

НИЦ «Курчатовский институт»

На правах рукописи



**Гордиенко Павел Владимирович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НЕЙТРОННО-  
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТОРАХ ВВЭР С ПОТВЭЛЬНОЙ  
ДЕТАЛИЗАЦИЕЙ**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский Институт»

**Научный руководитель:**

Лизоркин Михаил Петрович  
Доктор технических наук  
Начальник отдела Физики ВВЭР  
НИЦ «Курчатовский институт»

**Официальные оппоненты:**

Щукин Николай Васильевич  
Доктор физико-математических наук  
Профессор кафедры № 5  
НИЯУ МИФИ

Кавун Олег Юрьевич  
Доктор технических наук  
Начальник лаборатории НТЦ ЯРБ

**Ведущая организация:**

ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Защита диссертации состоится « 22 » апреля 2014 г. в \_\_\_ ч. \_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 520.009.06 в НИЦ «Курчатовский Институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский Институт»

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
Доктор технических наук, профессор



Мадеев В.Г.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

АЭС с реакторами ВВЭР получили широкое распространение и эксплуатируются как в России, так и за рубежом. На сегодняшний момент существуют проекты строительства новых блоков реакторов ВВЭР во многих странах. Для поддержания высокого уровня конкурентоспособности происходит совершенствование уже эксплуатирующихся реакторов. Увеличивается эффективность и длительность топливных циклов, повышается мощность РУ.

Проекты по строительству новых блоков АЭС с ВВЭР, а также проекты по повышению эффективности уже построенных реакторов требуют проведения технического обоснования безопасности (ТОБ). В рамках ТОБ оцениваются последствия реактивных аварий, возможных в реакторах ВВЭР. К реактивным авариям относятся, в частности, следующие исходные события:

- Неуправляемое извлечение группы ОР СУЗ из реактора;
- Выброс стержня ОР СУЗ из реактора;
- Рассогласование стержней ОР СУЗ.

Безопасность реакторной установки в анализах безопасности оценивается путем сравнения параметров состояния топливных элементов, полученных при моделировании реактивных аварий, с требованиями приемочных критериев. К приемочным критериям, в частности, относятся ограничения на предельно допустимые значения температуры топлива, оболочки твэлов, усредненной по сечению топливной таблетки энтальпии топлива и запаса до кризиса теплоотдачи.

Для моделирования реактивных аварий в рамках ТОБ в НИЦ «Курчатовский институт» применяется физико-теплогидравлический программный комплекс ATHLET/BIPR-VVER.

Комплекс ATHLET/BIPR-VVER применялся для анализа безопасности многих проектах реакторов ВВЭР и топливных циклов ВВЭР.

Параметры состояния топливных элементов (температура топлива и оболочки твэл, энтальпия топлива, запас до кризиса теплообмена) определяются в процессе связанного физико-теплогидравлического моделирования поведения РУ в аварийных событиях. В расчетах комплекса ATHLET/BIPR-VVER нейтронно-физическое моделирование реактора в стационарных состояниях и переходных процессах проводится программой БИПР-8, теплогидравлическое моделирование реактора, первого, второго контура и систем безопасности проводится программой ATHLET.

Программа БИПР-8 проводит нодальное (покассетное) нейтронно-физическое моделирование реактора. Однако, топливные кассеты реакторов ВВЭР содержат в своих конструкциях значительные неоднородности. Конструкционные каналы, поглощающие элементы и твэлы с различным обогащением влияют на структуру нейтронного поля внутри кассет. В анализах реактивных аварий, проводимых по комплексу ATHLET/BIPR-VVER, для расчета экстремальных параметров состояния топливных элементов, в наиболее теплонапряженной топливной кассете выделяется Горячий канал (ГК). ГК соответствует твэлу, которому в стационарном состоянии перед началом аварийного процесса приписывается относительное энерговыделение, соответствующее предельно допустимой линейной мощности твэла, определенной в проекте. В ходе моделирования переходного процесса относительное энерговыделение в ГК не изменяется.

Расчет и использование при моделировании ГК потвэльного энерговыделения в быстрых нестационарных нейтронно-физических процессах является актуальной задачей для анализа реактивных аварий с помощью комплекса ATHLET/BIPR-VVER.

Определение потвэльного энерговыделения позволит более детально моделировать параметры состояния топливных элементов, которые в процессе анализа безопасности сравниваются с приемочными критериями.

Использование в программе БИПР-8 суперпозиции пробных функций для поиска решения нейтронного потока, делает возможным восстановление гомогенного решения для нейтронных потоков внутри узлов. Для того чтобы рассчитать потвэльные энерговыделения, для каждого твэла (твэга) суммируются по энергетическим группам произведения гомогенных нейтронных потоков, потвэльных макроскопических сечений энерговыделения и относительных потвэльных потоков, которые заранее подготавливаются программой ТВС-М. Такой способ может быть использован как в стационарных состояниях реактора, так и в расчетах изменения потвэльного энерговыделения в переходных процессах.

Перечень программ и программных комплексов, использующихся в нейтронно-физических расчетах реакторов ВВЭР, приведен соискателем в диссертации. Программные комплексы, используемые для расчетов реактивностных аварий (ТИГР-1, ТРАП-КС, НОСТРА, РАДУГА) проводят покассетные нейтронно-физические расчеты. На данный момент в реакторных расчетах используется ряд программ, которые проводят потвэльные нейтронно-физические расчеты активных зон реакторов ВВЭР (ПЕРМАК-А, МСУ, UNK). Такие программы не имеют возможности рассчитывать трехмерное изменение потвэльного энерговыделения в быстрых нестационарных процессах.

Программный комплекс БАРС может проводить потвэльный расчет быстрых аварийных процессов в реакторах ВВЭР. Однако, подобные расчеты по программе БАРС занимают значительное время, что играет существенную роль в проектных расчетах анализа безопасности, при которых требуется моделирование серии событий (100 расчетов и более) для каждого исходного аварийного процесса.

**Целью диссертационной работы** является создание методики, позволяющей проводить нейтронно-физический расчет распределения потвэльного энерговыделения в быстрых аварийных процессах в реакторах ВВЭР. При этом методика должна обладать следующими свойствами:

- Расчет распределения потвэльного энерговыделения должен являться частью связанного физико-теплогидравлического расчета реакторной установки по программному комплексу ATHLET/BIPR-VVER;

- Результаты потвэльного расчета должны использоваться для определения параметров состояния топлива (температура и энтальпия топлива, температура оболочки твэл и запас до кризиса теплообмена);

- Расчет распределения потвэльного энерговыделения должен занимать приемлемое время.

Для достижения этой цели соискателем была разработана методика восстановления потвэльного энерговыделения в программе БИПР-8. Под восстановлением потвэльного энерговыделения в программе БИПР-8 понимается процедура, в которой вначале для каждого твэла (твэга) определяются значения гомогенных нейтронных потоков в двух энергетических группах, а затем для определения потвэльного энерговыделения для каждого твэла (твэга) суммируются по энергетическим группам произведения гомогенных нейтронных потоков, потвэльных макроскопических сечений энерговыделения и относительных потвэльных потоков, которые заранее подготавливаются программой ТВС-М.

