

# **Анализ тяжёлых аварий реакторов ВВЭР с использованием кода MELCOR-1.8.5**

В. Носатов, В. Стрижов, ИБРАЭ РАН, Москва

При финансовой поддержке DOE, Росэнергоатом

## Оглавление

1. Особенности построения нодализационных схем контура охлаждения РУ на примере моделирования переходных режимов.....	3
1.1. Нодализация парогенератора со стороны первого и второго контура РУ .....	3
1.2. Нодализация компенсатора давления.....	11
1.3. Нодализация гидрозатворов .....	13
1.4. Нодализация области активной зоны .....	13
2. Оптимизация расчётной (нодализационной) схемы активной зоны реактора .....	19
2.1. Влияние числа радиальных расчётных зон на поведение активной зоны при тяжёлой аварии .....	22
2.2. Влияние числа аксиальных расчётных участков на поведение активной зоны при тяжёлой аварии .....	25
2.3. Адаптация кода MELCOR для расчёта гексагональной решетки в активной зоне .....	27

## **1. Особенности построения нодализационных схем контура охлаждения РУ на примере моделирования переходных режимов.**

Исходя из назначения кода MELCOR, он не нацелен на описание всех сложных теплогидравлических явлений в двухфазных потоках, которые могут иметь место в оборудовании ЯЭУ в аварийных режимах, и явлений, характерных для режимов с изменением реактивности, требующих расчёта кинетики реактора. MELCOR должен описывать основные теплогидравлические явления, имеющие место в аварийных режимах, которые могут привести к осушению, перегреву и тяжелому повреждению активной зоны – это аварии с потерей теплоносителя первого контура или сценарии с нарушением теплоотвода, сопровождающиеся потерей теплоносителя первого контура.

Таким образом, при построении нодализационной схемы контура охлаждения РУ необходим учёт именно таких явлений, важных с точки зрения назначения MELCOR:

- естественная циркуляция однофазного и двухфазного теплоносителя;
- критический и гидравлический расход истечения в разрыв;
- паросодержание в активной зоне и элементах первого контура;
- сепарация фаз и изменение положения уровня теплоносителя;
- поведение компенсатора давления;
- теплоотвод в ПГ;
- поведение гидрозатворов в ГЦТ.

Наряду с этим нодализационная схема должна быть максимально эффективной с точки зрения скорости счёта. Проверка её адекватности ведётся при моделировании реальных переходных режимов.

### **1.1. Нодализация парогенератора со стороны первого и второго контура РУ**

Рассмотрен режим с аварийным снижением и последующим полным прекращением подачи питательной воды в один из парогенераторов на 1-м энергоблоке Калининской АЭС, относящийся к классу проектных аварий. Авария инициализируется в условный момент времени (0:00) резким неконтролируемым уменьшением расхода питательной воды в 4-й парогенератор. К 8-й секунде уровень в аварийном парогенераторе падает ниже номинального и продолжает резко снижаться. На 45-й секунде по сигналу

снижения уровня на 500 мм отключается ГЦН 4-й петли и регулятор ограничения мощности (РОМ) начинает ввод в активную зону 10-й группы СУЗ с рабочей скоростью 20 мм/сек в течение 8 секунд (от уровня 88% до уровня 83.5%, считая от дна активной зоны). В итоге работы РОМ мощность реактора должна быть снижена до 69% от номинального значения. При этом по сигналу отключения одного ГЦН, в таких случаях, вводится блокировка срабатывания АЗ-1 при снижении уровня в соответствующем парогенераторе до 650 мм. Однако этого не происходит и на 54-й секунде, когда уровень в 4-м парогенераторе снизился до 1600 мм имеет место ложное срабатывание аварийной защиты по сигналу АЗ-1.

Первоначально парогенератор со стороны второго контура моделировался одним объемом. Предварительные расчеты показали, что в этом случае теплоотдача через парогенератор занижена, что приводит к завышению температуры на входе в АЗ. Кроме того, уровень теплоносителя не соответствовал данным по переходному процессу.

