М87358

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции,
ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи
УДК 621.039.534

КАВУН ОЛЕГ ЮРЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ С ФИЗИЧЕСКИ БОЛЬШИМИ АКТИВНЫМИ ЗОНАМИ

Специальность 05.14.03
Ядерные энергетические установки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА - 1993

Работа выполнена в Государственном научно-исследовательском проектно-конструкторском и изыскательском институте АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Солонин В.И.

Официальные оппоненты: д.т.н. Малкин С.Д.

к.т.н., доцент Хвостов В.И.

Ведущая организация: Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ)

Защита диссертации сос
специализированного совет
техническом университет
Б-5, 2-я Бауманская ул., д

С диссертацией мо
Н.Э.Баумана.

Автореферат разос

Ученый секретарь
совета, к.т.н., доце

Подписано в печать 24
Типография

М87358

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Основным направлением развития атомной энергетики на современном этапе является создание атомных станций повышенной безопасности на базе ядерных энергетических установок (ЯЭУ) водо-водяного типа. На стадии проектирования ЯЭУ проводится серия вариантных расчетов динамических процессов в реакторных установках как при работе в условиях нормальной эксплуатации РУ, так и при возникновении различного рода аварийных ситуаций. Подавляющее число динамических процессов, приводящих к возможному разуплотнению тепловыделяющих элементов с выходом радионуклидов в окружающую среду приходится на процессы, не связанные с крупными течами из первого контура (т.е. с разрывом, соизмеримым с разрывом главного циркуляционного трубопровода полным сечением).

К таким динамическим процессам относятся:

- полная потеря источников электропитания;
- несанкционированное введением в активную зону избыточной реактивности (выброс органов СУЗ; отказ органов СУЗ на срабатывание; резкое возрастание теплоотвода во второй контур, связанное с отказами БРУ, клапанов или разр зами паропровода полным сечением);
- отказ систем аварийного останова реактора в ситуациях требующих их срабатывания;
- возникновение малых течей из первого контура;
- возникновение произвольных течей из второго контура.

Существенной особенностью указанных переходных процессов является относительно медленное их протекание. При этом моделирование распределения энерговыделения в активной зоне в течении всего переходного процесса оказывает определяющее влияние на конечное состояние, к которому переходит система. Таким образом для широкого спектра динамических процессов необходимо использование моделей, корректно описывающих пространственные эффекты реактивности.

В настоящее время разработано значительное количество программ, успешно моделирующих динамические процессы в реакторных установках водо-водяного типа. К таким отечественным программам относятся программы "ДИНАМИКА", "ТЕЧЬ-М", "МОСТ-7", "МОСТ-10", зарубежные программы: "RELAP5"/(mod1 - mod3), "ATHLET", "CATHARE" и ряд других. В подавляющем большинстве программ используется точечная модель энерговыделения в активной зоне, что не позволяет достаточно корректно прогнозировать состояние конструкции и наступление проектных пределов повреждения активной зоны. В то же время при проведении стационарных расчетов успешно используются трехмерные двухгрупповые стационарные программы (например "БИПР-

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1087358
Кавун О.Ю.Разработка мето
МГТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

7", аттестованный ГАН), позволяющие моделировать стационарные поля энерговыделения с высокой степенью точности.

Совмещение достоинств динамических и стационарных программ при моделировании динамики ЯЭУ позволило бы существенно повысить точность получаемых результатов, а во многих случаях снизить избыточную консервативность результатов проводимых расчетов. Отмеченное определило актуальность создания динамической программы для моделирования переходных и аварийных процессов в ЯЭУ, в которой поля энерговыделения моделируются в трехмерном двухгрупповом покассетном приближении.

Цель работы

1.Разработать математическую модель нестационарного пространственного энерговыделения в активной зоне в двухгрупповом покассетном приближении.

2.Разработать алгоритм и программу для моделирования динамических процессов в ЯЭУ водо-водяного типа с пространственной моделью активной зоны.

3.Провести верификацию программы по результатам экспериментов и путем сравнения результатов расчетов по отдельным модулям программы с результатами расчета по прецизионным стационарным программам.

4. Выполнить расчеты переходных режимов, в которых необходим учет пространственного перераспределения энерговыделения за время переходного процесса.

