ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ КОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 1 БЛОКА КАЛИНИНСКОЙ АЭС С АКТИВНОЙ ЗОНОЙ, СОДЕРЖАЩЕЙ ТВСА

А.А. Фальков, В.С. Кууль, В.И. Печенкин, О.Б. Самойлов - ОКБМ, Н.Новгород
М.П.Лизоркин, Г.Л.Лунин, Ю.Г.Никипорец, В.Б.Проклов - РНЦ"Курчатовский институт", Москва

1. Введение

В настоящее время на 1 блоке Калининской АЭС проходят опытную эксплуатацию 108 ТВС альтернативной конструкции (ТВСА) разработки ОКБМ, что составляет около 70% состава активной зоны. Применение ТВСА в реакторах ВВЭР-1000 нацелено на улучшение экономических показателей и эксплуатационных характеристик топливного цикла.

По сравнению со штатной ТВС ВВЭР-1000 конструкция ТВСА характеризуется наличием шести штампованных уголков из циркониевого сплава, которые вместе с дистанционирующими решетками образуют силовой каркас, обеспечивающий в процессе эксплуатации жесткость, прочность и геометрическую стабильность ТВСА.

В обоснование безопасности опытной эксплуатации ТВСА был выполнен дополнительный анализ определяющих аварийных режимов реактора ВВЭР-1000 1 блока Калининской АЭС с активной зоной, содержащей ТВСА. Целью анализа являлось исследование поведения ТВСА в авариях и сопоставление с результатами для штатной ТВС, сравнительная оценка влияния конструктивных особенностей ТВСА на состояние твэлов в авариях. Анализ проводился с использованием кодов ТИГР-1 и RELAP5/mod3. Выполнены верификационные исследования кодов применительно к реакторам ВВЭР.

В настоящем докладе представлены основные результаты анализа аварии выброса ОР СУЗ и аварии разрыва полным сечением ГЦТ.

2. Программный комплекс ТИГР-1

2.1. Характеристика программного комплекса ТИГР-1

Программный комплекс ТИГР-1 предназначен для связанного нейтронно-теплогидравлического расчета нормальных и аварийных режимов в установках с реакторами типа ВВЭР, является развитием аттестованной программы РАСНАР и содержит трехмерную модель нейтронной кинетики на основе кодов БИПР-7, БИПР-8. Комплекс является продуктом совместной разработки ОКБМ и РНЦ КИ.

Важная особенность комплекса ТИГР-1 заключается в том, что он позволяет выполнять уточненный детальный расчет теплотехнического состояния активной зоны за счет использования модели пространственной кинетики и ячейковой модели ТВС.

Состав моделируемого оборудования включает все основные элементы и системы РУ, ПТУ, электроэнергетической системы и системы управления.

Для описания кинетики в программном комплексе предусмотрена возможность использования точечной модели или трехмерной двухгрупповой диффузионной модели (на базе методик программы БИПР–8 или программы БИПР–7). Пространственная модель кинетики позволяет моделировать как отдельные сектора активной зоны - 30°, 60°, 120° и 180° (при решении симметричных задач), так и активную зону полностью.

При описании кипения теплоносителя используется модель с учетом скольжения пара. В активной зоне описывается неравновесное кипение на основе модели Осмачкина.

Система корреляций теплопереноса охватывает область однофазной среды, пузырькового кипения, кризиса теплоотдачи и закризисного режима теплообмена.

В комплексе реализована ячейковая модель активной зоны, являющаяся динамическим аналогом аттестованной программы КАНАЛ (разработка ОКБМ) поячейкового теплогидравлического расчета ТВС в стационарных режимах. Модель учитывает перераспределение расходов и связанный с этим конвективный тепломассоперенос в ячейках ТВС, турбулентный тепломассообмен между соседними ячейками и теплообмен с уголком для угловых ячеек.

При описании процессов тепломассопереноса в камерах реактора предусмотрена возможность учета неполного перемешивания теплоносителя в режимах с неидентичными условиями работы петель теплообмена.