В рассматриваемом ноде распределение относительного потвэльного энерговыделения рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon = \Phi_F^{гом} \cdot \varepsilon \sum_F^f \cdot \frac{\Phi_F^{спек}}{\Phi_F^{спек}} + \Phi_T^{гом} \cdot \varepsilon \sum_T^f \cdot \frac{\Phi_T^{спек}}{\Phi_T^{спек}}$$

Где,  $\varepsilon$  - энерговыделение в твэле (твэге) в рассматриваемом ноде;

$\Phi_{F/T}^{гом}$  - гомогенное решение для потоков нейтронов быстрой/тепловой групп в твэле (твэге) (рассчитываются программой БИПР-8);

$\varepsilon \sum_{F/T}^f$  - потвэльное макроскопическое сечение энерговыделения для твэла (твэга) для быстрой/тепловой энергетической группы (рассчитываются программой ТВС-М);

$\frac{\Phi_{F/T}^{спек}}{\Phi_{F/T}^{спек}}$  - отношение потока нейтронов в твэле (твэге) к среднему потоку в топливной кассете в быстрой/тепловой энергетической группе (рассчитываются программой ТВС-М);

**Практическая значимость** работы заключается в том, что использование распределения потвэльного энерговыделения для расчета параметров состояния топлива, которые сравниваются с требованиями приемочных критериев (температура и энтальпия топлива, температура оболочки твэл и запас до кризиса теплообмена), позволит повысить детализацию описания параметров состояния.

Распределения потвэльного энерговыделения позволят оценить возможность повреждения твэлов, количество поврежденных твэлов и выход активности в теплоноситель во время проведения анализа безопасности.

Для расчетов потвэльного энерговыделения был создан модуль восстановления, который интегрирован в код БИПР-8. В программу ТВС-М были внесены изменения, позволяющие подготавливать потвэльную библиотеку для модуля восстановления. Для расчетов аварийных процессов модуль восстановления в составе кода БИПР-8 был интегрирован в программный комплекс ATHLET/BIPR-VVER.

**Научная новизна** работы заключается в том, что методика восстановления потвэльных полей энерговыделения впервые позволяет на основе нодального (покассетного) нейтронно-физического расчета определять изменения потвэльного энерговыделения в быстрых переходных процессах. Впервые в массовых проектных расчетах реакторов ВВЭР появляется возможность проводить нейтронно-физический расчет распределения потвэльного энерговыделения при моделировании реактивных аварий в реакторах ВВЭР.

**Достоверность представленных в работе результатов** обоснована теоретическим анализом и результатами расчетов стационарных состояний, полученных с помощью модуля восстановления, в сравнении с результатами аттестованных программ, проводящих стационарные нейтронно-физические расчеты потвэльного энерговыделения.

Параметры состояния топливных элементов в аварийных переходных процессах, полученные с использованием модуля восстановления, сравнивались с соответствующими параметрами состояния, полученными при использовании современных моделей описания твэлов, применяемых в анализе безопасности на данный момент.

**В диссертации дается описание и выносятся на защиту работа соискателя по разработке методики восстановления потвэльных полей энерговыделения в активных зонах реакторов ВВЭР.**

**Личный вклад автора** включает в себя:

- Развитие методики восстановления потвэльных полей энерговыделения для реакторов типа ВВЭР в программе БИПР-8;
- Создание модуля восстановления и его интеграция в код программы БИПР-8;
- Разработка в программе ТВС-М формата нейтронно-физической библиотеки для потвэльного расчета;
- Проведение верификационных расчетов модуля восстановления в стационарных состояниях;
- Интеграция модуля восстановления, в составе программы БИПР-8, в физико-теплогидравлический программный комплекс ATHLET/BIPR-VVER;
- Проведение тестовых расчетов нестационарных процессов.

### **Апробация работы**

Основные результаты опубликованы в двух статьях в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Материалы докладывались на 4 международных конференциях и на НТС отделения ВВЭР НИЦ Курчатовский институт.



## Публикации

Список публикаций приведен в конце автореферата.

## Структура и объем работы

Во введении представлено обоснование актуальности работы, сформулированы цель работы и основные положения, выносимые на защиту, научная новизна работы и личный вклад автора. Приводится описание истории развития в отделении ВВЭР Курчатовского Института основных программ, использующихся для расчета нейтронно-физических процессов, происходящих в активных зонах ядерных реакторов типа ВВЭР. А также обзор последовательного развития кодов и методик, использующихся в анализе безопасности реактивных аварий, как в России, так и за рубежом.

Глава 1 содержит теоретическое описание процедуры восстановления потвэльных полей энерговыделения в программе БИПР-8, описание нейтронно-физических констант, использующихся при восстановлении потвэльного энерговыделения, их аппроксимации и программной реализации модуля восстановления в коде программы БИПР-8.

В коде БИПР-8 быстрый и тепловой нейтронные потоки определяются в следующем виде:

$$\Phi_F = X + tY, \quad \Phi_T = rX + Y$$

где  $X$  – асимптотическая мода решения;  $Y$  – переходная мода решения;  $r$  и  $t$  – коэффициенты связки.

В гомогенизированных шестигранных ячейках с шагом  $h$  асимптотическая мода решения  $X_r(r, \varphi)$  представляется разложением в ряд по пробным функциям с сохранением семи членов разложения:

$$X_r(r, \varphi) = \sum_{m=0}^6 A_m Z_m(r) \cos(m\varphi - \delta_m) \quad (1)$$

где  $\delta_m$  - сдвиги фаз,  $A_m$  - весовые факторы;  $r$  и  $\varphi$  координаты точки, в которой определяется асимптотическая мода потока нейтронов;

$Z_m$  набор пробных функций, которые удовлетворяют диффузионному уравнению (в случае гомогенных нодов эти пробные функции есть функции Бесселя):

$$Z_m(r) = \begin{cases} J_m(B_r r); & B_r^2 > 0 \\ I_m(B_r r); & B_r^2 < 0 \end{cases} \quad J \quad \text{и} \quad I \quad - \quad \text{цилиндрические функции}$$

действительного и мнимого аргумента.

Учет аксиальной зависимости асимптотической и переходной мод решения приведен в диссертации.

Использование в программе БИПР-8 суперпозиции пробных функций для поиска решения нейтронного потока, делает возможным восстановление гомогенного решения для нейтронных потоков внутри нодов. Восстановление гомогенного решения в каждый момент времени происходит после завершения итераций по поиску нодального решения и не влияет на распределение нодального решения.

Перепишем выражение (1) для асимптотической моды в следующей форме:

$$X_r(r, \varphi) = \sum_{m=0}^6 (\Psi_{cm} Z_m(r) \cos(m\varphi) + \Psi_{sm} Z_m(r) \sin(m\varphi)) \quad (2)$$

где

$$\Psi_{cm} = A_m \cos(\delta_m), \quad \Psi_{sm} = A_m \sin(\delta_m)$$

Слагаемые  $\Psi_{cm}$  и  $\Psi_{sm}$ , входящие в состав (2), определяются из нодального расчета.

Семь функций Бесселя раскладываются в математический ряд, для их представления в (2).

Зная все слагаемые, входящие в (2), можно восстановить значения асимптотической моды внутри топливных кассет.

Быстро затухающая при удалении от границы раздела сред переходная мода решения  $Y$ :

$$Y(r) = Y^{\nu} e^{-\nu\left(\frac{h}{2}-r\right)},$$

где  $Y^{\nu}$  - значение функции  $Y$  на границе раздела двух соседних ячеек, определяется кодом БИПР-8 в процессе нодального расчета;

$h$  – шаг шестигранной призмы (нода);  $\nu$  - собственное число для переходной моды решения, определяющееся при нодальном расчете.