Научная новизна работы

- впервые применен метод сеток для моделирования поля энерговыделения в двухгрупповом диффузионном приближении с гексагональным размещением кассет в активной зоне. Показана достоверность результатов, получаемых по разработанной методике;
- создан программный комплекс для моделирования динамических процессов в реакторных установках водо-водяного типа с моделированием полей энерговыделения в двухгрупповом трехмерном приближении;
- с помощью программного комплекса исследованы эффекты перераспределения поля энерговыделения в ядерном реакторе в режимах с отказом органов СУЗ.

Практическая ценность работы

Разработанная модель динамики реакторной установки реализована в программном комплексе "Радуга", который широко применяется в институте "АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ" при исследовании вновь разрабатываемых и существующих ЯЭУ.

Программный комплекс "Радуга" используется во ВНИИАМ при моделировании динамических процессов в реакторных установках типа

АСТ.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы представлялись на "семинарах по динамике" проводимых ИАЭ: в 1987г. в г. Димитровграде, в 1988 г. в г. Горьком, в 1992 г. в г. Арзамас-16, в 1990 г. на семинаре МАГАТЭ в г. Москве, на международном семинаре "Теплофизика-90" в г.Обнинске, на международном семинаре по реактивностным авариям в г. Киеве в 1992 г.

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложений.

Автор защищает:

1.Методику моделирования поля энерговыделения в активной зоне ЯЭУ в двухгрупповом диффузионном покассетном приближении методом сеток.

2.Программный комплекс "Радуга" для моделирования динамических процессов в ЯЭУ с пространственной моделью активной зоны.

3.Результаты верификации программного комплекса "Радуга".

4.Результаты расчетных исследований перераспределения пространственного поля энерговыделения в реакторной установке при отказах аварийной защиты реактора.

Содержание работы

Во введении обоснована необходимость моделирования ряда динамических процессов в реакторных установках водо-водяного типа с учетом пространственной модели энерговыделения в активной зоне, сформулирована цель работы.

В главе 1 проанализированы существующие методики и программы для моделирования как теплогидравлических процессов в ЯЭУ, так и программ, применяемых при проведении стационарных нейтронно-физических расчетов.

Наиболее подробное моделирование гидродинамических процессов достигается в последних версиях программ семейства RELAP, а также в программах "CATHARE" и "ATHLET". В этих программах решаются уравнения одномерного двухфазного течения сжимаемой жидкости с учетом присутствия в ней неконденсирующихся газов и растворимых в воде примесей. Однако данная методика требует значительных затрат оперативной памяти и обладают относительно низким быстродействием ("RELAP5/mod2", например, при 500 расчетных объемах занимает около двух мегабайт оперативной памяти и требует на ЭВМ типа CDC Cyber 176 для моделирования 1 секунды физического процесса около 0.15 секунд центрального процессора на один контрольный объем). В тоже время

программы, не предназначенные для моделирования процессов в реакторной установке при тяжелых авариях (например "ДИНАМИКА") и моделирующие теплогидравлические процессы в РУ в приближении течения гомогенной несжимаемой жидкости позволяют моделировать на аналогичных ЭВМ динамические процессы в реальном масштабе времени при существенно более подробной детализации расчетной схемы. Поскольку при моделировании динамических процессов в ЯЭУ с учетом пространственной модели активной зоны необходимо около 6000 контрольных объемов, сделан вывод о целесообразности применения модели одномерного течения гомогенной несжимаемой жидкости.

При анализе существующих методик для моделирования пространственных полей энерговыделения показана необходимость применения двухгруппового диффузионного трехмерного приближения. При применении одногрупповой диффузионной модели не достигается, с одной стороны, достаточная точность расчета профиля энерговыделения (систематическое отклонение в определении профиля покассетного энергораспределения по сравнению с двухгрупповыми методиками достигает 9%). С другой стороны, что более важно при моделировании динамических процессов в активной зоне, по одногрупповой методике не может быть корректно получен характерный для конца топливной кампании "двугорбый" профиль аксиального энергораспределения (**Рис.1.**).

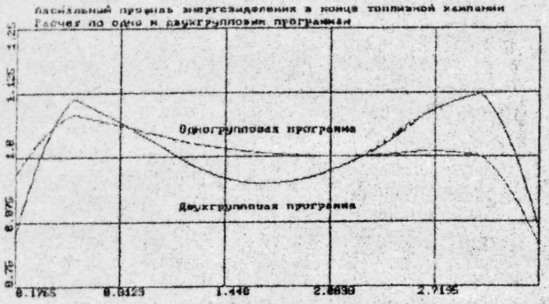


Рис.1

В **главе 2** приведена разработанная физическая и математическая модели динамики реакторной установки. Активная зона моделируется в соответствии со схемой загрузки активной зоны **рис.2**.

