

# ВЕРИФИКАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ НЕЙТРОННОЙ КИНЕТИКИ КОДА ТРАП-КС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЕТОВ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ С ИЗМЕНЕНИЕМ РЕАКТИВНОСТИ

М.А. Увакин, Г.В. Алехин, М.А. Быков, С.И. Зайцев

Работа выполнена в рамках расчетов по верификации программного кода ТРАП-КС. Данный код является модернизированной версией кода ТРАП-97. Это основной код, используемый для выполнения Теплогидравлических Расчетов Аварийных Процессов при обосновании безопасности РУ с ВВЭР. Однако, в аттестационных паспортах версии ТРАП-97 содержится следующее ограничение области применимости: «При анализе безопасности в реактивных авариях со значительной деформацией поля энерговыделения в переходном процессе, а также в режимах без срабатывания аварийной защиты (АТWS) с одновременным развитым кипением в активной зоне необходимо специальное обоснование консервативности результатов». Данное ограничение основано на использовании точечной модели нейтронной кинетики и под обоснованием консервативности подразумевает выполнение поддерживающих расчетов с использованием трехмерной модели.

Версия ТРАП-КС имеет возможность расчета процессов перемешивания теплоносителя в камерах реактора и использования трехмерной модели нейтронной кинетики в активной зоне. Это позволяет снять указанное ограничение. При верификации кода ТРАП-КС были использованы результаты испытаний на действующих блоках АЭС с ВВЭР и результаты расчетов по другим аттестованным и верифицированным кодам.

В представленной работе анализируются результаты расчета тестовых задач. В первой из них рассматривается выброс органа регулирования СУЗ при работе на мощности. Данный процесс характеризуется быстрым вводом реактивности, приводящим к кратковременному локальному всплеску энерговыделения в реакторе. Во второй задаче рассчитываются эксперименты по исследованию ксеноновых колебаний. В одном из экспериментов инициируется введение небольшой отрицательной реактивности, в результате чего происходит снижение мощности реактора. Это снижение вызывает пространственные колебания концентрации ксенона, которые спустя некоторое время подавляются регулирующей группой при внешнем управлении. Во втором эксперименте ксеноновые колебания возбуждаются за счет перемещения регулирующей группы СУЗ. Дополнительно приводятся результаты расчетов международной тестовой задачи V1000СТ-2 (задача 2) с разрывом паропровода и возникновением повторной критичности (6-й блок АЭС Козлодуй).

В качестве расчетных средств использовались коды ТРАП-КС и КОРСАР/ГП, применяемые в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» для расчетов переходных процессов в РУ с ВВЭР. Нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора описывались при помощи библиотек макроскопических констант, полученных по комплексу САПФИР.

Нодализационная схема расчетной модели представляет собой часть полной контурной схемы, применяемой для расчетов переходных процессов на РУ с ВВЭР по кодам ТРАП-КС и КОРСАР/ГП. Активная зона моделируется 163 каналами (по числу ТВС), разделенными на 20 расчетных элементов по высоте. Протечки учитываются дополнительным каналом. В поперечном сечении для каждой ТВС принималась модель с 24 расчетными узлами. По два расчетных элемента снизу и сверху активной зоны служат для описания торцевого отражателя. Боковой отражатель учитывается в модели нейтронной кинетики за счет дополнительных ячеек на границе активной зоны. Трехмерная модель нейтронной кинетики описывается библиотекой нейтронных констант, включающей данные для каждого элемента активной зоны и отражателя.

### Выброс ОР СУЗ.

Рассматривается стандартная задача с выбросом одного ОР СУЗ (ТВС №112) за 0,1 с из крайнего нижнего положения в начале кампании первой топливной загрузки (1 эффективные сутки, 1 блок Ростовской АЭС). В исходном состоянии принимается стационарное отравление ксенона. Регулирующая группа находится в крайнем нижнем положении. Для определенности, в качестве условий задачи был принят расчет без учета отклонений нейтронно-физических характеристик (эффективность СУЗ, суммарная доля запаздывающих нейтронов, коэффициенты реактивности по температуре теплоносителя и топлива, время жизни мгновенных нейтронов).

Извлечение стержня СУЗ из активной зоны приводит к резкому вводу положительной реактивности, что вызывает всплеск нейтронной и тепловой мощностей реактора (рис. 1). Повышение мощности влечет за собой разогрев топлива, который вследствие отрицательной обратной связи приводит к снижению реактивности и стабилизации энерговыделения. Таким образом, рассматриваемая задача позволяет судить о точности моделирования нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в топливе и теплоносителе при быстром изменении мощности реактора после введения положительной реактивности.