Электроэнергетическая часть установки представляется набором механически и электрически связанных расчетных элементов, моделирующих турбины, генераторы, электроприводы, насосы и электросети с внешними потребителями и источниками электроэнергии.

Модель системы управления описывает все основные алгоритмы управления при срабатывании аварийной и предупредительной защит реактора, законы регулирования.

2.2. Верификация программного комплекса ТИГР-1

По программному комплексу ТИГР-1 выполнен большой объем верификационных исследований. Работа включала анализ результатов экспериментальных исследований нестационарных процессов на натурных объектах (ВВЭР-1000), установках – аналогах и на теплофизических стендах ОКБМ и ГНЦ ФЭИ. В числе экспериментальных режимов на действующих блоках ВВЭР-1000 рассмотрены режимы отключения ГЦН, отключения 1-го ТПН, сброса нагрузки до собственных нужд, прекращения подачи питательной воды в один из ПГ и др. Для верификации пространственной модели кинетики дополнительно использовались модельные задачи международной программы AER применительно к установке ВВЭР-440. Корректность описания основных законов сохранения подтверждена сопоставлением результатов расчета по комплексу ТИГР-1 с аналитическими решениями модельных задач.

Выполненные верификационные исследования показали достаточность программного комплекса ТИГР-1 для адекватного расчета нестационарных режимов из области применения. Результаты верификационных расчетов вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Максимальная разница результатов расчета и экспериментальных данных не превышает ~ 20% от диапазона изменения параметров в режиме. Программный комплекс представлен на аттестацию.

3. Код RELAP5/mod3 и работы по его верификации

RELAP5/mod3 является теплогидравлическим кодом улучшенной оценки и позволяет проводить реалистичный расчетный анализ стационарных, переходных и аварийных процессов, происходящих в легководных реакторах. Реакторы ВВЭР относятся классу реакторов с водой под давлением и практически не имеют значимых отличий от западных реакторов PWR по определяющим процессам и явлениям в переходных и аварийных режимах. Особенности теплогидравлики реакторов ВВЭР, связанные с некоторыми отличиями компоновки и оборудования (например, горизонтальный ПГ), и специфика используемых материалов могут быть учтены в рамках существующих возможностей кода RELAP5/mod3.

Наряду с верификационными исследованиями кода RELAP5/mod3, проводимыми в мире применительно к западным PWR, выполнен большой объем работ по верификации кода для реакторов типа ВВЭР. В настоящее время в ИПБ РНЦ "Курчатовский Институт" совместно с ОКБМ подготовлен отчет «Результаты верификации кода RELAP5/mod3.2 применительно к реакторам ВВЭР». В отчете представлены основные результаты выполненных верификационных исследований кода RELAP5/mod3 применительно к АЭС с реакторами типа ВВЭР. Дана оценка качества моделирования экспериментов. Приведены рекомендации по применению моделей кода и по составлению нодализационных схем для моделирования переходных и аварийных режимов ВВЭР.

Работа включала анализ зарубежных исследований по верификации кода применительно к PWR, анализ интегральных экспериментов и экспериментов по изучению определяющих процессов и явлений для реакторов ВВЭР, выполненных на теплофизических стендах, и анализ переходных режимов на действующих блоках ВВЭР. Выполненный перечень верификационных исследований кода охватывает все важные процессы для различных классов переходных и аварийных режимов ВВЭР:

-переходные режимы и режимы с нарушением нормальных условий эксплуатации;

-теплогидравлические процессы в первом контуре при малой течи теплоносителя;

-теплогидравлические процессы при большой течи теплоносителя, включая осушение, перегрев активной зоны и повторный залив.

По результатам выполненных верификационных расчетов, анализа моделей кода и опыта применения кода для расчета аварий ВВЭР отмечается, что код RELAP5/mod3 позволяет описывать важные процессы и явления в ходе переходных и аварийных режимов АЭС с реакторами ВВЭР. Выявленные в результате верификации неточности предсказаний в ряде отдельных эффектов в целом не приводят к заметным погрешностям в расчетах.