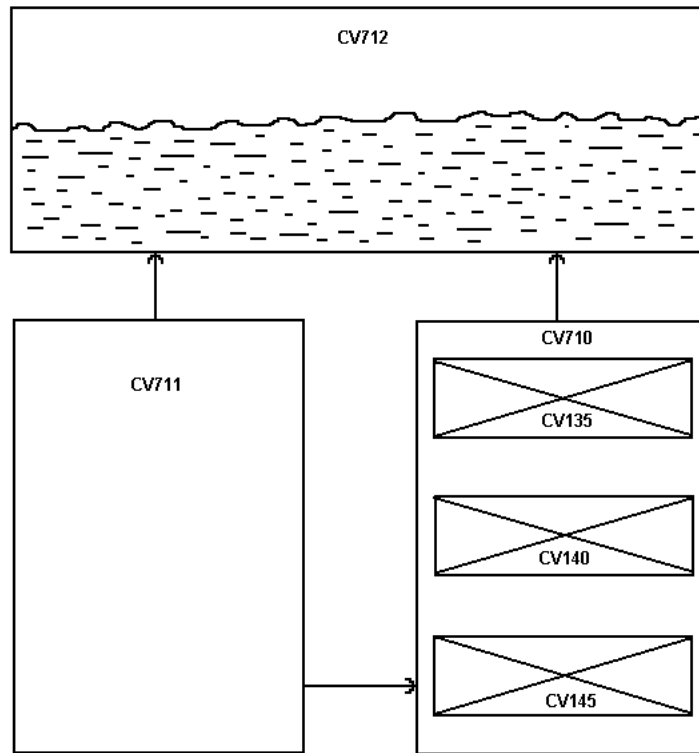
Поэтому в ходе расчётов нодализация парогенератора со стороны второго контура была приведена к виду, в большей степени отражающему характер течения теплоносителя в нём. Схематически эта нодализация изображена на Рис. 1-1. Расчётный объём CV710 моделирует центральную часть парогенератора, в которой расположены все теплообменные трубы. Это подъёмный участок парогенератора, в котором происходит нагрев и кипение теплоносителя. Расчётный элемент CV711 моделирует периферийную часть парогенератора, между кожухом теплообменных труб и корпусом парогенератора. В этом элементе теплоноситель опускается и поступает в нижнюю часть нагревательного элемента. Элемент CV712 моделирует верхнюю часть парогенератора над теплообменными трубами. Элемент имеет свободную поверхность раздела фаз и в нём происходит испарение пара. Элементы связаны и образуют контур естественной циркуляции. Вода поднимается через центральный элемент и способствует эвакуации пузырей. В итоге, для той же паропроизводительности паросодержание в номинальном режиме уменьшается пропорционально скорости воды в обогревательном элементе. Требуемый расход естественной циркуляции в парогенераторе определяется через кратность циркуляции, задаваемую в технических характеристиках. Соответствие значения проектной и расчётной кратности циркуляции получено подбором коэффициентов местного сопротивления. Сопоставление с экспериментом результатов исходного и уточнённого расчёта, для описанной модели ПГ представлено на Рис. 1-2 – Рис. 1-3. Можно видеть, что использование

нодализационной схемы ПГ по второму контуру в виде трёх расчётных объёмов позволяет существенно улучшить соответствие расчетов результатам экспериментов. При этом расчётный коэффициент теплопередачи из первого контура во второй соответствует измеренному и его корректировка в моделях коэффициентов теплоотдачи не требуется. Установлено также, что необходима более детальная нодализация парогенератора в сценариях, когда парогенератор играет важную роль.