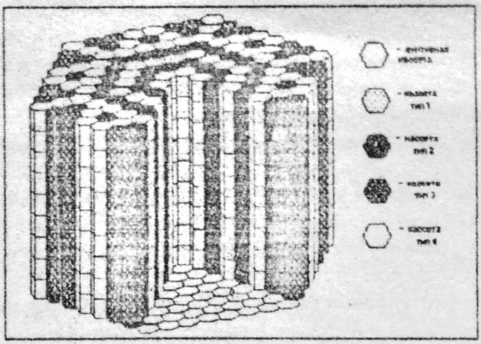


Рис.2.

Уравнение энерговыделения в активной зоне моделируется в двухгрупповом диффузионном покассетном приближении с учетом неограниченного числа групп запаздывающих нейтронов. Исходное дифференциальное уравнение быстрой группы имеет вид:

$$\frac{1}{V_1}\frac{dF_1}{dt} = \mathrm{div}(D_1\,\mathrm{grad}(F_1)) + \Psi(1-\beta) + \sum_{i=1}^{m}\lambda_i C_i - (\Sigma_{зам}+\Sigma_{a1})F_1 .$$

Для тепловой группы:

$$\frac{1}{V_2}\frac{dF_2}{dt} = \mathrm{div}(D_2\,\mathrm{grad}(F_2)) + \Sigma_{зам}F_1 - \Sigma_{a2}F_2 ;$$

где

F - плотность потока нейтронов;

V - скорость нейтронов;

D - коэффициент диффузии;

$\Psi = \nu_{f1}\Sigma_{f1}F_1 + \nu_{f2}\Sigma_{f2}F_2$ - источник нейтронов;

ν_f - выход нейтронов на акт деления;

Σ_f - сечение деления;

λ_i - постоянная распада источников запаздывающих нейтронов i-ой группы;

$\beta = \sum_{i=1}^{m}\beta_i$ - доля запаздывающих нейтронов;

C_i - концентрация источников запаздывающих нейтронов i-ой группы;

$\Sigma_{зам}$ - сечение замедления;

Σ_a - сечение поглощения .

Уравнение для запаздывающих нейтронов:

$$\frac{dC_i}{dt} = \beta_i\Psi - \lambda_i C_i .$$

При решении уравнения переноса нейтронов применен метод сеток. По сравнению с широко используемым в настоящее время методом элементарных балансов метод сеток обладает рядом преимуществ:

- не требуется преобразований исходного дифференциального уравнения в интегро-дифференциальный вид, и следовательно, не требует соответствующего преобразования нейтронно-физических сечений;

- разностный аналог дифференциального уравнения, полученный с помощью метода сеток, является математически более строгим по сравнению с балансным методом, особенно при переменном коэффициенте диффузии;

- существенно упрощается постановка граничных условий, т.к. не требуется экстраполяция потока к границе расчетной области.

Среди недостатков метода следует выделить необходимость более подробной разбивки расчетной области на расчетные элементы, однако при большом числе расчетных узлов (более четырех по каждой из координат) данный недостаток не существенен.

В работе показано, что при моделировании переноса нейтронов по радиусу активной зоны реактора необходимо применение метода разрывных коэффициентов (или метода "изображений"), что связано со способом подготовки нейтронно-физических сечений, усредняемых в пределах одной кассеты и ступенчато изменяющихся по радиусу активной зоны. Также введено усреднение потока по расчетным ячейкам, исходя из допущения о критичности расчетной области, состоящей из двух прилегающих треугольников соседних кассет (области A и B на рис.3)

Распределение потока в пределах расчетной области описывается функцией Бесселя:

для области A

$K_0 > 1$: $\Delta F + \chi^2 F = 0$; $F_a(R) = A_1 J_0(R\chi)$

для области B

$K_0 < 1$: $\Delta F - \chi^2 F = 0$; $F_b(R) = A_2 I_0(R\chi)$.