4. Анализ аварии выброса одного ОР СУЗ

4.1. Начальные и граничные условия. Предпосылки анализа

Выброс ОР СУЗ из активной зоны теоретически возможен при разрыве чехла привода на верхнем блоке реактора с отказом гидростопора. В качестве исходного состояния рассматривается работа реактора на номинальной мощности при опущенной 10-ой группе ОР СУЗ, которая включена на регулирование (нерегламентное состояние, которое может реализоваться в результате ошибочных действий оператора). Рассматриваемое состояние является наиболее консервативным по величине реактивности, вносимой при выбросе ОР СУЗ.

Расчеты выполнены по программному комплексу ТИГР-1 при фактических значениях параметров РУ 1-го блока Калининской АЭСс учетом неблагоприятных, по условиям теплотехнической надежности, отклонений параметров РУ от номинальных значений.

Принимая во внимание цель расчета, состав моделируемого оборудования ограничивается рамками РУ. Расчетная схема РУ включает первый контур с паровым компенсатором давления и второй контур (от деаэратора до конденсатора), связанные тепловыми структурами.

Активная зона представляется 164 расчетными каналами, моделирующими все ТВС и межкассетное пространство, разбитыми по высоте на 13 расчетных участков, из них 10 участков на высоте зоны тепловыделения.

При анализе теплотехнической надежности активной зоны рассматривается ТВС с максимальным энерговыделением, для описания которой используется ячеечная модель. При этом рассматриваемая ТВС разбивается на элементарные ячейки различных типов в соответствии с конструктивным исполнением. Относительная мощность максимально теплонапряженных твэлов принята равной – 1,5.

Величина критического теплового потока рассчитывалась по методике Безрукова, которая используется ОКБ «Гидропресс" - Разработчиком РУ.

В качестве исходных данных по перечню сигналов и уставкам срабатывания АЗ и РОМ, по инерционностям системы измерений, по системе отбора пара и конденсатно - питательному тракту, алгоритмам работы регуляторов и др. использовались приведенные в материалах по 1 блоку Калининской АЭС.

В принятом сценарии рассмотрения аварии предполагается, что время выброса ОР составляет 0.1с, в момент выброса происходит обесточивание АЭС.

4.2. Результаты расчета

Расчетный анализ аварии выброса ОР СУЗ выполнен с использованием пространственной модели кинетики БИПР-7КН для конца 16 топливной кампании. Показано, что на ~ 0.03с с момента начала движения ОР вверх сформируется сигнал АЗ реактора по повышению уровня нейтронного потока до аварийной уставки 109%, и на 0.43с (с учетом задержки на прохождение сигнала АЗ по электрическим цепям) ОР СУЗ начнут опускаться в активную зону.

Переходный процесс сопровождается кратковременным “всплеском” мощности тепловыделений в активной зоне до ~ 160%. Максимальная относительная мощность ТВС (Kr), из которой выбрасывается ОР, составляет ~ 1.74 при исходном значении 0.73.

В активной зоне обеспечивается бескризисный теплоотвод от твэлов. Минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена в максимально напряженной ячейке в переходном процессе снижается до ~ 1.3.

Увеличение энтальпии топлива вследствие «всплеска» мощности не приводит к достижению энтальпии повреждения твэлов.

Для сравнения выполнен расчет рассматриваемого аварийного режима с использованием точечной модели кинетики с учетом деформации распределения энерговыделения в активной зоне в «адиабатическом» приближении (при исходном распределении концентрации самария и ксенона, температуры топлива и параметров теплоносителя). При этом ТВС описывалась в рамках модели изолированного канала при аналогичных характеристиках расчетных ячеек. Получены более высокие значения относительной мощности ТВС в аварийном процессе и более низкая величина минимального коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, чем при расчете по пространственной модели кинетики (см. табл. 1).

На рис. 1 представлено сравнение объёмных энерговыделений в ТВС, из которой происходит выброс ОР, на момент полного извлечения аварийного ОР СУЗ из активной зоны, полученных при расчете по ПК ТИГР-1 с пространственной моделью кинетики, со статическим расчетом этого состояния по программе БИПР-7.