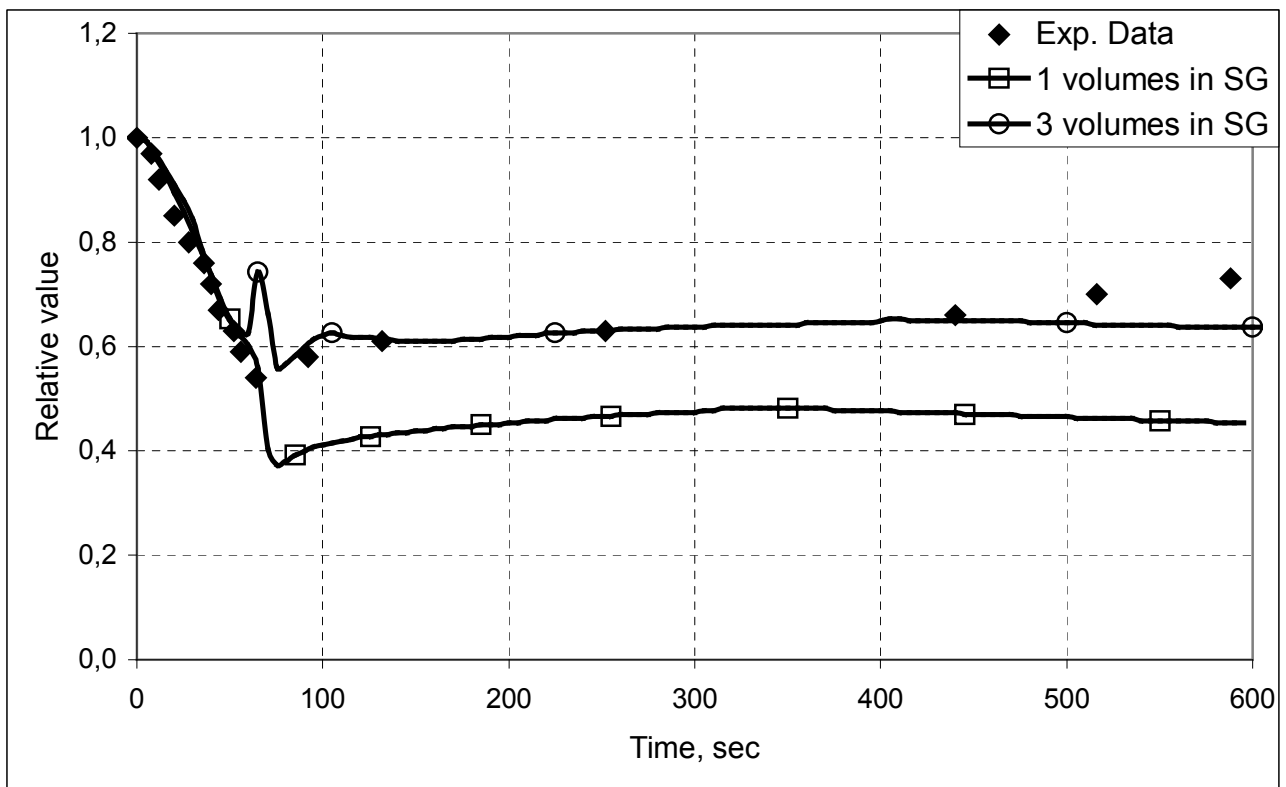
Другой важный вопрос, касающийся детальности нодализации ПГ: минимальное необходимое число расчётных объёмов внутри трубных пучков ПГ. Количество таких объёмов по высоте слабо влияет на результат и во многих случаях может быть использован 1 объём. Использование же одного расчётного объёма по длине трубных пучков со стороны первого контура приводит к существенно неверному расчету температурного перепада между первым и вторым контуром. При номинальных параметрах второго контура средняя температура в первом контуре получается завышенной более чем на 10К, что объясняется особенностями расчетного алгоритма MELCOR. А именно: при расчете теплопередачи между первым и вторым контурами в парогенераторе, температура теплоносителя в контрольных объемах, моделирующих парогенератор со стороны первого контура, незначительно отличается от температуры на выходе из этих объёмов как это показано на Рис. 1-4. Эта расчётная температура  $T_{cvh} \approx T_{min}$  используется в качестве граничного условия для тепловых структур пучка теплообменных труб парогенератора. В условиях, когда имеет место существенный температурный градиент по длине канала, более корректно использовать температуру теплоносителя, усреднённую по длине канала.

