоком нестационарной теплогидравлики KOBRA [5]. В программе TREP, для уменьшения размерности, один узел сетки приходится на 4 ячейки. При этом для получения одногрупповых параметров узлов применяется специальная методика гомогенизации.

Поскольку основная задача представленного здесь исследования — рассмотрение нейтронно-физических аспектов аварии, подробно на описании теплогидравлических программ останавливаться не будем. Отметим

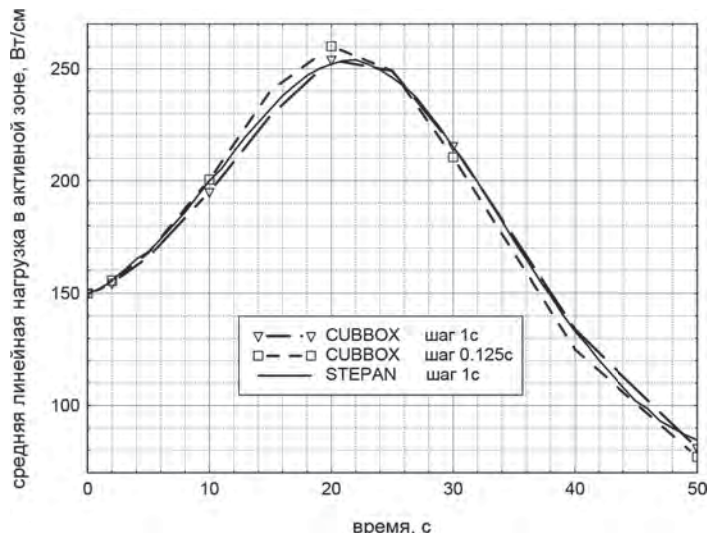


Рис. 2. Обсчет трехмерного теста, приведенного в [16]

лишь, что в программе DIKRUS используется одномерная гомогенная модель течения пароводяного теплоносителя. Для упрощения задачи реализовано приближение одинаковой скорости изменения давления во всех точках контура циркуляции. В отличие от программы DIKRUS, в KOBRA упомянутое приближение для давления не используется, но тоже применяется одномерная гомогенная модель течения теплоносителя.

Нейтронно-физические блоки TREP и STEPAN используют неявную схему для дискретизации задачи по времени и конечноразностную пространственную сетку, причем в программе STEPAN одна точка сетки приходится на ячейку (в плане X-Y). Для подготовки малоугрупповых сечений была применена программа WMSMD-4.

Результаты тестирования программы TREP изложены в [15]. Программа STEPAN нашла широкое применение в нейтронно-физических исследованиях РБМК как для статических, так и для нестационарных расчетов, и многократно тестировалась по результатам экспериментов на критических сборках и действующих реакторах РБМК. Некоторые результаты ее дополнительного тестирования применительно к изучению аварии (обсчет трехмерного теста, приведенного в [16]) для блока пространственной нейтронной кинетики показаны на рис. 2.

Важным фактором в исследовании аварии, как уже упоминалось, является эффект положительного выбега реактивности на поглощающих стержнях. В 1983 году данный эффект был обнаружен экспериментально при пуске реактора энергоблока № 1 Игналинской АЭС, и в том же году — при пуске энергоблока № 4 ЧАЭС во время «взвешивания» четырех стержней автоматического регулирования группы 2 (АР-2)\*. В то время его потенциальная опасность не была адекватно оценена.

Результаты «взвешивания» АР-2 во время физического пуска энергоблока № 4 ЧАЭС, полученные с помощью двухгрупповой диффузионной программы DST [20], представлены на рис. 3.

Результаты сопоставительного анализа расчетных и экспериментальных градуировочных характеристик стержня

\* Стержни АР-2 во время физического пуска энергоблока № 4 ЧАЭС имели вытеснитель (см. рис. 1), который после физпуска был удален из всех стержней АР.

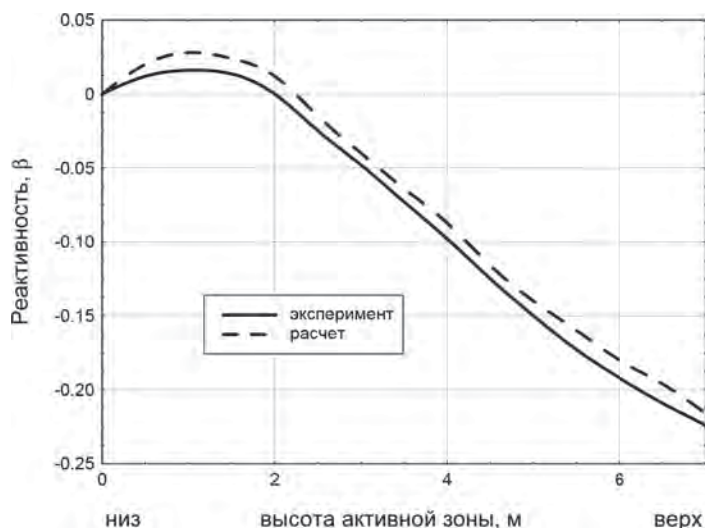


Рис. 3. Взвешивание стержней AP-2 (энергоблок № 4 ЧАЭС, физический пуск)

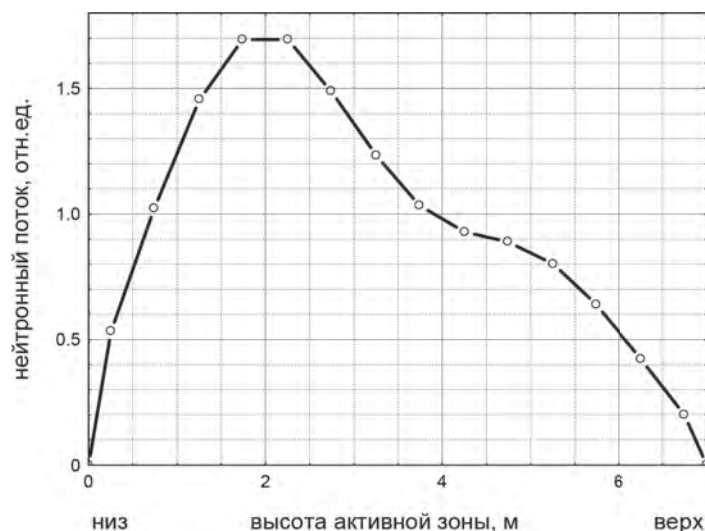


Рис. 4 Аксиальное распределение поля нейтронов на начальной загрузке энергоблока № 1 Игналинской АЭС