Таким образом, использование пространственной модели кинетики и ячеечной модели ТВС позволило снять излишний консерватизм в оценке теплотехнического состояния активной зоны в рассмотренной аварийной ситуации, неизбежно закладываемый при расчете с точечной моделью кинетики и описанием ТВС в рамках модели изолированного канала.

Таблица 1. Сравнение величины минимального коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи в аварии выброса ОР СУЗ при расчете по пространственной и точечной моделям кинетики

Модель кинетики	Теплогидравлическая модель ТВС	Относительная мощность твэлов ($Kr * Кинж^{r}$)	Минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена	
			в исходном состоянии	в аварии
Блок пространственной кинетики БИПР-7КН (ТИГР-1)	Ячеечная	1.5*1.16	1.76	1.3
Точечная кинетика (ТИГР-1)	Изолированный канал	1.5*1.16	1.6	1.02

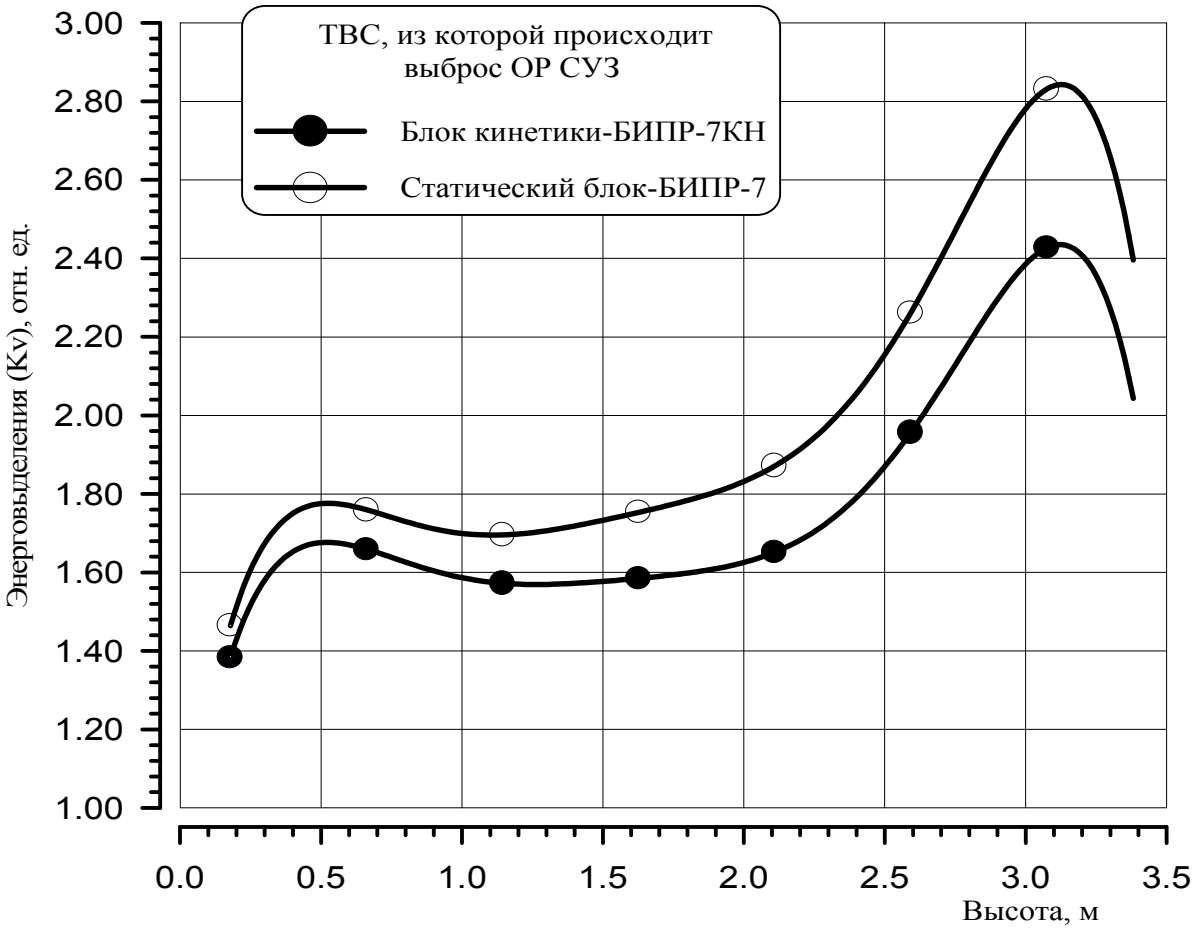

Рис. 1. Выброс ОР СУЗ в конце кампании. Распределение энерговыделений по высоте в ТВС, из которой происходит выброс ОР, на момент полного извлечения. Расчет по ПК ТИГР-1 с блоком кинетики БИПР-7КН и статический расчет этого состояния по программе БИПР-7

5. Анализ аварии разрыва ГЦТ полным сечением

5.1. Начальные и граничные условия. Моделирование особенностей ТВСА

Рассматривается мгновенный разрыв "холодной нитки" по сварному шву входного патрубка реактора с двухсторонним истечением теплоносителя. Принималось, что разрыв происходит на холодной нитке петли №1, поскольку это приводит к неэффективной работе с потерей воды проливки в разрыв одного из трех насосов САОЗ низкого давления. При моделировании петель циркуляции учитывалась компоновка ГЦТ реактора 1 блока Калининской АЭС (проект В-338).

Расчет выполнялся по коду RELAP5/mod3. В расчете учитывались консервативные допущения для характеристик исходного состояния и граничных условий аналогично проектному подходу, реализованному в материалах ТОБ Калининской АЭС. В качестве исходного состояния при проведении анализа рассматривался режим работы реактора на мощности 104% от номинальной.

В качестве единичного отказа принимался отказ насоса САОЗ низкого давления одновременно с исходным событием. Предполагался дополнительный отказ одного из четырех гидроаккумуляторов (ГЕ САОЗ). Работа насосов высокого давления в расчете не учитывалась. Постулировалось отключение внешнего электропитания (полное обесточивание станции) в момент возникновения аварии.