$$\Delta T_c = (\Delta T_{max} - \Delta T_{min}) / \ln(\Delta T_{max} / \Delta T_{min}).$$

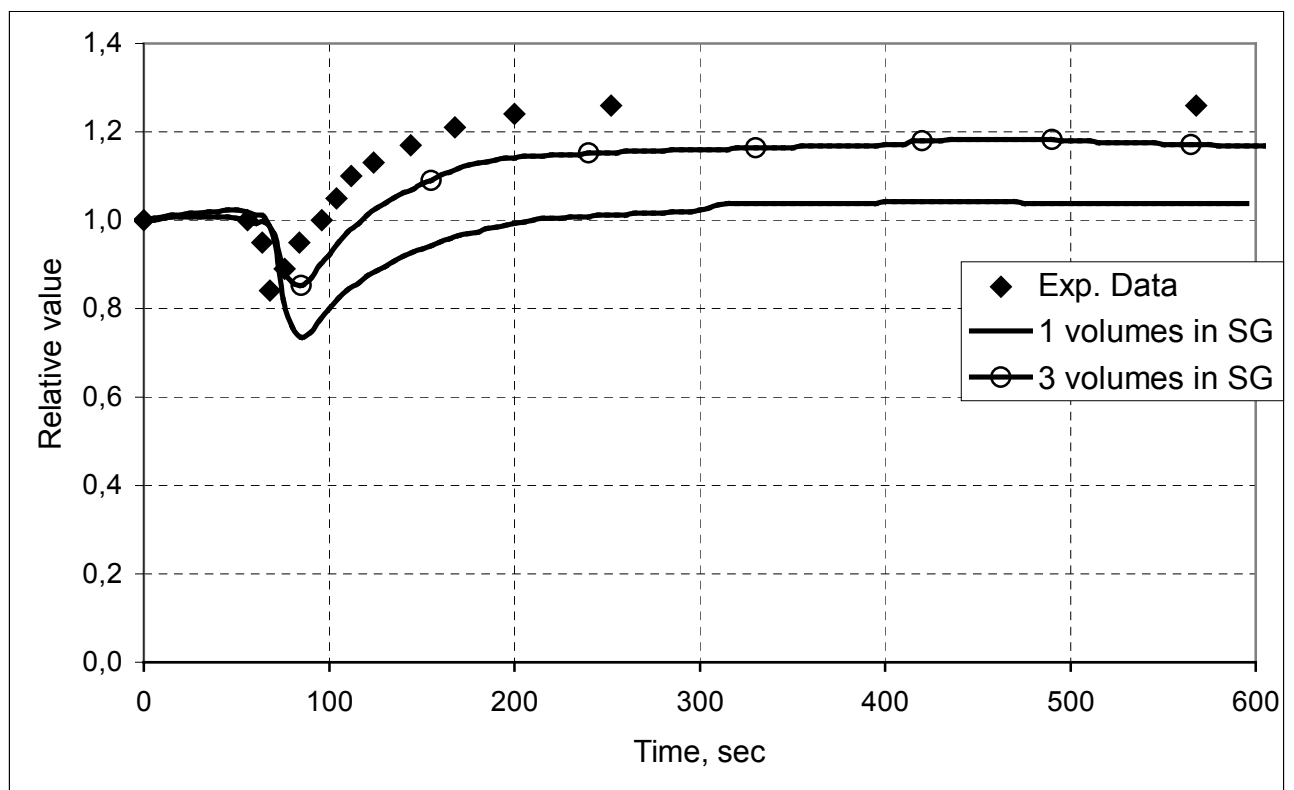
В MELCOR такая возможность отсутствует и необходимо задание нескольких расчётных объёмов по длине трубных пучков. Измененная нодализационная схема для трубных пучков парогенераторов приведена на Рис. 1-5 и отличается от базовой разделением трубки по длине на три участка. В этом случае превышение перепада температур в 1-м и 2-м контуре по сравнению с реальным значением не превосходит 1 С.