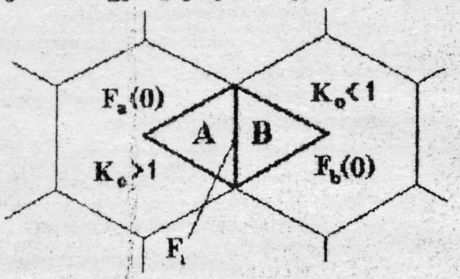


Рис.3

Заменив функции Бесселя первыми двумя членами разложения

получим, что поток на границе F_Γ определяется выражением,

$$F_\Gamma = \frac{F_a(0) + F_b(0)}{2},$$

а средний по расчетной области поток определяется из выражения:

$$\bar{f} = \frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3} + F_{r4} + F_{r5} + F_{r6}}{12} + \frac{F}{2},$$

где F_{ri} - поток на границе с соседними ячейками.

Применение метода "изображений" существенно упростило задачу восстановления потоков на границе с соседними ячейками и, следовательно, нахождение среднего по ячейкам потока нейтронов.

Библиотека нейтронно-физических сечений рассчитывается с помощью программного комплекса "Фрагмент", разработанного на базе программ "УНИРАСОС" и "НИ-7000". Расчет нейтронно-физических сечений для микроячейки в четырехгрупповом приближении производится по программе "УНИРАСОС". Программа "НИ-7000" производит мелкосеточный четырехгрупповой расчет ТВС в двумерном потвельном приближении с последующим усреднением нейтронно-физических сечений по ТВС и свертку их в двух групповую библиотеку нейтронно-физических сечений, зависящую от следующих пяти аргументов: температуры теплоносителя, плотности теплоносителя, температуры топлива, концентрации бора в теплоносителе и глубины выгорания топлива. В программном комплексе "Радуга" производится интерполяция нейтронно-физических сечений в зависимости от 5 аргументов линейно в пятимерном пространстве.

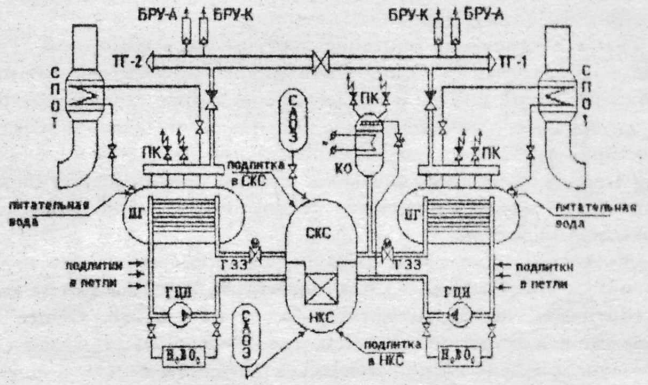


Рис.4

Теплогидравлический процесс моделируется в приближении одномерного течения гомогенной несжимаемой жидкости в

соответствии с теплогидравлической схемой ЯЭУ нового поколения (Рис.4.). В диссертации показано, что только такое приближение позволяет моделировать процесс в ЯЭУ за приемлемое время (время расчета 1 секунды физического процесса для реакторной установки типа ВВЭР-1000 на ЭВМ с быстродействием примерно 2 миллиона операций в секунду составляет около 2 минут работы центрального процессора) и обеспечивает необходимую точность получаемых результатов, достигаемую благодаря применению подробной разбивки расчетной области. Моделируется перенос борной кислоты в теплоносителе первого контура.

Компенсатор объема моделируется в приближении трех объемов (парогазового, объема с водой, находящейся на линии насыщения и объема с водой, непосредственно соприкасающейся с первым контуром). В компенсаторе объема моделируется работа нагревателей, предохранительных клапанов, систем впрыска, а также теплообмен между паровым объемом и объемом с водой, находящейся на линии насыщения.

Моделирование пространственных эффектов в активной зоне требует учета процессов неполного перемешивания теплоносителя в камерах смешения под активной зоной и над ней. Разработана модель камер смешения: камеры состоят из шести одинаковых секторов, каждый из которых сообщается с каждой из петель циркуляции со своим "весом" (коэффициентом перемешивания). Величины коэффициентов перемешивания определяются экспериментально. Модель позволяет учесть не только несимметричную подачу в активную зону теплоносителя с различной температурой на выходе из петель циркуляции, но и несимметричную подачу борной кислоты.