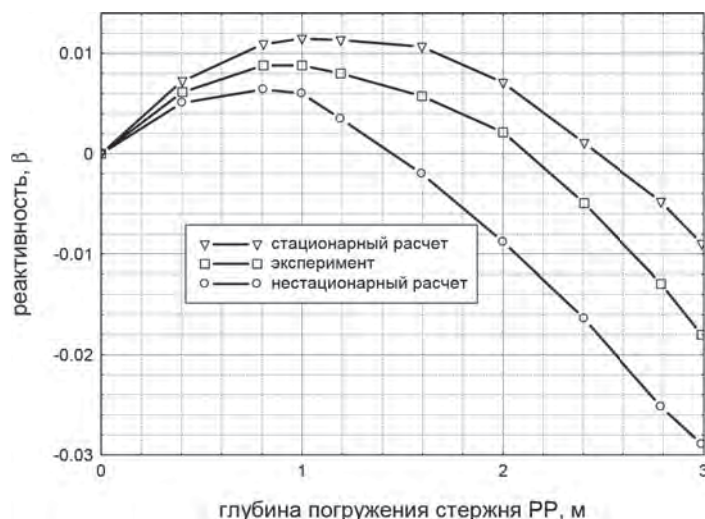


Рис. 5. Градуировочная характеристика стержня РР (Игналинская АЭС)

ручного регулирования (РР) по результатам физического пуска блока № 1 Игналинской АЭС даны на рис. 4 и 5. Видно, что на начальной фазе погружения стержня имеет место ввод положительной реактивности, причина которого заключается в вытеснении столба воды нижней части активной зоны (см. рис. 1), и что расчет по STEPAN достаточно хорошо воспроизводит эффект положительного выбега реактивности.

Дальнейшее сопоставление результатов, получаемых по программе TREP, использующей упрощенную методику, с результатами по программе STEPAN позволило обосновать применимость TREP для многовариантных исследований.

### Результаты расчетов

**Моделирование ксенонового переходного процесса, предшествовавшего аварии.** Для моделирования первой фазы развития аварии важно знать начальные параметры: положение регулирующих стержней, показания внутризонных датчиков и ряд других. Эти параметры были получены из системы контроля за 1 мин 10 с до нажатия кнопки АЗ-5 (полный останов реактора). Тем не менее, представляет интерес моделирование ксенонового переходного процесса, предшествовавшего аварии, для расчетного воспроизведения важнейших параметров — формы аксиального нейтронного поля и значения ОЗР.

Моделирование переходного процесса снижения мощности выполнено с помощью упомянутой выше одномерной программы. Снижение мощности с номинального уровня началось 25 апреля в 1 ч 06 мин (рис. 6); через 2 ч была начата смена продувки графитовой кладки, которая продолжалась в течение 1 ч. При этом гелий-азотная смесь заменяется на азот, что позволяет сдерживать падение температуры графита и ОЗР (эффект реактивности по температуре графита положительный).

На рис. 7 приведена зависимость ОЗР от времени. Там же отмечены известные фактические (экспериментальные) значения ОЗР. Видно, что ОЗР вначале снижался из-за снижения мощности до 50 % номинальной, а 25 апреля к 22 ч вернулся примерно к исходному значению.

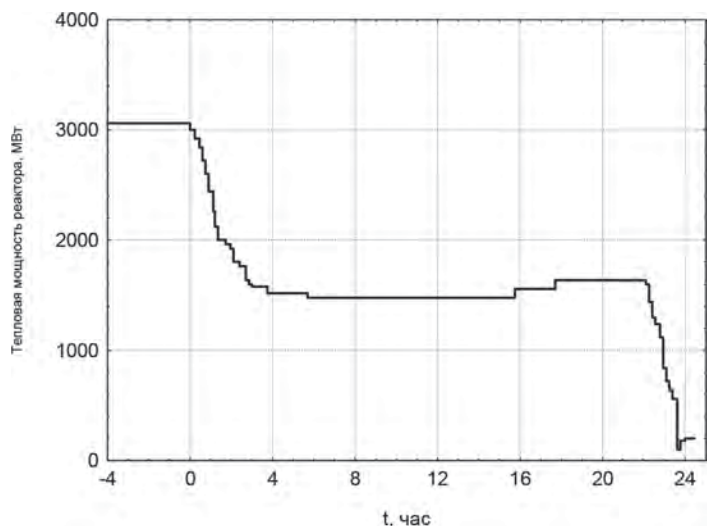


Рис. 6. Изменение мощности реактора в ксеноновом переходном процессе

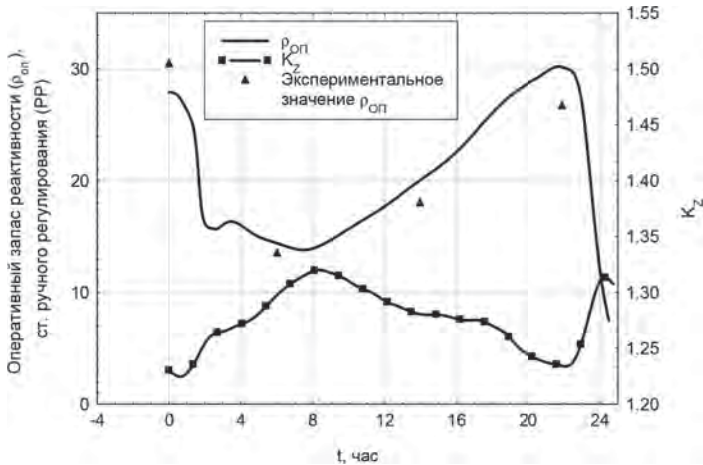


Рис. 7. Изменение оперативного запаса реактивности и аксиального коэффициента неравномерности поля нейтронов в переходном процессе