Таким образом, можно определить в точках расположения твэлов (твэгов) внутри топливных кассет значения гомогенного решения для потоков нейтронов в двух энергетических группах в программе БИПР-8.

Для расчета распределения потвэльного энерговыделения в активной зоне реактора необходимо подготовить потвэльную нейтронно-физическую библиотеку макроскопических сечений энерговыделения и учесть микрополе внутри топливных кассет.

Потвэльная нейтронно-физическая библиотека, также как и гомогенизированная библиотека для нодального нейтронно-физического расчета, подготавливается спектральной программой ТВС-М. Для последующего восстановления микрополя внутри топливных кассет, потвэльные сечения энерговыделения умножаются на относительные потвэльные потоки нейтронов.

Программа ТВС-М усредняет сечение энерговыделения до тепловой и быстрой энергетических групп в каждом твэле:

$$\varepsilon \sum_{T/F}^f = \frac{\sum_{i \in T/F} \varepsilon \sum_i^f \cdot \Phi_i}{\sum_{i \in T/F} \Phi_i}$$

Где  $\varepsilon \sum_i^f$  - макроскопическое сечение энерговыделения в твэле. Индекс  $i$ , означает индекс энергетической группы, индекс твэла опущен, т.к. имеются в виду потвэльные сечения.

Далее полученное сечение умножается на относительный поток в соответствующем твэле:

$$E_{T/F} = \frac{\sum_{i \in T/F} \varepsilon \Sigma_i^f \cdot \Phi_i}{\sum_{i \in T/F} \Phi_i} \cdot \frac{\sum_{i \in T/F} \Phi_i}{\sum_K \sum_{i \in T/F} \Phi_i} = \frac{\sum_{i \in T/F} \varepsilon \Sigma_i^f \cdot \Phi_i}{\sum_K \sum_{i \in T/F} \Phi_i}$$

где суммирование с индексом  $K$  в знаменателе означает суммирование по всей кассете.

Подготовленная таким образом потвэльная нейтронно-физическая библиотека отражает в себе распределение локальных энерговыделений с учетом наличия твэгов, профилирования обогащения, трубок и других неоднородностей.

Полученные величины для каждой топливной кассеты записываются программой ТВС-М в файл потвэльной библиотеки.

Для аппроксимации потвэльных констант внутри программы БИПР-8 используется принцип разложения в ряд Тейлора. В потвэльную библиотеку для каждого шага по выгоранию записываются константы при “опорных” значениях параметров состояния топливной решетки и производные первого, второго порядка и смешанные производные по параметрам: температура и плотность замедлителя ( $\gamma$ ,  $T_M$ ), температура топлива ( $T_F$ ), концентрация бора в замедлителе ( $C_B$ ) и концентрация Xe-135 и Sm-149 ( $\rho_{Xe}$ ,  $\rho_{Sm}$ ). Актуальные значения констант при “опорных” значениях параметров и производные по параметрам рассчитываются как линейная интерполяция между двумя ближайшими точками по выгоранию топлива.

Аппроксимация по параметрам:  $\gamma$ ,  $T_M$ ,  $T_F$ ,  $C_B$ ,  $\rho_{Xe}$ ,  $\rho_{Sm}$  производится от их средних в нодах значений, т.е. так же как в нодальном расчете. Тот факт, что при моделировании переходных процессов учитываются обратные связи по средним нодальным параметрам, приводит к тому, что значения относительного энерговыделения в пике мощности переходного процесса в наиболее энергонапряженных твэлах будут

завышены. Учет потвэльного распределения параметров, приведенных выше, привел бы к тому, что значения этих параметров в наиболее энергонапряженных твэлах были бы более консервативны, чем их средние значения по ноду (температура топлива и теплоносителя выше, плотность теплоносителя ниже). Это в свою очередь привело бы к тому, что вследствие эффектов обратных связей энерговыделение в этих твэлах уменьшилось. Таким образом, аппроксимация потвэльных констант в зависимости от средних по ноду параметров, приведенных выше, с точки зрения оценки последствий переходных процессов является консервативной.

На основе методики восстановления был создан программный модуль и интегрирован в код программы БИПР-8. В программу ТВС-М были внесены изменения, позволяющие подготавливать потвэльную библиотеку для модуля восстановления.

В **Главе 2** для демонстрации точности методики восстановления показаны сравнительные расчеты.

Сравнивались результаты потвэльного расчета программы БИПР-8 с интегрированным модулем восстановления потвэльного энерговыделения и результаты расчета аттестованных программ, проводящих аналогичные расчеты. Расчеты проводились в стационарных состояниях.

Для проверки работы подпрограмм модуля восстановления, которые считывают, аппроксимируют и передают внутри модуля потвэльные константы, был проведен расчет одной топливной кассеты. Результаты, полученные с помощью программы БИПР-8 с модулем восстановления, сравнивались с результатами, полученными по программе ТВС-М.

Проверочный расчет для одной кассеты показал отличие результатов не превышающее 0,04 %. Такой результат обусловлен плоским гомогенным решением внутри кассеты. Малое различие результатов говорит о верной работе модуля восстановления.

Для проверки точности методики восстановления потвэльного энерговыделения проводилось сопоставление результатов потвэльного



На примере этой задачи можно проверить точность описания модулем восстановления потвэльного энерговыделения в свежих кассетах и кассетах с различным выгоранием, которые в предыдущую загрузку находились в другом положении. А также потвэльное энерговыделение в твэгах с различным выгоранием, и в твэлах, соседствующих с твэгами и с конструкционными каналами.

Первые сопоставления потвэльного расчета активной зоны показали значительное расхождение результатов расчета распределения потвэльного поля энерговыделения в кассетах с неоднородным выгоранием. Для повышения точности модуля восстановления в расчетную схему была добавлена аппроксимация потвэльных констант в зависимости от выгорания в твэлах.

Потвэльная аппроксимация от выгорания позволила повысить точность описания кассет с неравномерным выгоранием. Картограмма распределения максимальных отклонений результатов (абсолютные значения) потвэльного расчета в кассетах, полученных с помощью модуля восстановления и программы ПЕРМАК-А, приведена на рисунке 2.