В главе 3 приведено описание программного комплекса "Радуга", созданного на базе разработанной методики. Комплекс состоит из двух модулей: нейтронной физики и теплогидродинамики. Модуль нейтронной физики осуществляет моделирование полей энерговыделения в активной зоне реактора в трехмерном двухгрупповом диффузионном приближении. В состав модуля теплогидродинамики входят модули теплогидравлики активной зоны, камер смешения, петель циркуляции, компенсатора объема и парогенераторов.

Активная зона реактора моделируется системой шестигранных каналов, общее число которых может достигать 397. Каждый из каналов может содержать до 35 расчетных узлов по высоте. Общее число расчетных узлов в активной зоне может достигать 5691.

Расчетная модель может содержать до шести петель циркуляции, содержащих ГЦН, главную запорную задвижку, теплообменную поверхность первый-второй контур, подвод или отвод теплоносителя в контур. Каждая петля может быть разбита на 50 расчетных объемов, (из

них до 20 расчетных объемов приходится на теплообменную поверхность). Контур петли включает опускной участок в реакторе. В каждой из расчетных петель может моделироваться по одной течи либо в защитную оболочку, либо в парогенератор. К первой расчетной петле подключен компенсатор объема.

Если тангенциальным перераспределением поля энерговыделения в активной зоне можно пренебречь (т.е. возмущение, вносимое в активную зону симметрично) программа позволяет моделировать динамику активной зоны по 1/6 ее части, что повышает быстродействие программы примерно в шесть раз.

В главе 4 приведены результаты верификации программного комплекса "Радуга" путем сопоставления расчетов стационарных полей энерговыделения с расчетами по аттестованной ГАН РФ программе "БИПР-7", по результатам экспериментов на действующих блоках АЭС, теплогидравлическом стенде РМК-NVH, результатам проектных расчетов и аналитически решаемых задачах.

Корректность методики решения уравнения переноса нейтронов проверялась с помощью сопоставления расчета стационарных полей энерговыделения в активной зоне реакторных установок типа ВВЭР, рассчитанных по программам "БИПР-7" и "Радуга". Максимальное отклонение в расчетах не превышает 5%, а среднеквадратическое отклонение - 2.4%, что не выходит за пределы точности программы "БИПР-7". На рис.5 приведена гистограмма покассетного энерговыделения, рассчитанная по "Радуге" и "БИПР-7" для одного из вариантов загрузки активной зоны РУ ВВЭР-1000, демонстрирующая удовлетворительное соответствие результатов.



Рис.5

Имеется также удовлетворительное согласование результатов расчетов по программе "Радуга" с результатами прямых измерений при физическом пуске 5 блока Запорожской АЭС температурных коэффициентов реактивности, "весов" групп органов СУЗ, "веса" аварийной защиты и критической концентрации H_3BO_3. Корректность

расчета энерговыделения в активной зоне при ступенчатом внесении реактивности при "нулевой" мощности активной зоны проверялась на задачах, имеющих аналитическое решение. Получено хорошее согласование для серии расчетов при различной величине ступенчато вносимой как положительной, так и отрицательной реактивности. Отклонение энерговыделения в активной зоне не превышает 5% от аналитического решения. На рис.6 приведено сопоставление расчета по программе "РАДУГА" с аналитическим решением при введении реактивности 31.95 β.



Рис.6

Теплогидравлический модуль программы верифицировался по результатам двух экспериментов на третьем блоке Ровенской АЭС: при отключении одного ГЦН и при отключении одного ТПН. Расчетное изменение основных технологических параметров (расхода теплоносителя, температуры в трубопроводах, давления в первом и во втором контуре, уровня воды в парогенераторах) хорошо согласуется с экспериментами.



Рис.7

Применимость программного комплекса "Радуга" для моделирования малых течей из первого контура обосновывалась путем

сопоставления расчетов с расчетами по программе "ATHLET", специально предназначенной для моделирования как больших, так и малых течей из первого контура реакторных установок и по результатам экспериментов на венгерском стенде PMK-NVH.

Сравнение с программой "ATHLET" дает качественно и количественно удовлетворительное совпадение результатов расчета давления в первом контуре при течи через сечение эквивалентным диаметром Ду 80 из горячего трубопровода реакторной установки ВВЭР-1000 (рис.7).