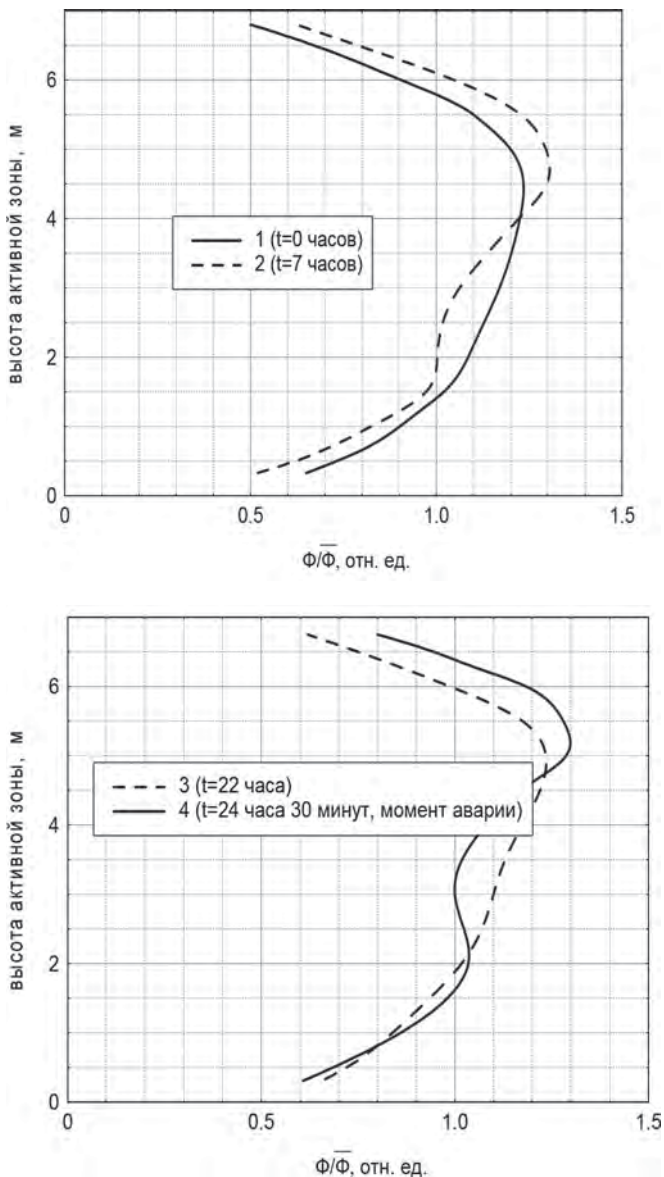


Рис. 8. Изменение аксиального поля нейтронов в ксенонном переходном процессе перед аварией

Затем вскоре мощность стала опять снижаться до уровня, предусмотренного экспериментом, и ОЗР начал падать, достигнув перед аварией значения 7 стержней РР.

Расчет показал, что в процессе снижения мощности не наблюдалось существенных искажений аксиального поля. Зависимость аксиального коэффициента неравномерности ( $K_z$ ) от времени приведена на рис. 7.

На рис. 8 видно, что снижение мощности приводит к возникновению двугорбой формы поля. Это наблюдается в переходном процессе как при мощности 50 % номинальной, так и непосредственно перед аварией. Известно [17], что двугорбое поле неустойчиво и легко подвергается искажениям.

**Паровой эффект реактивности.** Природа парового эффекта реактивности рассматривалась в работах [11, 12, 18] и др. С помощью программы STEPAN выполнены расчеты парового эффекта реактивности в предаварийном состоянии. При этом использовались фактические данные по распределению глубины выгорания топлива и положениям регулирующих стержней. Исходная плотность теплоносителя была принята постоянной во всех точках активной зоны (поскольку кипение практически отсутствовало) и равной  $0,8 \text{ г/см}^3$ . Получено значение парового эффекта  $+4,5\beta$ . Как известно, паровой эффект реактивности в РБМК существенно зависит от количества введенных в активную зону поглотителей, уменьшаясь при увеличении их числа. В процессе аварии поглощающие стержни погружались в активную зону реактора. Зависимость парового эффекта от глубины погружения стержней показана на рис. 9, где приведены также результаты расчета с помощью трехмерной статической программы НЕМ-3 [19], реализующей методику, отличную от использованной в программе STEPAN. Видно, что до глубины погружения стержней 400 см уменьшение парового эффекта реактивности оценивается обеими программами величиной около  $1\beta$ . Заметное снижение эффекта наблюдается лишь при погружении стержней на глубину более 400 см, так как аксиальное поле смещается в нижнюю часть активной зоны и основную роль в эффекте обезвоживания начинает играть область, свободная от стержней.

Похожие результаты получены и при использовании программы ТРЕР, но оценка снижения парового эффекта ниже и составляет  $0,5\beta$  (при увеличении погружения

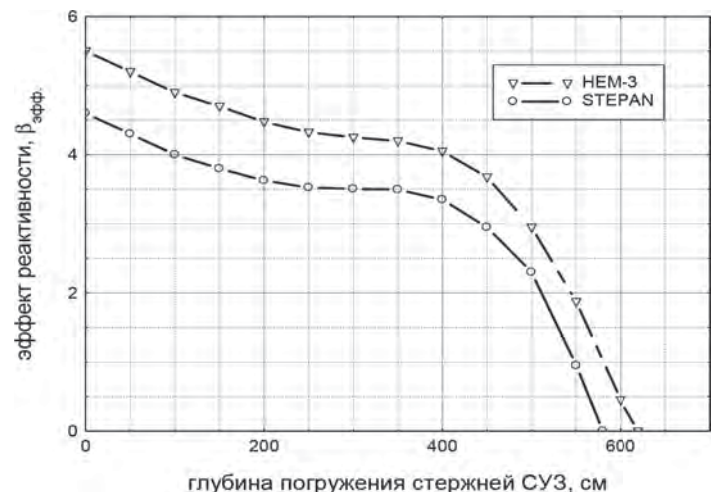


Рис. 9. Зависимость эффекта реактивности от глубины погружения ОР СУЗ

ОР СУЗ на 300 см по отношению к исходному положению паровой эффект реактивности уменьшается от исходного значения  $5\beta$  до  $4,5\beta$ ).

При быстром росте мощности возможно образование паровой пленки на поверхности твэлов, препятствующей образованию пара в остальном объеме теплоносителя. Представляет интерес сопоставление гомогенного и гетерогенного уменьшения плотности теплоносителя в канале с точки зрения их возможного различного влияния на паровой эффект. Расчеты однородной решетки, выполненные с помощью версии RIJ программы WIMSD-4, не показали существенного различия двух способов уменьшения плотности теплоносителя. При этом в гомогенном случае плотность равномерно уменьшалась по всему проходному сечению теплоносителя, а в гетерогенном — в среднем по сечению на ту же величину, но путем задания кольцевых полостей вокруг твэлов. В первом случае  $\partial K_{\infty}/\partial \gamma = -5,0 \beta/(\text{г}\cdot\text{см}^{-3})$ , во втором —  $\partial K_{\infty}/\partial \gamma = -4,4 \beta/(\text{г}\cdot\text{см}^{-3})$ . В теплогидравлических программах изменение плотности теплоносителя в соответствии с используемыми моделями полагается гомогенным. С точки зрения влияния на нейтронно-физические характеристики, как показывают приведенные оценки, использование гомогенного учета плотности теплоносителя является удовлетворительным.