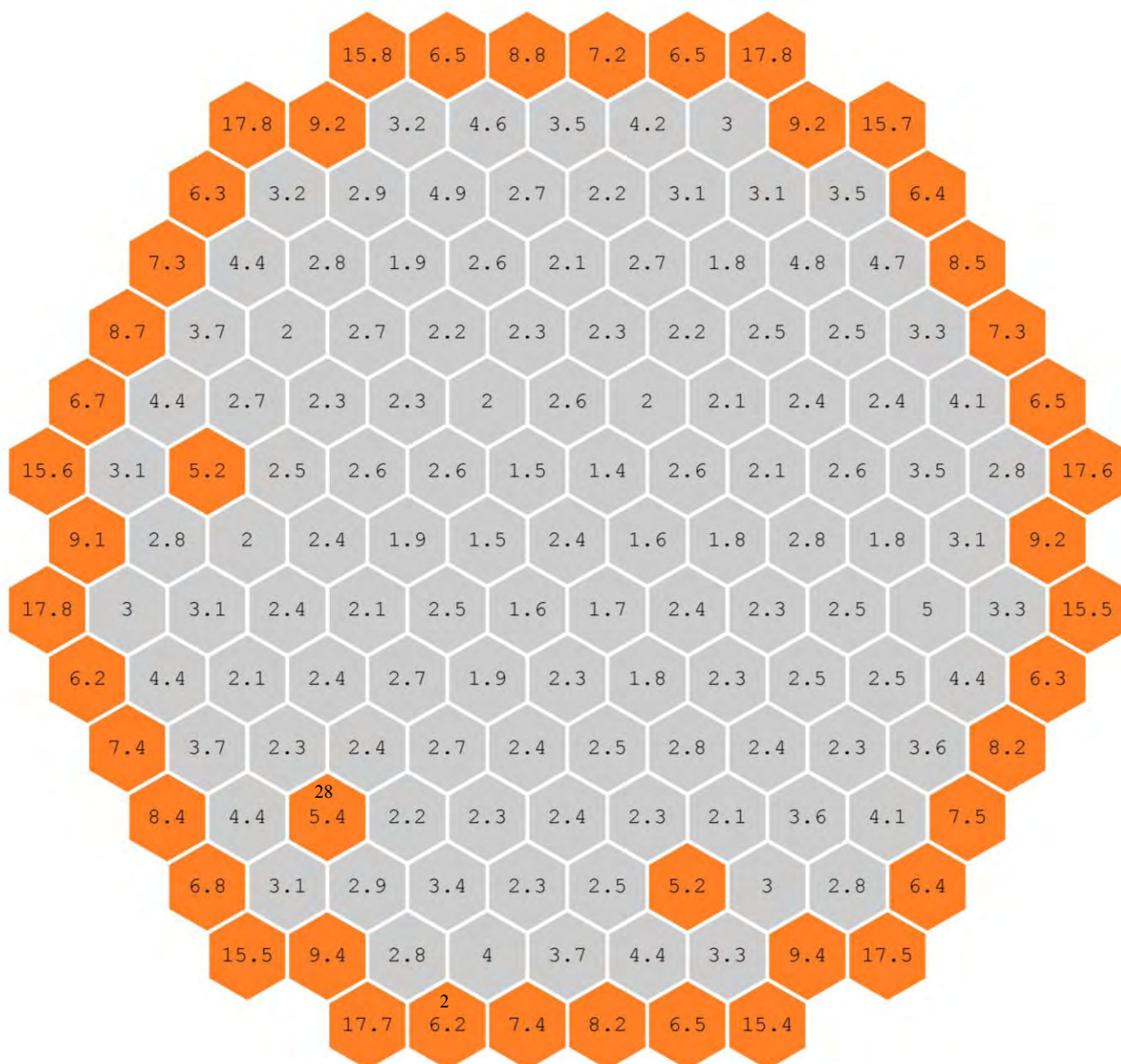


Рисунок 2 - Покассетная картограмма распределения максимальных отклонений потвэльных расчетов (%) в каждой кассете для программ ПЕРМАК-А и модуля восстановления.

Максимальное отклонение в потвэльном расчете, превышающее 5 %, присутствует в периферийных кассетах и в трех кассетах, расположенных в третьем ряду относительно границы. Отличие в потвэльном расчете для кассет № 2 и 28, представлено на рисунках 3 и 4. Зеленым цветом на рисунках выделены ячейки, содержащие твэги, белым цветом – содержащие



трубки и конструкционные каналы, красным выделены ячейки с максимальными отклонениями.

Как видно из рисунка 2, максимальное отличие результатов в периферийной кассете № 2 сконцентрировано вблизи отражателя и при удалении от него убывает. Энерговыведение в твэлах, которые прилегают к отражателю минимально и поэтому в них не достигаются опасно высокие температуры в таких аварийных процессах, как, например, выброс ОР СУЗ из реактора.

Максимальное отличие результатов в кассете № 28 находится в угловой ячейке и спадает от удаления от этой ячейки.

Как видно из результатов проведенного сопоставления на рисунках 2 – 4, модуль восстановления потвэльного энерговыведения описывает энерговыведения в твэгах и твэлах, соседствующих с твэгами и конструкционными трубками с хорошей точностью.

В центральной части активной зоны реактора (кассеты, расположенные в четвертом ряду относительно границы и далее) максимальное отклонение не превышает 3 %.

Тестовая задача, на примере проведенного сопоставления, демонстрирует хорошую точность методики восстановления потвэльного энерговыведения.