**Рис. 1-1** Нодализация ПГ со стороны второго контура



**Рис. 1-2** Уровень теплоносителя в аварийном ПГ в аварии с прекращением подачи питательной воды для вариантов модели ПГ (ПГ-4) со стороны второго контура в виде 1-го расчётного объёма и 3-х расчётных объёмов



**Рис. 1-3** Уровень теплоносителя в неаварийном ПГ (ПГ-3) в аварии с прекращением подачи питательной воды для вариантов модели ПГ со стороны второго контура в виде 1-го расчётного объёма и 3-х расчётных объёмов

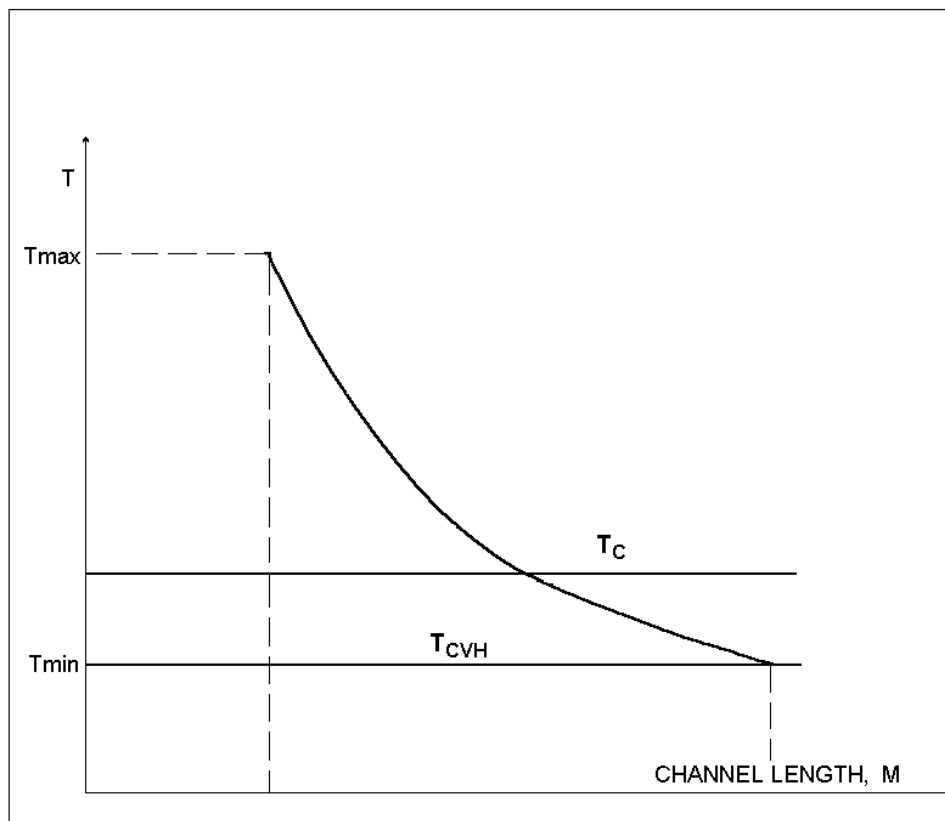


Рис. 1-4 Изменение температуры теплоносителя по длине трубного пучка ПГ

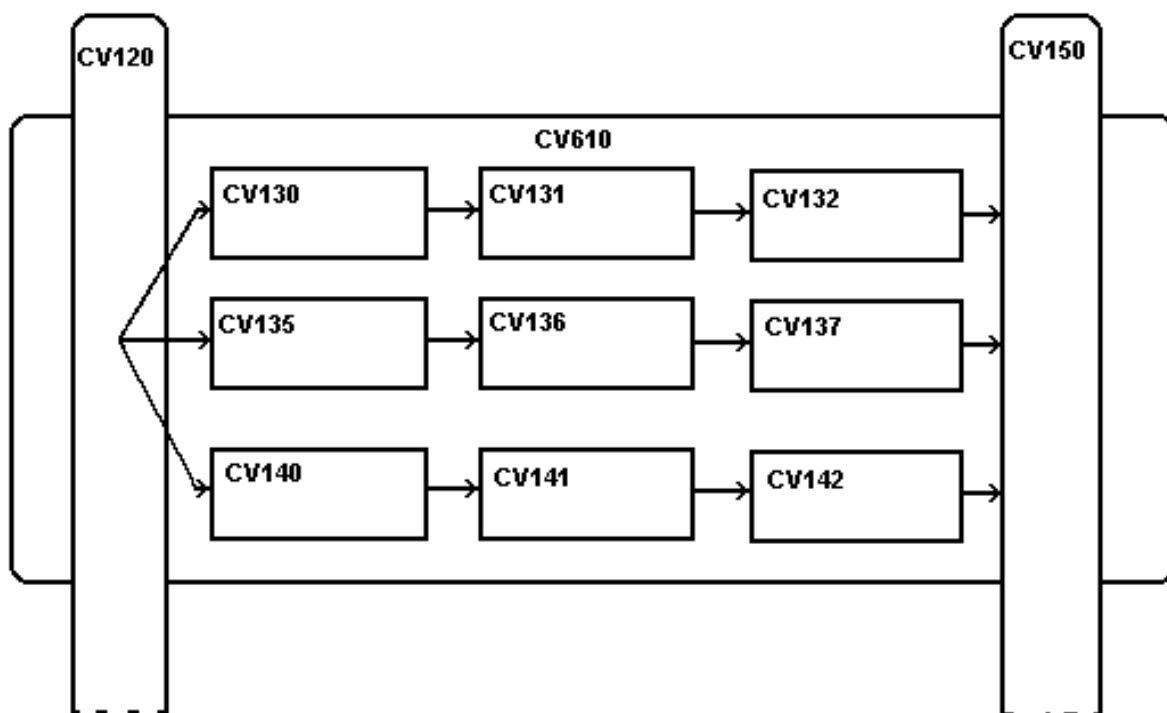
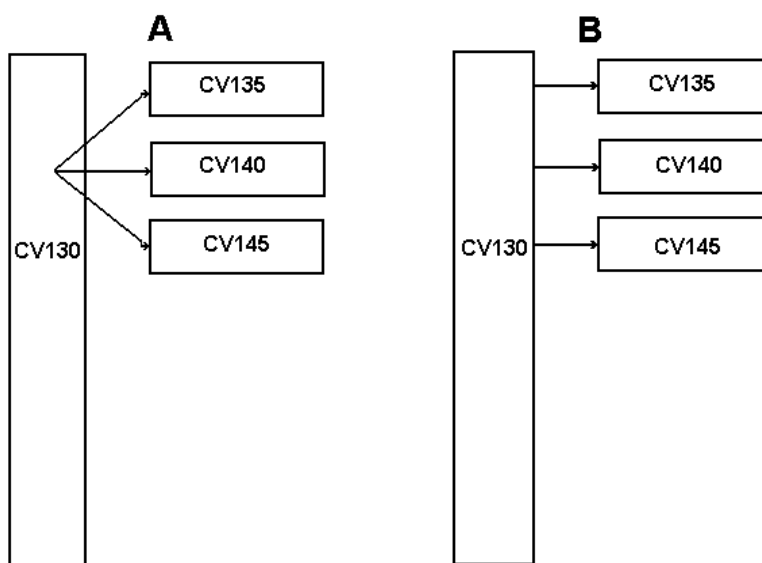
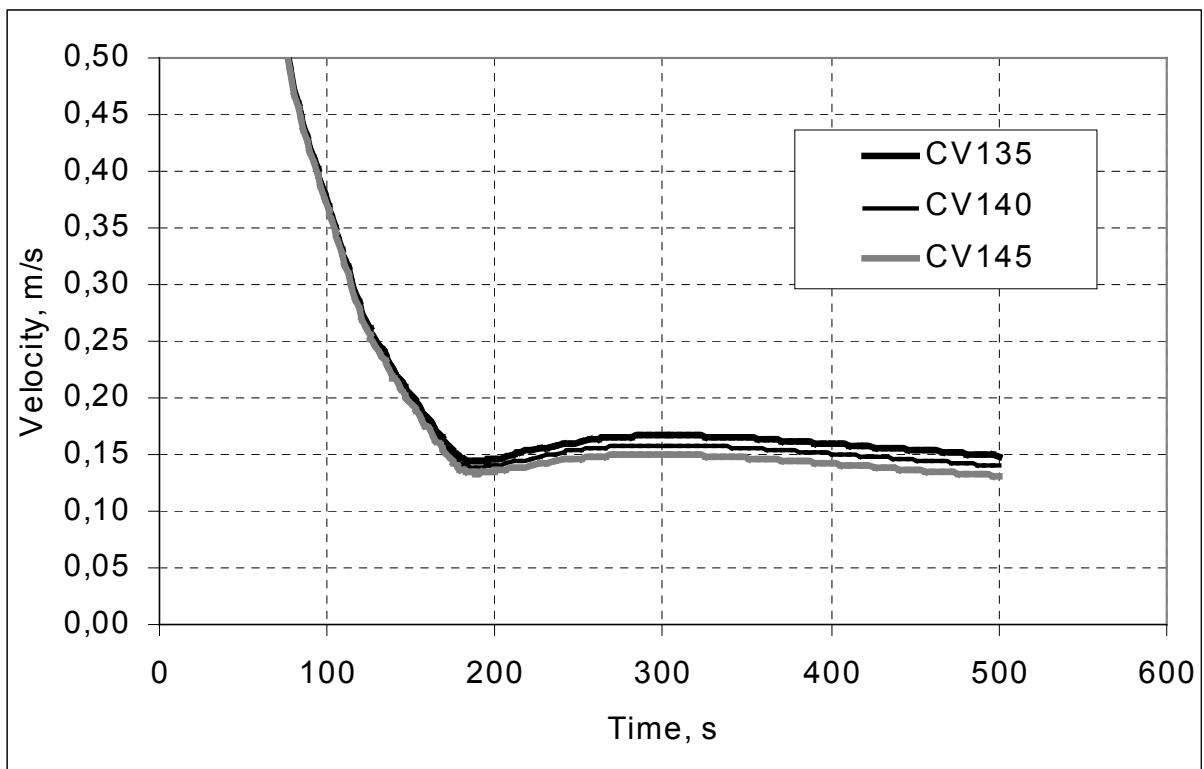