**Эффект положительного выбега реактивности на стержнях.** Природа положительного выбега реактивности рассматривалась в [1–5]. Каким образом может вводиться положительная реактивность при погружении стержня из крайнего верхнего положения, показано на рис. 1. Заметим, что в предаварийном состоянии в ходе отравления реактора ксеноном большое количество стержней оказалось извлеченным в верхнее положение.

Рассмотрим вопрос о том, какова могла быть величина положительного выбега реактивности в условиях аварии на энергоблоке № 4 ЧАЭС. Необходимо отметить, что, во-первых, величина положительного выбега реактивности существенно зависит от формы аксиального нейтронного поля [10], а во-вторых, в физически большом реакторе РБМК даже небольшие неточности расчетной схемы могут приводить к заметным отличиям расчетного поля от фактического. Поэтому для повышения достоверности расчетного прогноза в РБМК принято использовать процедуру восстановления объемного нейтронного поля по показаниям внутризонных датчиков. Процедура восстановления заключается в нахождении распределенных по объему активной зоны малых поправок к нейтронным сечениям, которые обеспечивают согласие расчетного поля с показаниями внутризонных датчиков. Последний предаварийный набор показаний внутризонных датчиков, совместно с положением стержней, известен на момент 1 ч 22 мин 30 с, т. е. за 70 с до аварии. На тот же момент известны картограммы загрузки активной зоны и выгорания топлива, расходов теплоносителя через каналы. С использованием данной информации по программе STEPAN выполнен расчет поля нейтронов в исходном предаварийном состоянии, а также расчет с восстановлением. Осредненные по активной зоне аксиальные нейтронные поля приведены на рис. 10.

Как видим, чистый расчет (расчет без восстановления, т. е. без использования показаний внутризонных датчиков) довольно грубо предсказывает форму исходного поля. Это и не удивительно, поскольку в расчете полагается, что состояние стационарное, а фактически оно возникло в результате переходного процесса, предшествовавшего

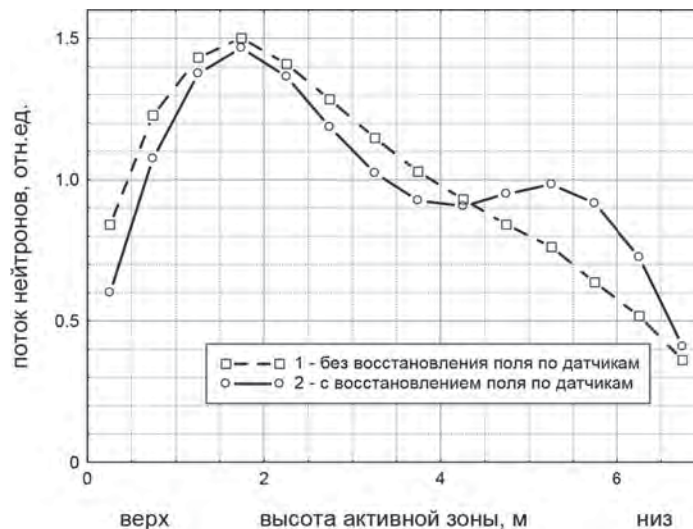


Рис. 10. Осредненное по активной зоне аксиальное распределение поля нейтронов в расчетах с восстановлением и без (программа STEPAN)

аварии. Таким образом, расчет должен либо моделировать переходный процесс, что и проделано в представленной здесь работе, но только в одномерной геометрии (см. рубрику «Моделирование ксенонового переходного процесса, предшествовавшего аварии»), либо опираться на показания внутризонных датчиков.

Кривые вводимой стержнями реактивности в чистом расчете без восстановления и в расчете с восстановлением, полученные с использованием программы STEPAN, приведены на рис. 11. Видно, что в первом случае стержни не вносят положительной реактивности, а во втором, после кратковременного введения отрицательной реактивности, они начинают вводить положительную реактивность, по величине приближающуюся к  $1\beta$ .

В аналогичном расчете положительного выбега по программе TREP с использованием для восстановления исходного объемного поля нейтронов экспериментальных значений токов датчиков высотного распределения

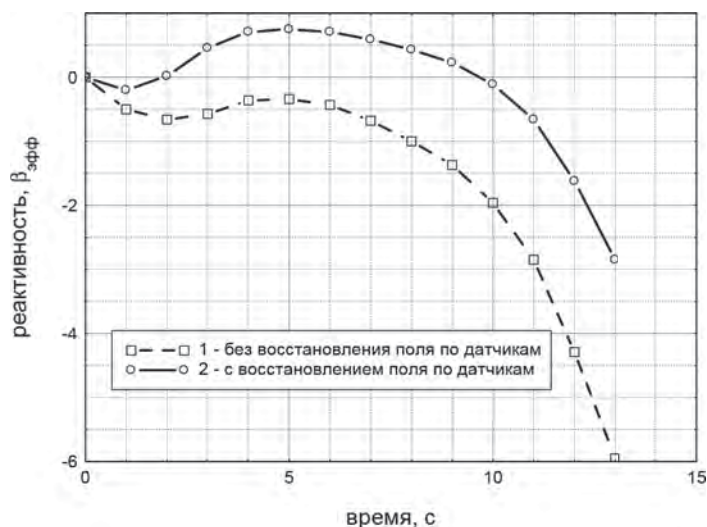


Рис. 11. Изменение реактивности при погружении ОР СУЗ в аксиальных полях нейтронов, представленных на рис. 10 (программа STEPAN)

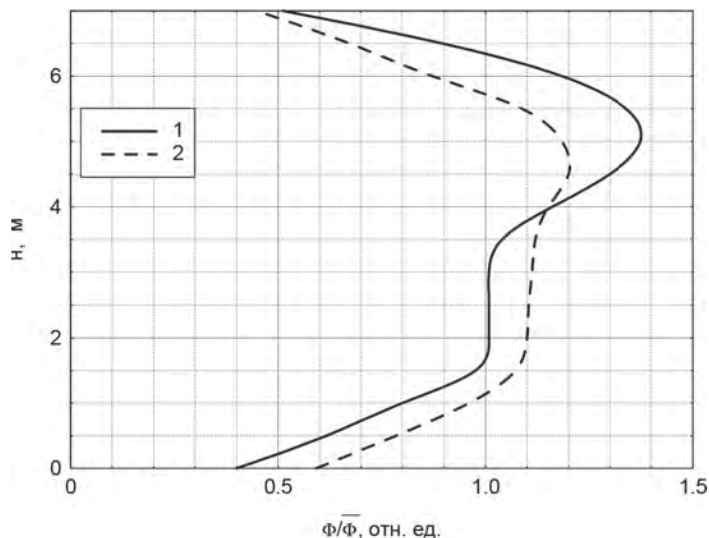


Рис. 12. Вариации аксиального поля нейтронов в расчетах по TREP. Переход от кривой 1 к кривой 2 приводит к увеличению положительного выбега реактивности с  $0,5\beta$  до  $1\beta$