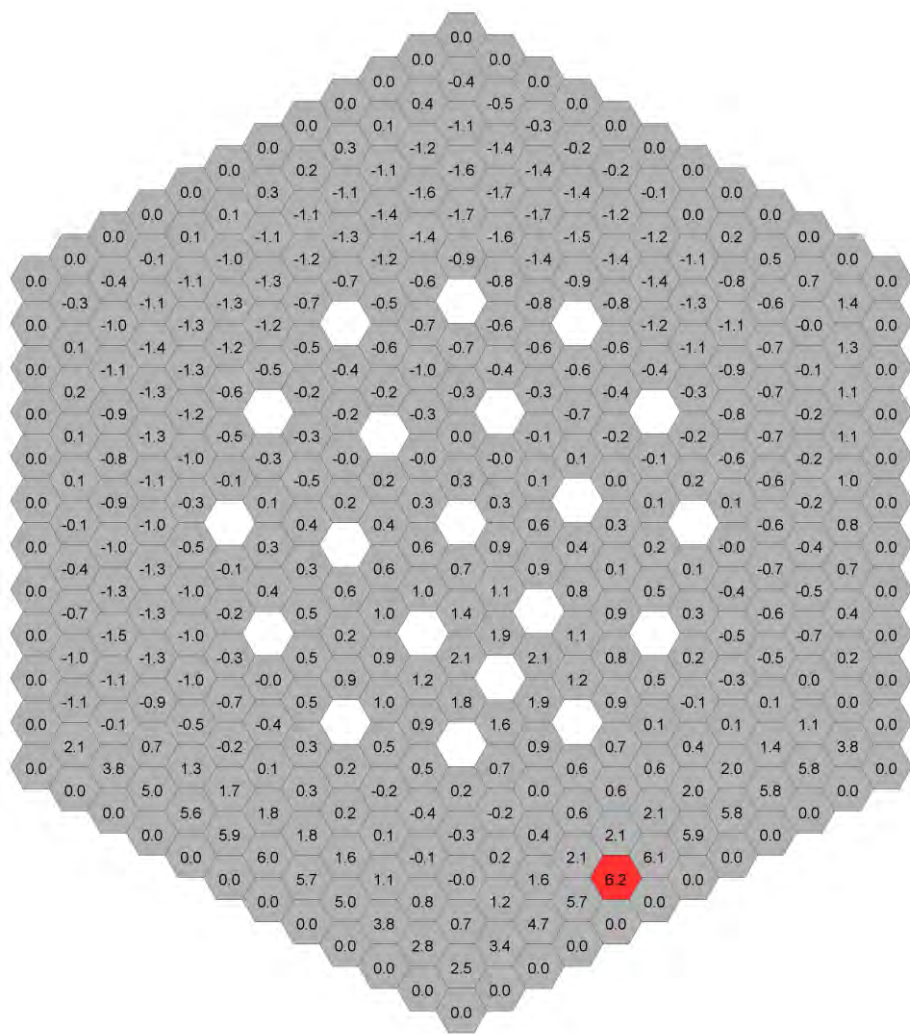


Рисунок 3 – Отличие результатов потвэльного расчета в  
кассете № 2, %

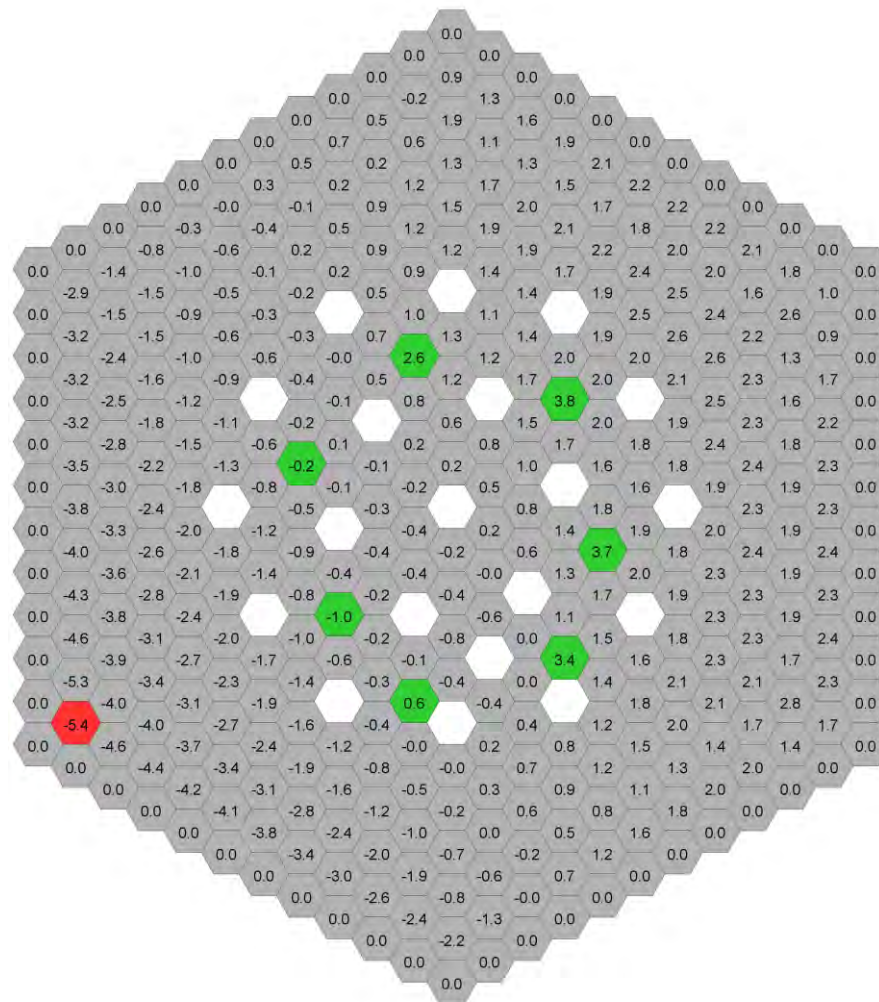


Рисунок 4 - Отличие результатов потвэльного расчета в  
кассете № 28, %

В **Главе 3** приводится описание тестового расчета реактивной аварии с помощью комплекса ATHLET/BIPR-VVER с использованием модуля восстановления потвального энерговыделения. Рассматриваются изменения нейтронно-физических параметров активной зоны в аварийном процессе.

Для проведения моделирования нейтронно-физических переходных процессов модуль восстановления в составе программы БИПР-8 был интегрирован в программный комплекс ATHLET/BIPR-VVER.

В качестве исходного события была выбрана проектная авария «выброс ОР СУЗ управляющей группы из активной зоны реактора». Под выбросом ОР СУЗ управляющей группы понимается внезапное быстрое перемещение стержня ОР СУЗ из начального в крайнее верхнее положение. В рассматриваемом процессе для достижения большей неравномерности поля энерговыделений работа аварийной защиты не моделировалась. Параметры модельной задачи перед исходным событием приводятся в диссертации.

В работе соискателем представлено моделирование исходного события для состояния реактора на полной мощности и на МКУ мощности. Состояние на МКУ мощности интересно тем, что в этом состоянии вес выбрасываемого стержня ОР СУЗ рабочей группы больше чем в состоянии на полной мощности. Это приводит к большей относительной деформации нейтронного поля во время аварийного процесса.

Изменение мощности реактора в переходном аварийном процессе для состояния на МКУ мощности показано на рисунке 5.

Как показано на рисунке 6 потвальное энерговыделение рассчитывалось в кассете № 93, граничащей с кассетой, из которой выбрасывается стержень ОР СУЗ. Для рассмотрения была выбрана кассета № 93, т.к. из-за ее близости к кассете, из которой выбрасывается стержень ОР СУЗ, в ней достигается наибольшее изменение распределения потвального энерговыделения.

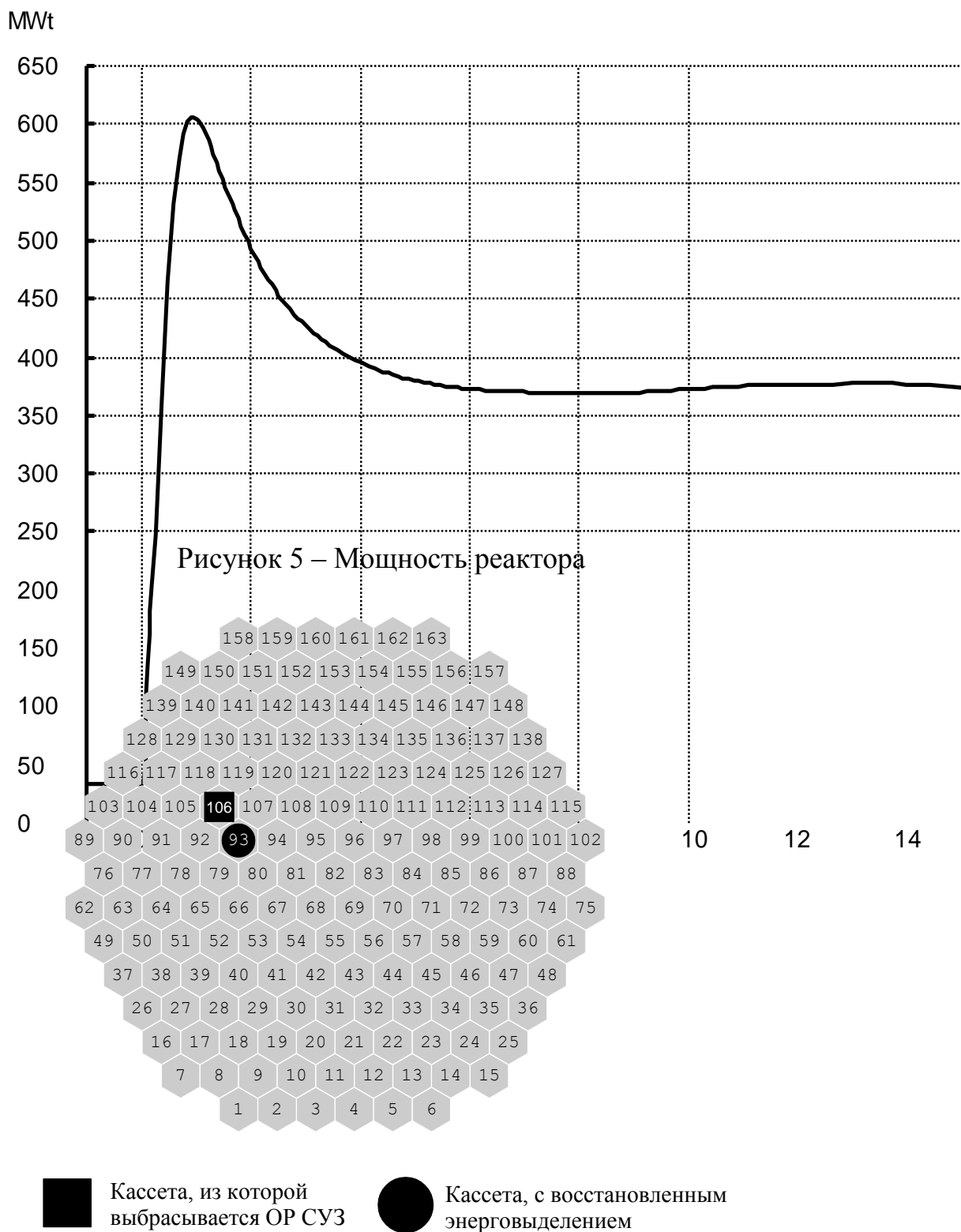


Рисунок 6 – Картограмма активной зоны реактора

Распределения потвзельного энерговыделения перед исходным событием и в момент времени 0,97 с (пик мощности реактора) показаны на рисунках 7 и 8.