Активная зона представляется 11 расчетными каналами, разбитыми на две группы. В первую группу входят периферийные ТВС, в другую - все остальные расчетные каналы. Каждая группа каналов имеет свой тяговый участок, которые соединяются перед входом в ГЦТ. По высоте активной части каналы разбивались на 10 участков. В число расчетных каналов активной зоны входят ТВС с различным энерговыделением, ячейки с твэлами различного энерговыделения, включая максимальное энерговыделение (448 Вт/см), соответствующее проектному пределу, и угловые ячейки в ТВСА.

Учтены конструктивные особенности и гидравлические характеристики ТВСА. В угловых ячейках ТВСА введены тепловые структуры, моделирующие угловые пластины жесткости. В ТВСА с максимальным энерговыделением, для описания направляющих труб и дистанционирующих решеток, введена дополнительная тепловая структура. Описывается теплообмен с уголком, включая теплообмен излучением между оболочкой твэла и уголком, теплообмен на внешней поверхности угловой пластины.

5.2. Результаты анализа

Результаты расчета изменения параметров первого контура и температурного состояния активной зоны в процессе аварии представлены на рис. 2 и 3.

Результаты показывают, что определяющее влияние на температурное состояние твэлов в условиях большой течи оказывает величина локальной тепловой нагрузки. При одинаковых тепловых нагрузках максимальные температуры оболочек твэлов ТВСА и штатной ТВС близки.

Периферийные твэлы вблизи уголков ТВСА имеют более низкие температуры за счет теплообмена с относительно холодной угловой пластиной, являющегося дополнительным механизмом охлаждения угловых твэлов.

Изменение интегральных параметров установки в процессе аварии соответствует результатам проектных расчетов для штатной активной зоны, полученным по программе

ТЕЧЬ-М. Максимальная температура оболочки наиболее энергонапряженного твэла с максимальной проектной линейной нагрузкой Q_L = 448 Вт/см составляет 1050°С.

Температура циркониевых угловых пластин жесткости и направляющих труб в процессе аварии не превышает 700°С. Следовательно, они практически не окисляются и не дают вклад в общее окисление циркония в активной зоне и общее количество образовавшегося водорода.