получена форма исходного аксиального распределения, представленная на рис. 12 (кривая 1), которая весьма схожа с исходным аксиальным профилем, полученным в блоке восстановления STEPAN (рис. 10, кривая 2). Но оценка «концевого» эффекта ОР СУЗ в таком исходном аксиальном распределении по TREP составила  $+0,5\beta$ , что ниже, чем в оценке по программе STEPAN. При этом поведение реактивности по времени и форме, полученное TREP, весьма сходно с кривой 2 на рис. 11, полученной STEPAN. Небольшая же вариация формы исходного аксиального поля (рис. 12, кривая 2), полученного в результате использования в блоке восстановления TREP заданного высотного распределения, представленного на рис. 8 кривой 4 (по результатам моделирования ксенонового переходного процесса), увеличивает положительный выбег реактивности до  $+1\beta$ . Оправданием для такой вариации служит то, что погрешность показаний внутризонных детекторов на малой мощности составляет около 15 %.

Остановимся на том, почему при одинаковой форме поля (рис. 10, кривая 2, и рис. 12, кривая 1) программы STEPAN и TREP дают различные значения величины положительного выбега ( $1\beta$  и  $0,5\beta$  соответственно). Это может быть объяснено различиями физических моделей, в частности разным описанием влияния на реактивность замены столба воды на вытеснитель при погружении поглощающих стержней. Обратим внимание, что одноступенчатое диффузионное приближение (программа TREP) неточно описывает ход плотности потока нейтронов вблизи столба воды: столб воды трактуется как поглотитель, тогда как в действительности он является источником тепловых нейтронов. Двухступенчатое же приближение учитывает этот эффект. Однако применение сеточной схемы может внести погрешность в оценку этого эффекта и в двухступенчатом приближении. Специально проведенные расчеты по STEPAN для анализа чувствительности величины положительного выбега реактивности к эффективности замены столба воды на вытеснитель показали, что варьирование этой величины в пределах  $\pm 15\%$  (предполагаемая возможная погрешность) при фиксированной форме аксиального поля приводит к изменению величины выбега на  $\pm 0,5\beta$ .

Таким образом, расчеты, выполненные по трехмерным программам с использованием фактической информации о предаварийном состоянии реактора, показывают, что величина положительного выбега реактивности на стержнях с учетом влияния возможных неопределенностей на форму аксиального распределения поля нейтронов и эффективности замены столба воды на вытеснитель составляла около  $1\beta$ .

**Моделирование первой фазы аварии.** Рассмотрим результаты моделирования первой фазы аварии с помощью комплексов программ TREP+DIKRUS, TREP+KOBRA и STEPAN+KOBRA. Основное отличие в расчетах по TREP и STEPAN состоит в следующем. В программе TREP при восстановлении аксиального поля энерговыделения в качестве показаний высотных датчиков берется заданное высотное распределение в соответствии с расчетом ксенонового переходного процесса (рис. 8, кривая 4), в результате чего исходная форма аксиального распределения имеет вид, описываемый кривой 2 на рис. 12. В коде же STEPAN используются экспериментальные значения высотных датчиков, т. е. исходное высотное распределение описывается кривой 2 на рис. 10, практически совпадающей с кривой 1 на рис. 12.

Сравнение расчетов по TREP+DIKRUS и TREP+KOBRA показывает, что при одинаковом выбеге реактивности в  $1,1\beta$  выбег нейтронной мощности по TREP+KOBRA больше на 5400 МВт и составляет 18200 МВт (т. е. порядка 5,7 номинальных значений мощности реактора). Отличие результатов можно объяснить большей скоростью падения плотности теплоносителя в расчетах по TREP+KOBRA. Заметим, что в этих расчетах использовалась библиотека констант, которая не учитывала «загиба» в размножающих свойствах ( $\nu_{s,j}$ ) ТВС, т. е. более интенсивного увеличения размножающих свойств при малых значениях плотности теплоносителя.

Эффект «загиба» учтен в результатах моделирования по программам STEPAN+KOBRA и TREP+KOBRA. На рис. 13 изображены зависимости от времени реактивности и нейтронной мощности, построенные с помощью данных программ в следующем предположении. Состояние реактора перед нажатием кнопки АЗ-5 в 1 ч 23 мин 40 с не изменилось с момента 1 ч 22 мин 30 с, когда были получены последние данные по положениям стержней и нейтронным полям. Какие-либо внешние возмущения отсутствуют. В момент времени  $t = 0$  (1 ч 23 мин 40 с) в результате нажатия кнопки аварийной защиты АЗ-5 начинают погружаться поглощающие стержни. После кратковременного ввода отрицательной реактивности они начинают вводить положительную реактивность. Причина этого — резкое изменение формы аксиального поля (рис. 14). Рост нейтронной мощности вызывает закипание теплоносителя, что приводит к вводу дополнительной положительной реактивности и ускоренному росту нейтронной мощности. Поскольку в обоих расчетах возможные разрушения активной зоны не моделируются, действие доплеровского эффекта и продолжающееся движение стержней приводят к уменьшению реактивности, из-за чего происходит всплеск нейтронной мощности. Его высота составляет в расчетах по программе TREP+KOBRA около 12 номинальных значений, а в расчетах по STEPAN+KOBRA — около 14. В обоих случаях, с учетом пространственных неравномерностей, можно утверждать, что в нижней части активной зоны энерговыделение достигает приблизительно 300 ккал на 1 г

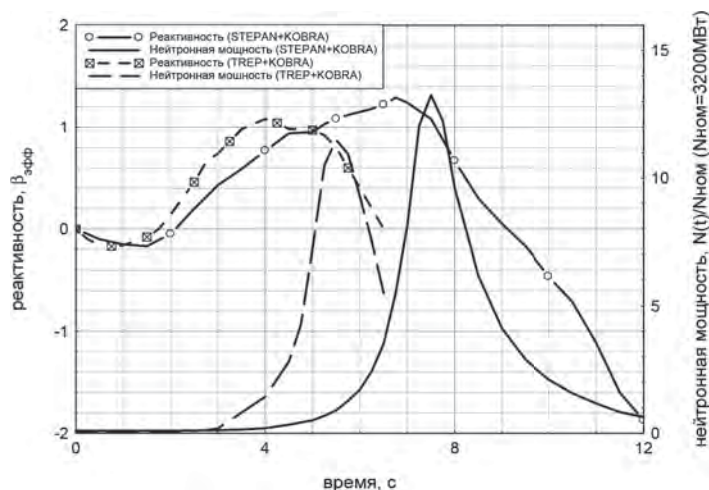


Рис. 13. Зависимости реактивности и нейтронной мощности по результатам моделирования первой фазы аварии с использованием кодов STEPAN+KOBRA и TREP+KOBRA