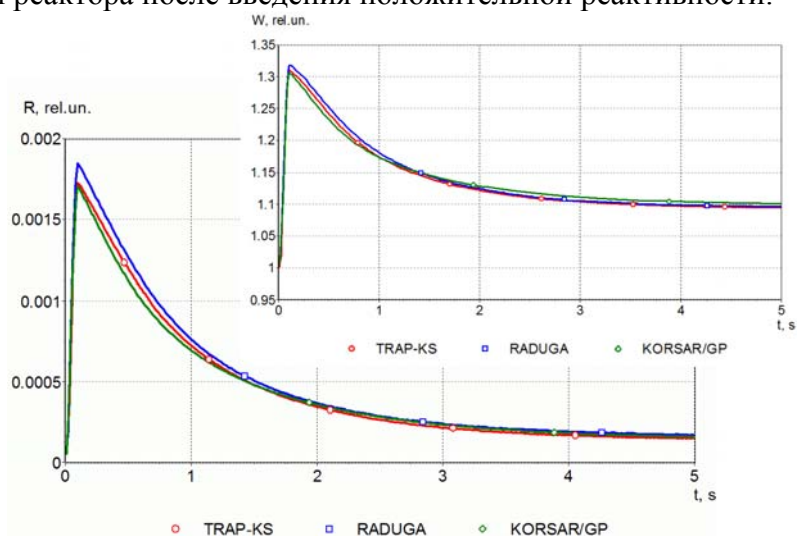


Рис. 1 Реактивность и относительная мощность реактора

### Пространственные ксеноновые колебания.

Были проведены расчеты эксперимента с внесением возмущения за счет перемещения регулирующей группы ОР СУЗ. Суть эксперимента состояла в возбуждении ксеноновых колебаний за счет изменения положения 10-й группы ОР СУЗ с 81,2% до 60% за 50 минут. Далее осуществлялась выдержка в течение примерно 4 часов, затем 10-я группа ОР СУЗ поднималась до 80% за время 16 минут. Мощность реактора поддерживалась на уровне 72% от номинальной, момент кампании составлял 30,1 эффективных суток, концентрация борной кислоты равнялась 5,19 г/кг. Поддержание постоянной мощности осуществлялось изменением входной концентрацией бора. На момент начала процесса принято стационарное отравление реактора. В процессе исследовалось изменение аксиального офсета (рис. 2).

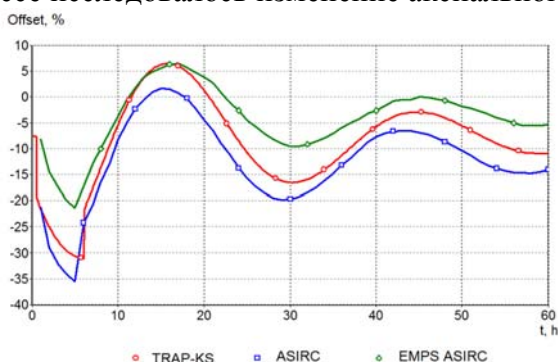


Рис. 2 Изменение аксиального офсета по данным расчета и данным измерений

### Международная тестовая задача V1000СТ-2.

Рассматривалась международная тестовая задача V1000СТ-2 о гипотетическом разрыве паропровода на шестом энергоблоке АЭС Козлодуй с реакторной установкой типа ВВЭР-1000. В настоящей работе используются результаты расчетов с граничными условиями на патрубках реактора при пессимистичном сценарии развития аварии (отказ на отсечение аварийного парогенератора).

Общее описание процесса таково. Разрыв паропровода парогенератора первой петли характеризуется глубоким расхолаживанием (порядка 80 градусов) аварийной петли главного контура циркуляции. После срабатывания аварийной защиты наблюдается возникновение повторной критичности из-за захолаживания теплоносителя. Развитие аварийного процесса проходит следующим образом. В результате срабатывания аварийной защиты, в начале процесса, мощность активной зоны резко падает. Вследствие обратной связи по плотности теплоносителя реактор выходит на повторную критичность, что приводит к последующему росту мощности до 40–60% от номинального значения. Из-за обратных связей по плотности теплоносителя возникает большая неравномерность в распределении плотности потока нейтронов по объему активной зоны.

Поскольку аварийный парогенератор остается не отсеченным от разрыва, то вода из него полностью выпаривается (поступление питательной воды в парогенератор прекращается вследствие закрытия арматуры регуляторами). Теплоотвод от первого ко второму контуру в нем практически полностью прекращается, поэтому вода в аварийной петле постепенно нагревается. В итоге, на завершающей стадии процесса мощность реактора (рис. 3) падает из-за положительного коэффициента реактивности по плотности теплоносителя (на входе в реактор повышается средняя температура теплоносителя, и, соответственно, снижается его плотность).

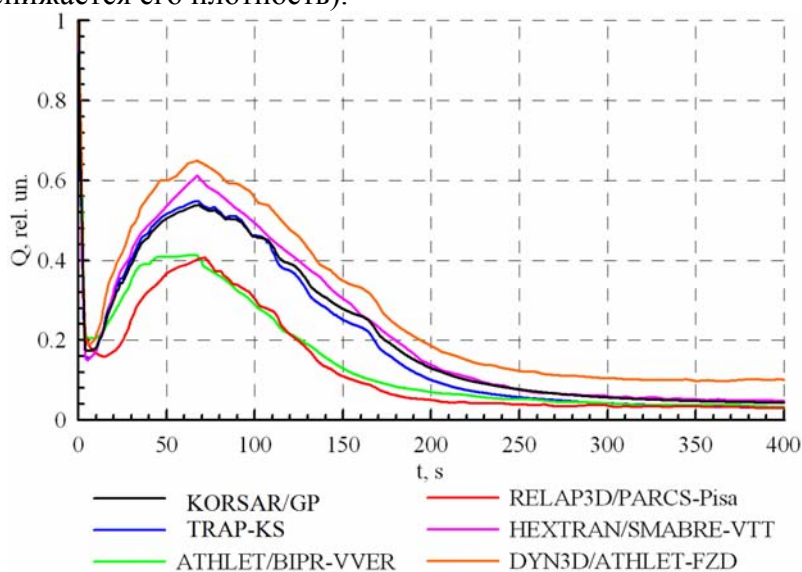


Рис. 3 Относительная мощность реактора