Требования ПБЯ РУ АС-89 по непревышению максимального проектного предела повреждения твэлов выполняются.

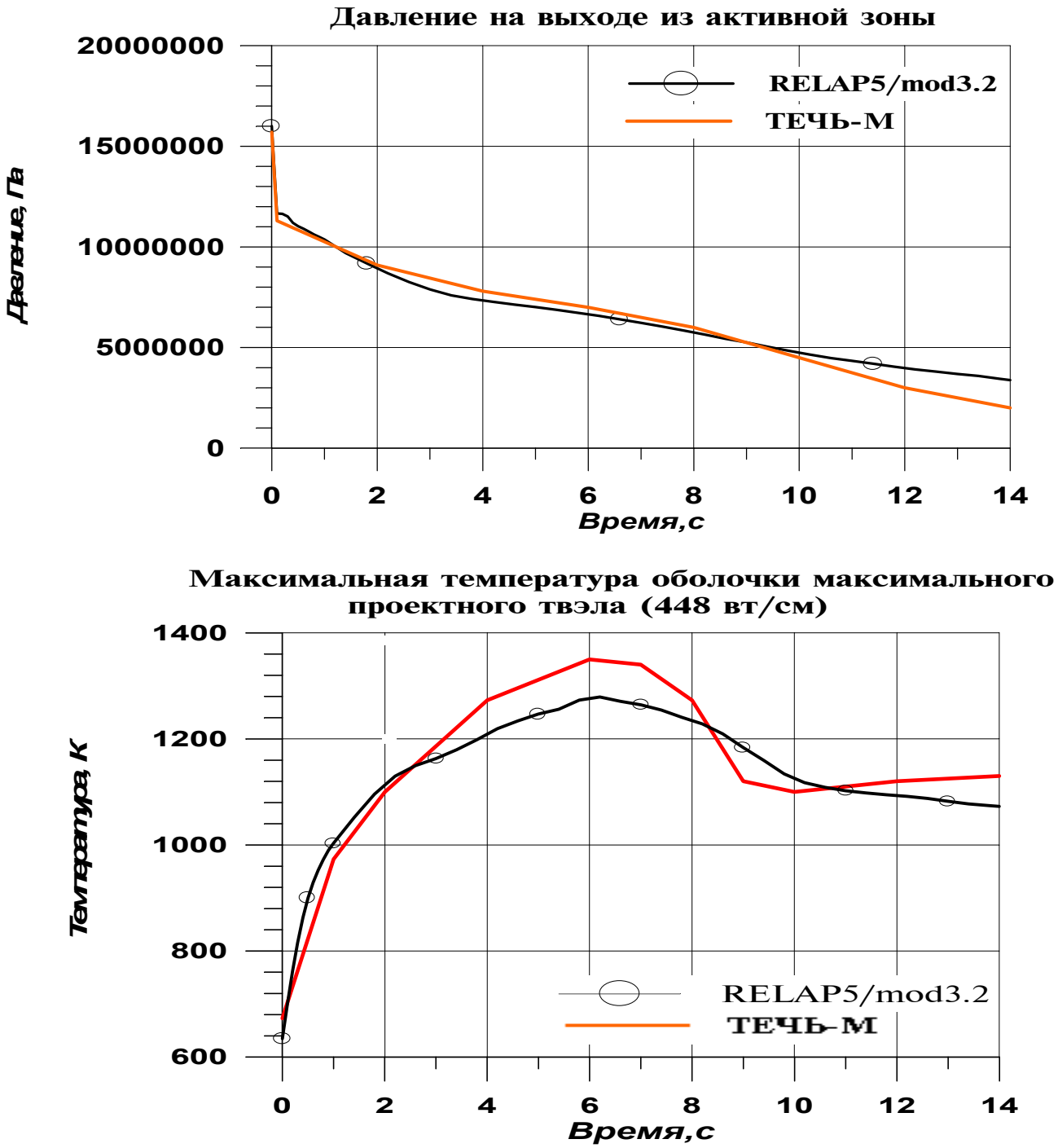

Рис.2 – Авария разрыва ГЦТ. Сравнение результатов расчетов с проектными расчетами для штатной активной зоны