На рис.8 представлены результаты расчетов давления в первом контуре в условиях эксперимента на стенде PMK-NVH в эксперименте SPE-2 (течь из холодного трубопровода площадью 7.4% от проходного сечения циркуляционного трубопровода), выполненные по программам "TRACK", "RELAP5/MOD1", "RELAP-5/MOD2" и "Радуга". Программа "Радуга" корректно описывает характер протекания процесса. Более низкое давление в первом контуре по программе "Радуга" после срабатывания гидроемкостей (время больше 350 с) связано с использованием гомогенной модели теплогидродинамики. Это приводит к "идеальному" перемешиванию холодного теплоносителя, поступающего из гидроемкостей, с пароводяной смесью в камерах смешения первого контура, более быстрой конденсации пара и большему падению давления.

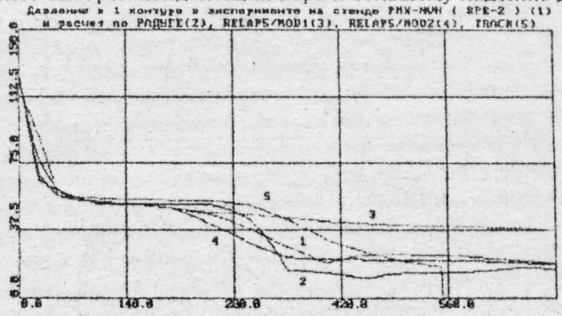


Рис.6

Сделан вывод, что программный комплекс "Радуга" может быть использован при моделировании малых течей из первого контура.

В главе 5 приведены результаты моделирования нескольких режимов, корректное описание переходных процессов в которых возможно только с использованием трехмерной модели активной зоны. В первом режиме моделировался переходный процесс при полном обесточивании стачции , отказе механической аварийной защиты и срабатыванием трех из четырех баков с борным раствором. На рис.9 приведены графики усредненного по кассетам поля энерговыделения в активной зоне для моментов времени 0, 19 и 30 секунд физического

процесса. В начальном состоянии перекос энерговыделения по активной зоне отсутствует, мощность реактора равна номинальной. В момент времени 19 с мощность реактора <Q> снижается до 0.383 от номинальной, отношение энерговыделения в максимально напряженных кассетах из сектора с пониженной концентрацией бора и сектора с максимальной концентрацией бора в теплоносителе <Q1> составляет 2.05. В момент времени 30 секунд <Q> снижается до 0.212 а <Q1> достигает величины 4.14.

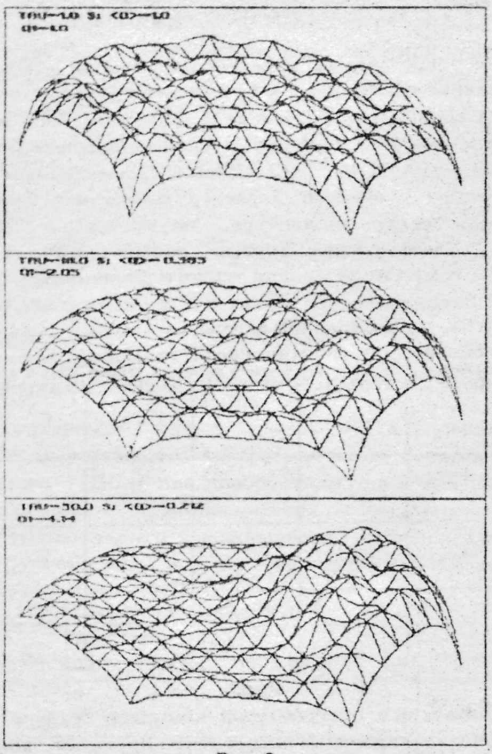


Рис.9

Данный режим демонстрирует возможность моделирования энерговыделения во всем объеме активной зоны. На поля энерговыделения существенно влияют процессы неполного перемешивания теплоносителя с борным раствором в камерах смешения.

Рассмотрено также отключение 4 ГЦН до полного останова (0-200 с) с последующим их включением (200-206 с) и полным отказом аварийной защиты. Расчет проводился в состоянии активной зоны в

конце кампании первой топливной загрузки РУ В-392. На рис.10 представлены результаты расчета распределения энерговыделения по высоте активной зоны (на оси абсцисс отложена высота активной зоны в метрах) для наиболее напряженной кассеты (1) и кассеты с органом СУЗ (2).