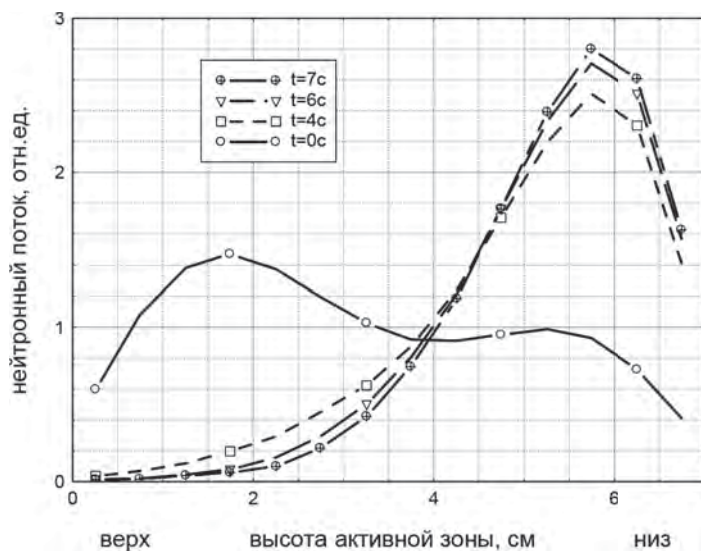


Рис. 14. Изменение аксиального поля нейтронов в первой фазе аварии (расчет по STEPAN+KOBRA)

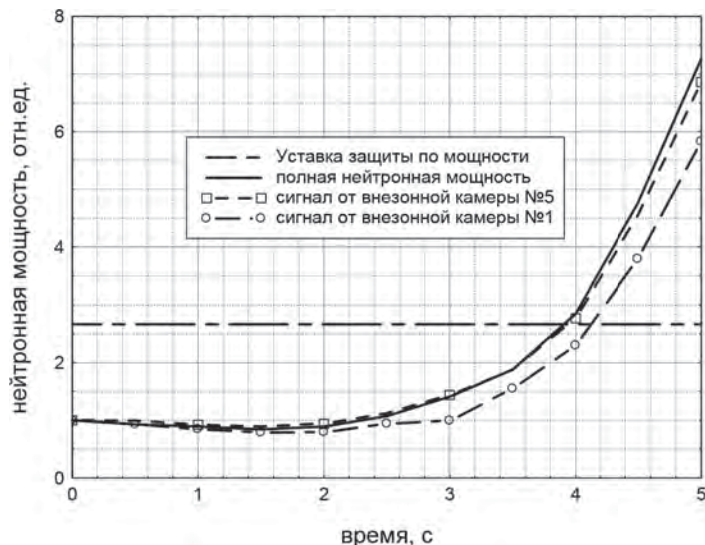


Рис. 15. Расчетные значения сигналов врезонных ионизационных камер №№ 1 и 5 после нажатия кнопки АЗ-5

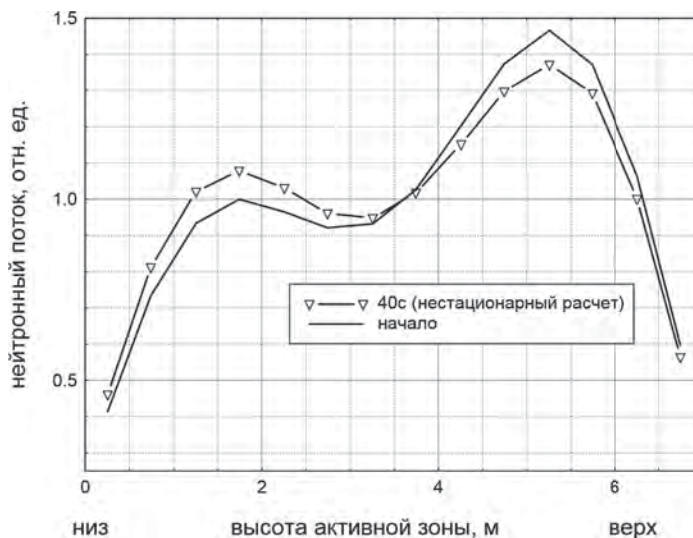


Рис. 16. Оценка изменения высотного распределения поля нейтронов в результате отключения ГЦН

топлива — величины, достаточной для фрагментации топлива. Дальнейшее рассмотрение, по-видимому, следует выполнять с учетом эффектов реактивности от изменений структуры активной зоны при разрушениях.

Рассмотрим теперь вопрос достоверности приведенных результатов. Системой регистрации было зафиксировано, что через 3 с после нажатия кнопки АЗ-5 появились сигналы аварийной защиты по уровню мощности и периоду разгона. Данные сигналы вырабатываются от датчиков, расположенных вокруг реактора за боковым отражателем. Показания этих датчиков моделировались в расчете по программе STEPAN+KOBRA. Изменение сигнала датчиков по времени приведено на рис. 15. Вначале идет небольшое уменьшение тока (заметим, что небольшое уменьшение перед началом разгона было также зафиксировано системой регистрации), затем рост показаний. Уставка аварийной защиты по мощности достигается в расчете через 4 с (фактически она была достигнута через 3 с).

Здесь необходимо отметить чрезвычайную чувствительность хода развития аварии к малым изменениям исходных данных.

С помощью программы STEPAN+KOBRA было проведено моделирование предшествовавшего аварии интервала времени в 40 с — от момента начала эксперимента до момента нажатия кнопки АЗ-5. По условиям эксперимента четыре насоса из восьми подпитывались электрической энергией от выбегающего турбогенератора и поэтому постепенно снижали свою производительность, а общий расход теплоносителя ( $G$ ) уменьшался со скоростью  $0,5\% \cdot G_{\text{исходное}}/с$ . В данном расчете этот эффект был учтен.

Уменьшение расхода теплоносителя вызвало небольшое рост паросодержания и погружение примерно на 1 м четырех стержней автоматического регулирования АРМ (с глубины 160 см до 240 см). Так как стержни АРМ перемещались в верхней половине активной зоны, произошло небольшое снижение верхнего горба аксиального поля (рис. 16). На рис. 17 показано, как при этом изменились результаты расчета первой фазы аварии.