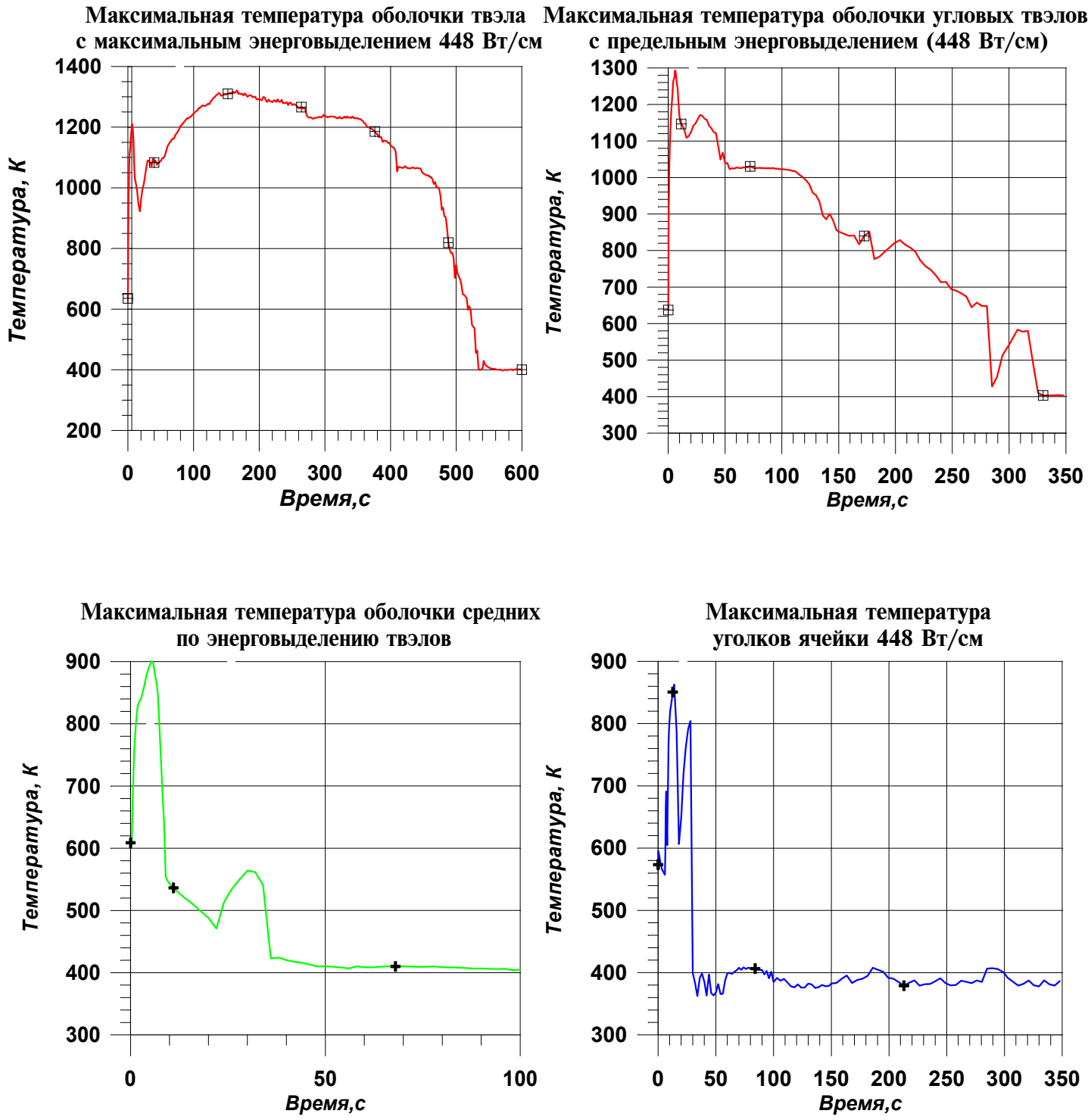

Рис. 3 – Температурное состояние элементов активной зоны, содержащей ТВСА