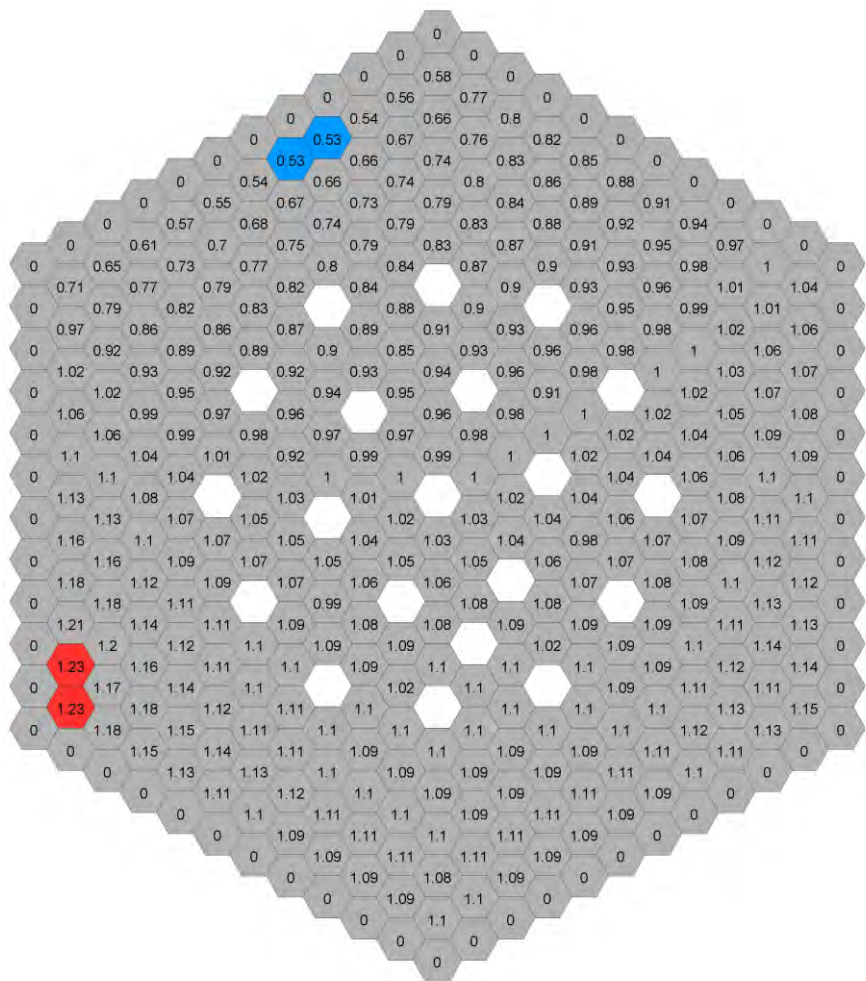


Рисунок 7 - Распределение относительных энерговыделений в кассете № 93 перед началом переходного процесса

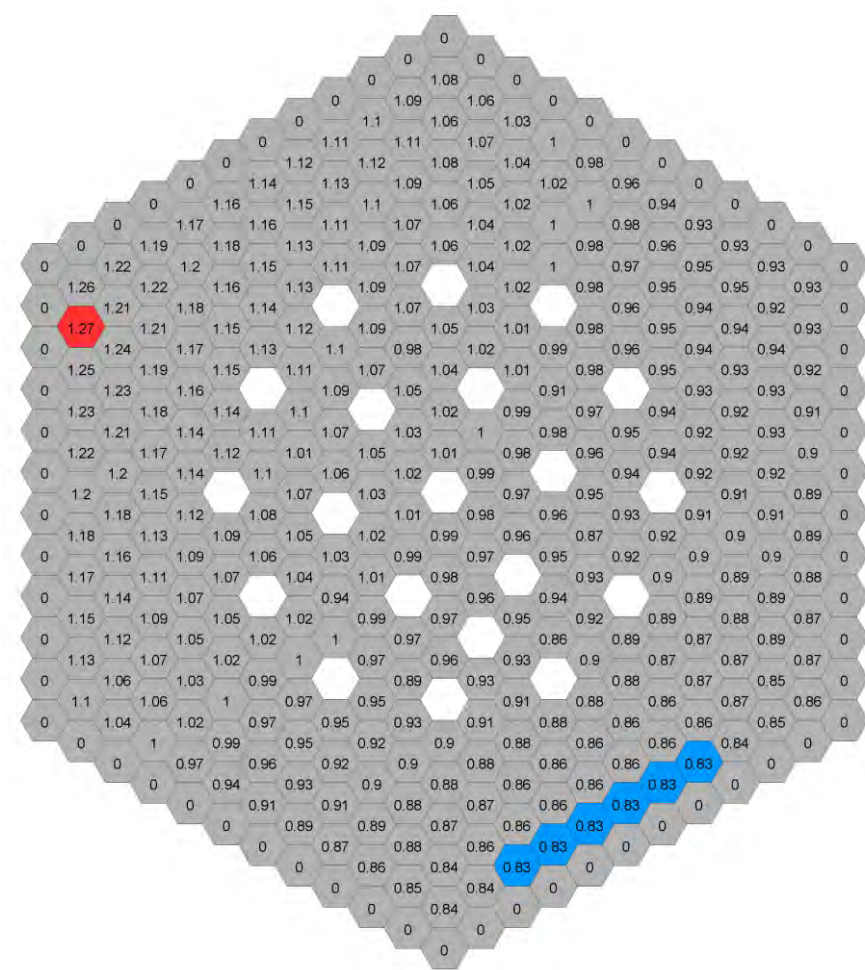


Рисунок 8 - Распределение относительных энерговыделений в кассете № 93 в момент времени 0,97 с после начала переходного процесса (пик мощности).

Как видно из рисунков, результаты модуля восстановления потвэльного энерговыделения соответствуют характеру моделируемого процесса и местоположению рассматриваемой кассеты относительно кассеты, из которой выбрасывается ОР СУЗ (в ней находится пик мощности в аварийном процессе).

Полученные с помощью модуля восстановления результаты дают более детальную информацию о распределении нейтронного поля в ходе переходного процесса и позволяют определить самый теплонапряженный твэл в выбранной кассете.

В **Главе 4** обсуждается применение потвэльного энерговыделения, полученного с помощью модуля восстановления, для описания параметров состояния топлива (температура топлива и оболочки твэлов, энтальпия топлива, запас до кризиса теплообмена) в переходных аварийных процессах. В работе показаны результаты для температуры топлива и минимального запаса до кризиса теплообмена.