Как видно, с учетом эффекта снижения расхода всплеск нейтронной мощности существенно больший,

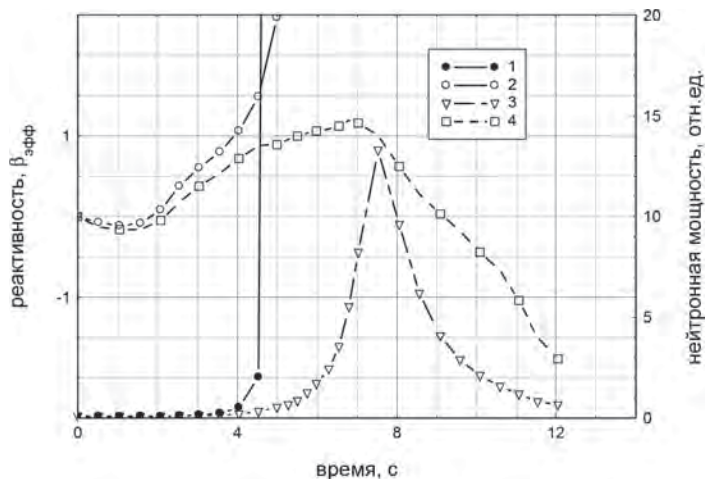


Рис. 17. Сравнение результатов моделирования первой фазы аварии без учета снижения и с учетом снижения расхода теплоносителя за счет отключения ГЦН:

- 1 — нейтронная мощность с учетом снижения расхода теплоносителя;  
 2 — реактивность с учетом снижения расхода теплоносителя;  
 3 — нейтронная мощность без учета снижения расхода теплоносителя;  
 4 — реактивность без учета снижения расхода теплоносителя

и его не может уже остановить ни доплеровский эффект, ни продолжающееся погружение стержней СУЗ. Сигналы аварийной защиты теперь появляются на момент времени около 2 с.

## Выводы

Расчетное моделирование первой фазы аварии при помощи трехмерных нестационарных программ с использованием подробной информации о предаварийном состоянии реактора показало, что причинами разгона реактора явились положительный паровой эффект реактивности и положительный выбег на начальном этапе погружения поглощающих стержней СУЗ. Причем последний эффект, согласно результатам моделирования, сыграл роль спускового механизма. Эти два эффекта достаточно адекватно объясняют разгон реактора без привлечения каких-либо дополнительных предположений о внешних воздействиях, приведших к появлению пара в активной зоне.

Эффект положительного выбега на стержнях СУЗ («концевой» эффект СУЗ) оценен величиной около  $1\beta$  из-за большого количества выведенных из активной зоны стержней СУЗ и неустойчивого аксиального поля нейтронов, образовавшегося в результате ксенонового переходного процесса снижения мощности. Расчетное моделирование подтвердило, что оперативный запас реактивности в предаварийном состоянии снизился до 6–8 стержней, что ниже установленного регламентом предела в 15 стержней.

## Список использованной литературы

1. *Asmolv V. G., Borovoy A. A.*, et al. (1988). Accident at Chernobyl NPP: a Year After. Atomic Energy, Vol. 64, N 1, p. 3–23.
2. *Adamov E. O.* (1990, June). The Soviet RBMK: where do we go from here? Nuc. Eng. Int., p. 33–36.

3. *Adamov E. O., Vasilevsky V. P.*, et al. (1986). Analysis of First Phase of Unit IV Accident at Chernobyl NPP, Atomic Energy, Vol. 64, N 1, p. 24–28.

4. *Adamov E. O., Ionov A. I.*, et al. Extended Analysis of First Phase of Unit IV Accident at Chernobyl NPP, Proceeding of the first international workshop on past severe accidents and their consequences, 1989, Oct. 30 — Nov. 3, p. 41–49.

5. *Krayushkin A. V., Kubarev A. V.*, et al. Simulation of the Initial Phase of an Accident of the Chernobyl NPP 4-th Power Unit, Proceeding of the first the international workshop on past severe accidents and their consequences, 1989, Oct. 30—Nov. 3, p. 39–47.

6. *Кучин А. В.* Нейтронно-физические и теплогидравлические исследования аварии на 4-м энергоблоке ЧАЭС / А. В. Кучин, В. А. Халимончук // Доклады Академии наук Украины. — 1993. — № 1. — С. 140–147.

7. *Edward E. Purvis* et al. Report of the U.S. Department of Energy's Station Accident Sequence 1986, DOE/NE-0076

8. *Buccafurni A., Landeyro P. A.* Performance of the Standart Calculation Tools in the Analysis of the Chernobyl Accident, IAEA-SM-296/S3P.

9. *Martinez-Val Jose M., Aragonos Jose M.*, et al. (June 1990). An Analysis of the Physical Causes of Chernobyl Accident. Nuclear Technology, vol. 90, p. 371–387.

10. *Chan P. S. W., Dastur A. R.* (1989). The Sensitivity of Positive Scram Reactivity to Neutronic Decoupling in the RBMK-1000. Nuc. Sci. Eng. 103, p. 289–293.

11. *Pushkarev V. I., Zhirnov A. D., Sirotkin A. P.* (1979). Way of Altering the Coefficients of Reactivity in RBMK Reactors, At. Energ. 46, p. 386.

12. *Romanenko V. S., Krayushkin A. V.* (1982). Physical Characteristics of an RBMK in the Transitional Period, At. Energ. 53, p. 367.

13. *Халимончук В. А.* ТРЕП — быстродействующая программа для исследования нестационарных режимов РБМК в трехмерной геометрии / Халимончук В. А., Краюшкин А. В. — К.: ИЯИ АН УССР, 1990. — 32с — (Препринт / ИЯИ АН УССР; КИЯИ-90-18).

14. *Дмитриев В. М.* Математическая модель энергоблока с реактором РБМК-1000 для анализа динамики переходных процессов при эксплуатации ЯЭУ / В. М. Дмитриев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика и техника ядерных реакторов. — 1986. — № 1. — с.3–8

15. *Халимончук В. А.* Динамика ядерного реактора с распределенными параметрами в исследованиях переходных режимов эксплуатации ВВЭР и РБМК / В. А. Халимончук. — К.: Основа, 2008. — 226 с.

16. *Langenbuch S., Mauer W., Werner W.* (1977). Coarse-Mesh Flux-Expansion Method for the Analysis of Space-Time Effects in Large Light Water Reactor Cores. Nuc. Sci. Eng. 63, p. 437–456.