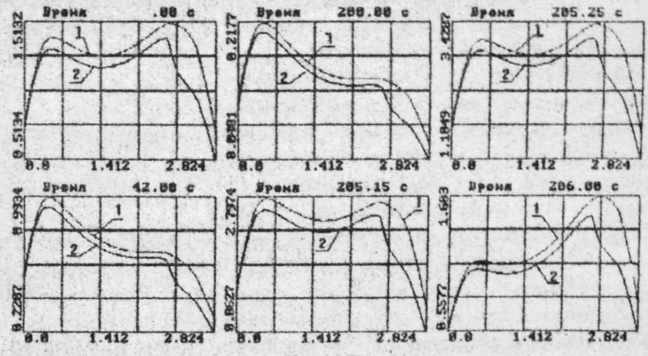


Рис.10

В начальном состоянии распределение энерговыделения в активной зоне по высоте имеет два максимума примерно одинаковой величины. При снижении расхода происходит нагревание теплоносителя и снижение мощности активной зоны реактора в следствие отрицательной реактивности реактора по температуре теплоносителя, при чем снижение мощности происходит в первую очередь в верхней части активной зоны, что приводит к существенному перераспределению энерговыделения по высоте реактора. При этом нейтронная мощность за 200 с переходного процесса снижается до 10% от номинальной. После повторного включения насосов происходит быстрое вытеснение горячего теплоносителя из верхней части активной зоны и нарастание нейтронной мощности в первую очередь в верхней части активной зоны. В данном режиме после включения насосов максимальная нейтронная мощность достигает величины 230% номинальной.

Таким образом, продемонстрированы возможности разработанного программного комплекса "РАДУГА" при моделировании процессов в реакторной установке при значительном перераспределении энерговыделения в активной зоне втечение переходного процесса. Применение двухгруппового диффузионного приближения при расчете энерговыделения в активной зоне позволяет корректно моделировать переходные процессы в активной зоне и определять деформацию аксиального и радиального профилей энерговыделения.

Выводы:

1 Создан программный комплекс "Радуга" для моделирования

динамических процессов в ЯЭУ с использованием трехмерной двухгрупповой модели активной зоны и одномерного описания теплогидравлических процессов в гомогенном несжимаемом теплоносителе.

2. Подтверждена эффективность использования в данной программе методики решения уравнений кинетики в двухгрупповом диффузионном покассетном приближении в гексагональной геометрии, основанной на использовании метода сеток.

3. Проведена верификация программного комплекса и показана представительность результатов моделирования.

4. Проведено моделирование переходных процессов в ЯЭУ в условиях значительного перераспределения поля энерговыделения в переходном процессе и показана важность учета изменения полей энерговыделения для анализа безопасности РУ.

5. Программный комплекс "Радуга" может быть использован при вероятностном анализе безопасности РУ. Знание пространственных полей энерговыделения в активной зоне позволяет моделировать процессы, происходящие в РУ, без избыточной консервативности.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Анализ некоторых вопросов безопасности теплофикационных установок типа АСПТ / О.Ю.Кавун, Д.Н.Сорокин, Г.С.Таранов, Ю.В.Филимонов // Вопросы безопасности и надежности при оптимизации ядерных энергетических установок. -Горький: ГПИ им. А.А.Жданова, 1985, -С. 104-115.

2. "RAINBOW" code for simulation of transients in WWER units /O.J.Kavun, M.B.Maltsev, A.J.Nikitin, D.N.Sorokin, G.S.Taranov // Working material. Containment loadings and performance under severe accident conditions. Report of a technical committee meeting organized by the international atomic energy agency and held in Vienna, 21-24 may 1990., IAEA-TC-741, Vienna, Austria,1991.

3. Крюков С.А., Кавун О.Ю.. Расчетный анализ запроектных аварий реакторной установки АСТ мощностью 200 МВт. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов, вып.5, -М., 1990. - С. 3-7.

4. Программный комплекс для моделирования динамических режимов установок с реакторами водо-водяного типа "РАДУГА" / О.Ю. Кавун, М.В.Мальцев, А.Ю.Никитин, Г.С.Таранов, А.Ю.Умрихин // Тез. докл. семинара "Теплофизика-90", -Обнинск, 1990. -С.128-134.

5. Моделирование режима разрыва парового коллектора парогенератора с учетом трехмерной модели активной зоны / О.Ю.Кавун, Г.С.Таранов, М.В.Мальцев, А.Ю.Никитин // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. Динамика ядерных энергетических установок, вып.5,Часть 1.- М.,1991.-С. 43-47.