Для модельной задачи, представленной в Главе 3, соискателем было проведено сравнение параметров состояния топлива, полученных с помощью модуля восстановления с параметрами, полученными по различным моделям описания энерговыделения в твэлах в переходных процессах.

Моделирование аварийного процесса с применением нодального нейтронно-физического расчета проводилось с помощью программного комплексу ATHLET/BIPR-VVER. Параметры состояния топливных элементов рассчитывались теплогидравлической частью комплекса: кодом ATHLET с учетом энерговыделения этих топливных элементов, рассчитанных нейтронно-физической частью комплекса: кодом БИПР-8. Моделирование процесса с использованием точечной кинетики осуществлялось отдельно с помощью кода ATHLET. Параметры состояния топливных элементов рассчитывались в Горячих каналах (ГК), которые в нодальном расчете были выделены в наиболее теплонапряженной в данном аварийном процессе кассете № 117.



Рассмотренные модели расчетов твэлов показаны в таблице № 1.

Таблица 1. Используемые модели описания твэл в переходном процессе.

№	Модель нейтронно-физического расчета реактора	Модель описания твэла
ГК 1	Нодальный расчет	Восстановление потвэльного энерговыделения. Использовалось энерговыделение в твэле № 29 кассеты 117 (наиболее теплонапряженный твэл в переходном процессе)
ГК 2	Нодальный расчет	Кассета 117, твэл со средним энерговыделением на протяжении всего переходного процесса (относительное энерговыделение равно 1,0 и не изменяется в переходном процессе)
ГК 3	Нодальный расчет	Кассета 117, твэл с максимально допустимой линейной мощностью в стационарном состоянии 448 Вт/см, при условии не превышения суммарной мощности 113 кВт (относительное энерговыделение находится в стационарном состоянии и не изменяется в переходном процессе)
ГК 4	Точечная кинетика	Твэл с максимально допустимой мощностью в стационарном состоянии перед аварийным процессом 113 кВт

Изменения мощности в ходе аварийного процесса в расчетах с трехмерной и точечной кинетикой показаны на рисунке 9. Изменения максимальной температуры топлива для четырех расчетных моделей описания твэла показаны на рисунке 10.

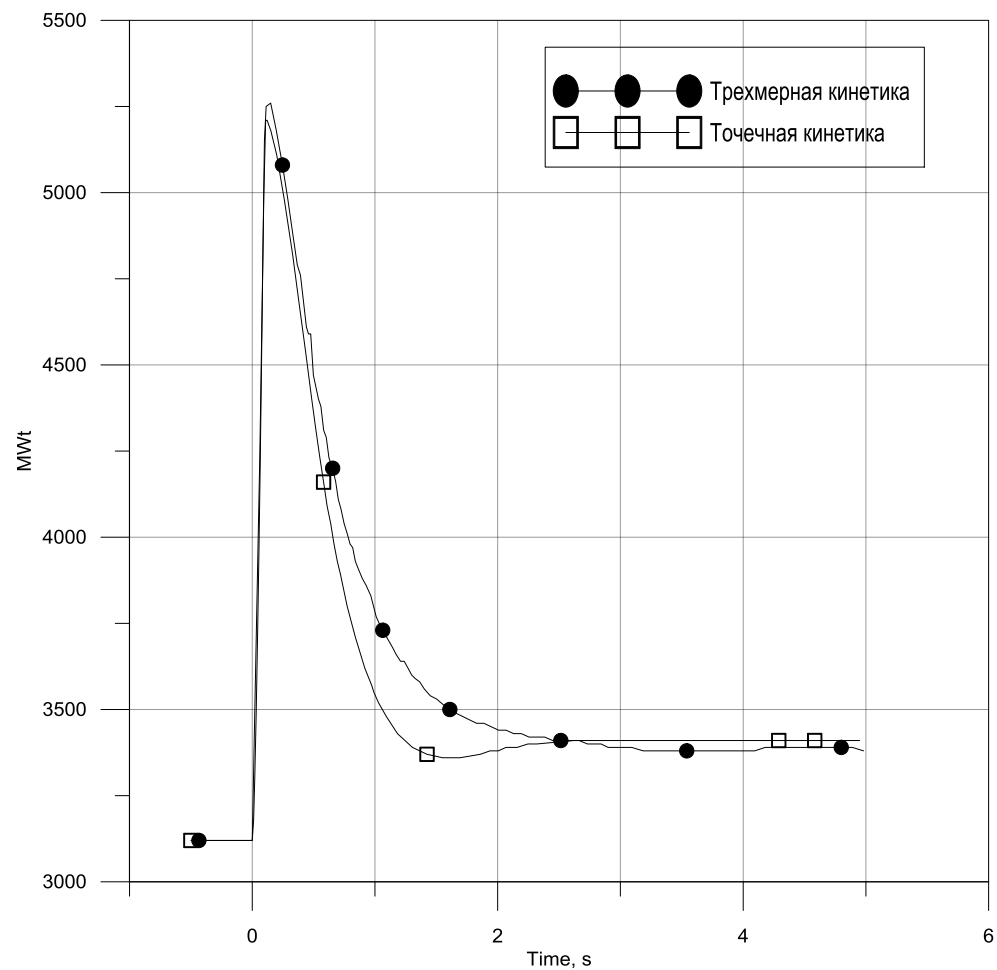


Рисунок 9 – Мощность реактора, МВт

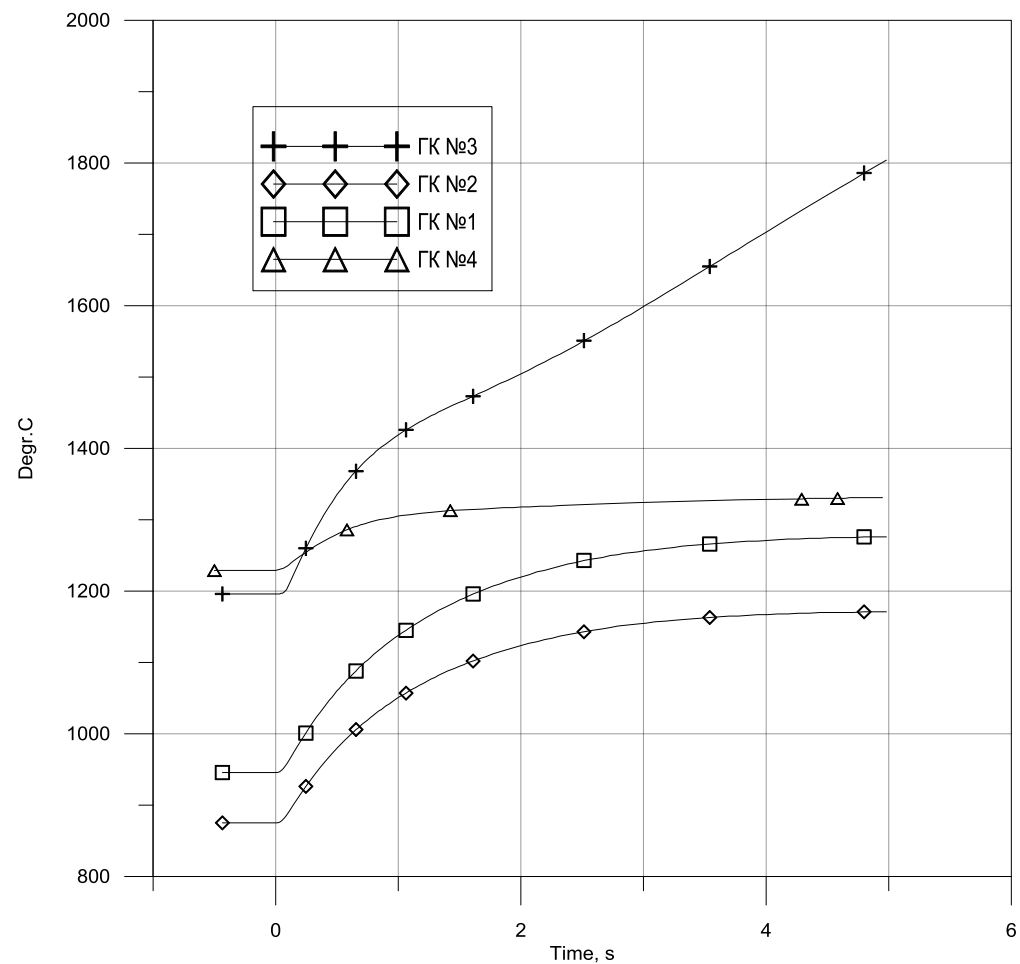


Рисунок 10 – Максимальная температура топлива для четырех расчетных моделей описания твэла