17. *Randall D., John D.* (1958). Nucleoniks, Vol. 16, № 3, p. 82.

18. *Романенко В. С.* Некоторые вопросы физики РБМК / В. С. Романенко // ВАНТ, серия: Физика и техника ядерных реакторов. — 1981. — Вып. 5 (18). — С. 8–20.

19. *Городков С. С.* Сравнение сеточных алгоритмов в расчетах нейтронных полей в больших реакторах / С. С. Городков // Атомная энергия. — 1988. — Т. 65, вып. 3. — С. 184–190.

20. *Марьяненко В. Д.* Расчеты полей энерговыделения реакторов РБМК в трехмерной (x, y, z) геометрии с учетом показаний датчиков СФКРЭ / В. Д. Марьяненко // В сб.: Моделирование нейтронно-физических процессов в реакторах АЭС (Тезисы докладов IV Всесоюзного семинара по проблемам физики реакторов, состоявшегося 3–5 сентября 1984, СОЛ «Волга»). — М., 1985. — С. 36–38.

## References

1. *Asmolv, V.G., Borovoy, A.A.*, et al. (1988), "Accident at Chornobyl NPP: a Year After", Atomic Energy, Vol. 64, No. 1, pp. 3–23.
2. *Adamov, E.O.* (1990, June), "The Soviet RBMK: Where do We Go From Here?", Nuc. Eng. Int., pp. 33–36.



3. Adamov, E.O., Vasilevsky, V.P., et al. (1986), "Analysis of the First Phase of Unit 4 Accident at Chernobyl NPP", Atomic Energy, Vol. 64, No. 1, pp. 24–28.
4. Adamov, E.O., Ionov, A.I., et al. (1989), "Extended Analysis of the First Phase of Unit 4 Accident at Chernobyl NPP", Proceedings of the First International Workshop on Past Severe Accidents and their Consequences, Oct. 30 — Nov. 3, pp. 41–49.
5. Kraiushkin, A.V., Kubarev, A.V., et al. (1989), "Simulation of the Initial Phase of an Accident of the Chernobyl NPP Unit No. 4", Proceeding of the First the International Workshop on Past Severe Accidents and their Consequences, Oct. 30 — Nov. 3, pp. 39–47.
6. Kuchin, A.V., Khalimonchuk, V.A. (1993), "Neutron, Physical, Thermal and Hydraulic Research of ChNPP-4 Accident" [Neitronno-fizicheskiie i teplogidravlicheskiie issledovaniia avarii na 4-m energobloke ChAES], Reports of the Ukrainian Academy of Sciences, No. 1, pp. 140–147. (Rus)
7. Edward E. Purvis, et al. (1986), "Report of the U.S. Department of Energy's Station Accident Sequence", DOE/NE-0076
8. Buccafurni, A., Landeyro, P.A. "Performance of the Standard Calculation Tools in the Analysis of the Chernobyl Accident", IAEA-SM-296/S3P
9. Martinez-Val, Jose M., Aragonés, Jose M., et al. (June 1990), "An Analysis of the Physical Causes of Chernobyl Accident". Nuclear Technology, Vol. 90, pp. 371–387.
10. Chan, P.S.W., Dastur, A.R. (1989), "The Sensitivity of Positive Scram Reactivity to Neutronic Decoupling in the RBMK-1000". Nuc. Sci. Eng. 103, pp. 289–293.
11. Pushkarev, V.I., Zhirnov, A.D., Sirotkin, A.P. (1979), "Way of Altering the Coefficients of Reactivity in RBMK Reactors", At. Energ. 46, p. 386.
12. Romanenko, V.S., Kraiushkin, A.V. (1982). "Physical Characteristics of an RBMK in the Transitional Period", At. Energ. 53, p. 367.
13. Khalimonchuk, V.A., Kraiushkin, A.V. (1990), "TREP — Fast-Acting Program for Research of RBMK Nonstationary Modes in Three-Dimensional Geometry" [TREP — bystrodeistvuiushchaia programma dlia issledovaniia nestatsionarnykh rezhimov RBMK v triokhmernoi geometrii], Kyiv, Institute for Nuclear Research, NASU, 32 p. (Preprint KIYaI-90–18). (Rus)
14. Dmitriev, V.M. (1986), "Mathematical Model of a Power Unit with RBMK-1000 to Analyze Transients during Nuclear Facility Operation" [Matematicheskaia model energobloka s reaktorom RBMK-1000 dlia analiza dinamiki perekhodnykh protsessov pri ekspluatatsii YaEU], Issues of Nuclear Science and Engineering. Physics and Technologies of Nuclear Reactors, No. 1, pp. 3–8. (Rus)
15. Khalimonchuk, V.A., (2008), "Dynamics of Nuclear Reactor with Distributed Parameters in Research of Transients of WWER and RBMK Operation" [Dinamika yadernogo reaktora s raspredelionnymi parametrami v issledovaniakh perekhodnykh rezhimov ekspluatatsii VVER i RBMK], Kyiv, Osnova, 226 p. (Rus)
16. Langenbuch, S., Mauer, W., Werner, W. (1977), "Coarse-Mesh Flux-Expansion Method for the Analysis of Space-Time Effects in Large Light Water Reactor Cores", Nuc. Sci. Eng. 63, pp. 437–456.
17. Randall, D., John, D. (1958), Nucleonics, Vol. 16, No. 3, p. 82.
18. Romanenko, V.S. (1981), "Some Issues of RBMK Physics" [Nekotoryie voprosy fiziki RBMK], Physics and Technologies of Nuclear Reactors, No. 5 (18), pp. 8–20. (Rus)
19. Gorodkov, S.S. (1988), "Comparison of Mesh Algorithms in Calculation of Neutron Fields in Big Reactors" [Sravneniie setochnykh algoritmov v raschiotakh neitronnykh polei v bolshikh reaktorakh], Atomic Energy, Volume 65, No. 3, pp. 184–190. (Rus)
20. Marianenko, V.D. (1985), "Calculation of RBMK Energy Fields in Three-Dimensional (x, y, z) Geometry Taking into Account Data from Sensors of the Physical Monitoring System" [Raschioty polei energovydeleniia reaktorov RBMK v triokhmernoi (x, y, z) geometrii s uchiotom pokazanii datchikov SFKRE], Modeling of Neutron and Physical Processes in NPP Reactors (Abstracts of the Reports of IV All-Union Workshop on Problems of Reactor Physics, 3–5 September 1984, SOL "VOLGA"), Moscow, pp. 36–38. (Rus)

Получено 17.12.2015.