Таблица 2. Параметры, достигнутые в переходном аварийном процессе

№	Максимальная температура топлива, °С	Минимальный запас до кризиса теплообмена, отн. ед.	Относительное энерговыделение в твэле, отн. ед.
ГК 1	1277	2,04	1,09
ГК 2	1171	1,86	1,00
ГК 3	1795	1,00	1,43
ГК 4	1333	1,15	1,00

Из результатов проведенного расчета видно, что температура топлива, полученная с применением модуля восстановления, ниже температуры топлива, полученной при использовании модели твэла с максимальной допустимой мощностью в нодальном расчете и модели точечной кинетики. Это объясняется тем, что относительное энерговыделение, рассчитанное с помощью модуля восстановления в самом энергонапряженном твэле, оказывается меньше относительного энерговыделения, которое приписывается твэлу, чтобы сделать его соответствующим максимальной линейной мощности 448 Вт/см в нодальном расчете. А также, мощность твэла в стационарном состоянии перед аварийным процессом, рассчитанная с помощью модуля восстановления, оказывается меньше мощности твэла, описываемого точечной кинетикой.

Для рассмотренного выше аварийного процесса соискателем были проведены расчеты при варьировании основных нейтронно-физических параметров, влияющих на его протекание: эффективности выбрасываемого ОР СУЗ и коэффициента реактивности по температуре топлива. К номинальным значениям этих параметров были добавлены положительные и отрицательные возмущения. Рассматривались результаты, полученные в четырех ГК, описываемых выше.

Значения варьируемых параметров и результатов расчетов представлены в таблице 3.

Приняты следующие сокращения:

Eff – эффективность выбрасываемого ОР СУЗ, %;

UTC – коэффициент реактивности по температуре топлива,  $10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ;

T1...4 – максимальная температура топлива в ГК № 1...4,  $^\circ\text{C}$ .

Таблица 3. Значения варьируемых параметров и максимальной температуры топлива.

№ расчета	Eff	UTC	T1	T2	T3	T4
1	0,2	-5,04	1149	1050	1549	1304
2	0,3	-5,04	1243	1145	1716	1329
3	0,4	-5,04	1338	1229	1752	1360
4	0,2	-4,20	1198	1101	1601	1307
5	0,3	-4,20	1277	1171	1795	1333
6	0,4	-4,20	1397	1282	1832	1368
7	0,2	-3,36	1210	1116	1613	1312
8	0,3	-3,36	1333	1232	1802	1340
9	0,4	-3,36	1467	1348	1883	1377

В зависимости от значений эффективности выбрасываемого ОР СУЗ и коэффициента реактивности по температуре теплоносителя меняются результаты расчетов параметров топлива. При характерных для ВВЭР сочетаниях эффективности выбрасываемого ОР СУЗ и значений Допплер коэффициента реактивности для реактора на номинальной мощности амплитуда импульса мощности составляет от 1,5 до 2,3 относительно исходной мощности, а полуширина импульса составляет 0,5 – 1,0 секунды.

Наиболее консервативные параметры достигаются в расчете № 9, которому соответствует эффективность выбрасываемого ОР СУЗ 0,4 % – наибольшая в расчетах и наименьшего коэффициента реактивности по температуре топлива – минус  $3,36 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ .

Результаты, полученные с варьированием параметров, подтверждают результаты, полученные ранее. Параметры топлива в ГК № 1 менее консервативны, чем в ГК № 3, что объясняется повышенной мощностью ТВЭЛ в ГК № 3.

В **Заключении** приводятся основные результаты работы.

## **Выводы**

- Разработана методика и программный модуль восстановления потвэльных полей энерговыделения и проведена интеграция модуля восстановления в программу БИПР-8;
- Подготовлено константное обеспечение для модуля восстановления;
- На примере сопоставительных расчетов с аттестованными программами, используемыми в проектных расчетах, продемонстрирована хорошая точностью модуля восстановления в стационарных режимах;
- Модуль восстановления, в составе БИПР-8, был интегрирован в физико-теплогидравлический программный комплекс ATHLET/BIPR-VVER;
- Полученные с помощью модуля восстановления результаты дают более детальную информацию о нейтронном поле в ходе переходного процесса и позволяют определить самый теплонапряженный твэл в рассматриваемых кассетах;
- Параметры состояния топливных элементов в переходных аварийных процессах, вычисленные с применением результатов модуля восстановления, учитывают изменение формы нейтронного поля внутри топливных кассет и дают более детальное описание состояния топлива в реакторе по сравнению с расчетами, полученными только с помощью нейтронно-физической нодальной схемы.

## **Основные публикации по теме диссертации**

Публикации в издании, рекомендованном ВАК России:

1. Гордиенко П.В., Коцарев А.В., Лизоркин М.П., Методика восстановления потвэльных полей энерговыделения в активной зоне реактора типа ВВЭР для программы БИПР-8. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. Выпуск 4, с 26, 2012 г.
2. Гордиенко П.В., Коцарев А.В., Лизоркин М.П., Проселков В.Н. Моделирование аварии с выбросом ОС СУЗ в ВВЭР по комплексу программ ATHLET/BIPR-VVER с восстановлением потвэльного энерговыделения. Атомная энергия. В печати.

Материалы конференций:

2. Gordienko P., Kotsarev A., Lizorkin M. The recovery procedure of pin-by-pin fields of power distribution in the core of VVER type of reactors for the program BIPR-8. AER Working Group D, 06-12 may, Karlsruhe, Germany, 2012
3. Gordienko P., Kotsarev A., Lizorkin M. The recovery procedure of pin-by-pin fields of power distribution in the core of VVER type of reactor for the program BIPR-8. Verification calculations. Symposium of AER 1-5 october, Pruhonice, Czech Republic, 2012.
4. Gordienko P., Kotsarev A., Lizorkin M. The results of the test problems for the recovery procedure of pin-by-pin fields for BIPR-8. AER Working Group D 10-11 april, Paris, France, 2013.
5. Gordienko P., Kotsarev A., Lizorkin M. Results of test calculation reactivity accidents in VVER obtained using recovery module pin-by-pin fields of power, as part of a program complex ATHLET / BIPR-VVER. Symposium of AER September 30 - October 4, Štrbské pleso, Slovakia, 2013.

Автор диссертации выражает глубокую признательность своему научному руководителю Михаилу Петровичу Лизоркину и благодарит сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» за полезные советы и помощь в работе.