Рис. 1-5 Схема нодализации трубных пучков парогенераторов по 1-у контуру

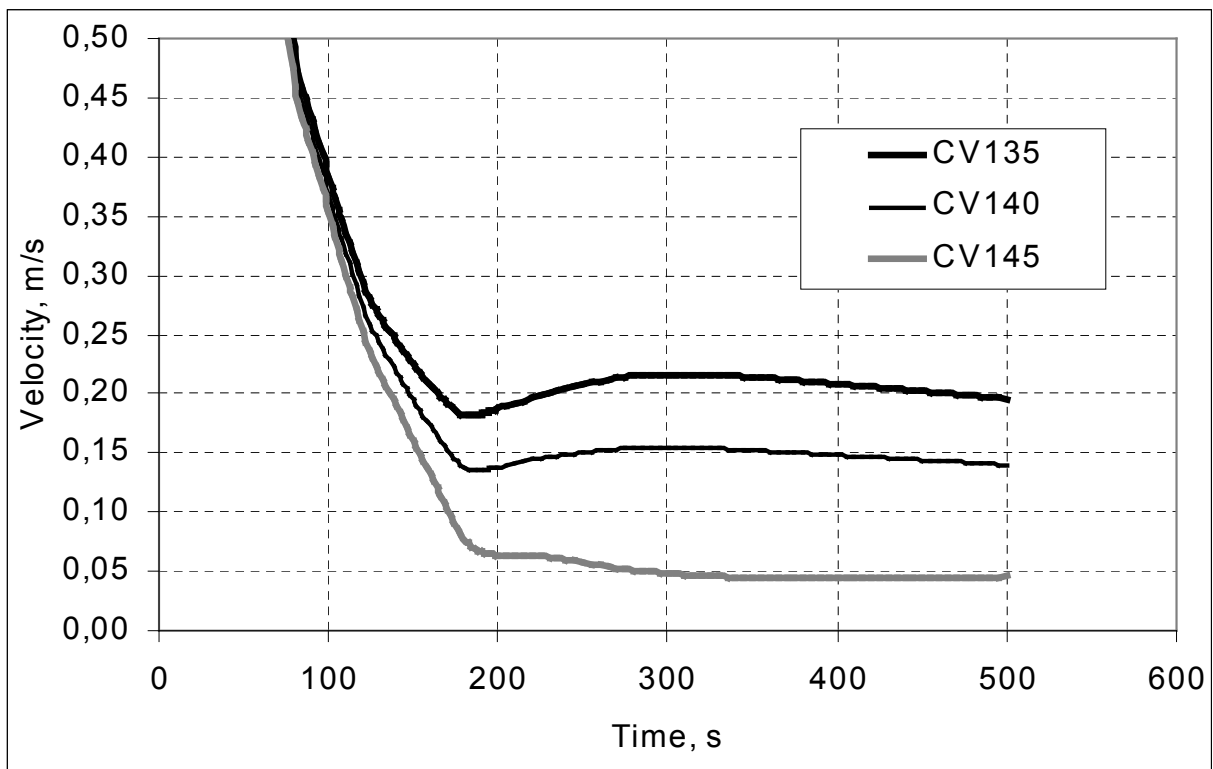
При проведении расчетов стадии естественной циркуляции в контуре охлаждения реактора было обнаружено заметное влияние значения высоты соединений между элементами коллектора и трубчатки (FLXXX00(ZMF)) на скорость циркуляции. Например, связывая параллельные каналы, моделирующие трубчатку парогенератора – CV135, CV140, CV145, с входным коллектором на различных высотах в пределах коллектора, можно видеть, что соотношение скоростей в этих каналах сильно изменяется. Рассматривались две схемы соединений, представленные на Рис. 1-6. Кривые на Рис. 1-7 показывают скорости течения теплоносителя в режиме естественной циркуляции через трубные пучки, для варианта соединения их с объёмом входного коллектора, представленного на Рис. 1-6А. На Рис. 1-8 представлены скорости для варианта соединения, представленного на Рис. 1-6В. В первом случае скорости различаются незначительно, что соответствует действительности. Во втором, скорость в верхнем объёме – CV135, вчетверо превосходит скорость в нижнем объёме – CV145. Это создаёт неравномерность теплового потока по высоте трубных пучков парогенератора и следовательно снижает суммарный тепловой поток во второй контур. Это, в свою очередь, уменьшает перепад температур между горячей и холодной веткой и интенсивность естественной циркуляции. При определённом задании высотного положения связей в каналах парогенератора может возникнуть локальный контур естественной циркуляции, когда через нижний канал теплоноситель движется в обратном направлении. Всё сказанное относится также ко всем связям в контуре циркуляции.



**Рис. 1-6 Модели с различным заданием высот соединений между расчётными элементами ПГ**



**Рис. 1-7** Скорость течения т/н в ПГ. Расчет для модели парогенератора с соединением объемов трубных пучков в центре входного коллектора



**Рис. 1-8** Скорость течения т/н в ПГ. Расчет для модели парогенератора с соединением объемов трубных пучков на уровне середины соответствующего объема

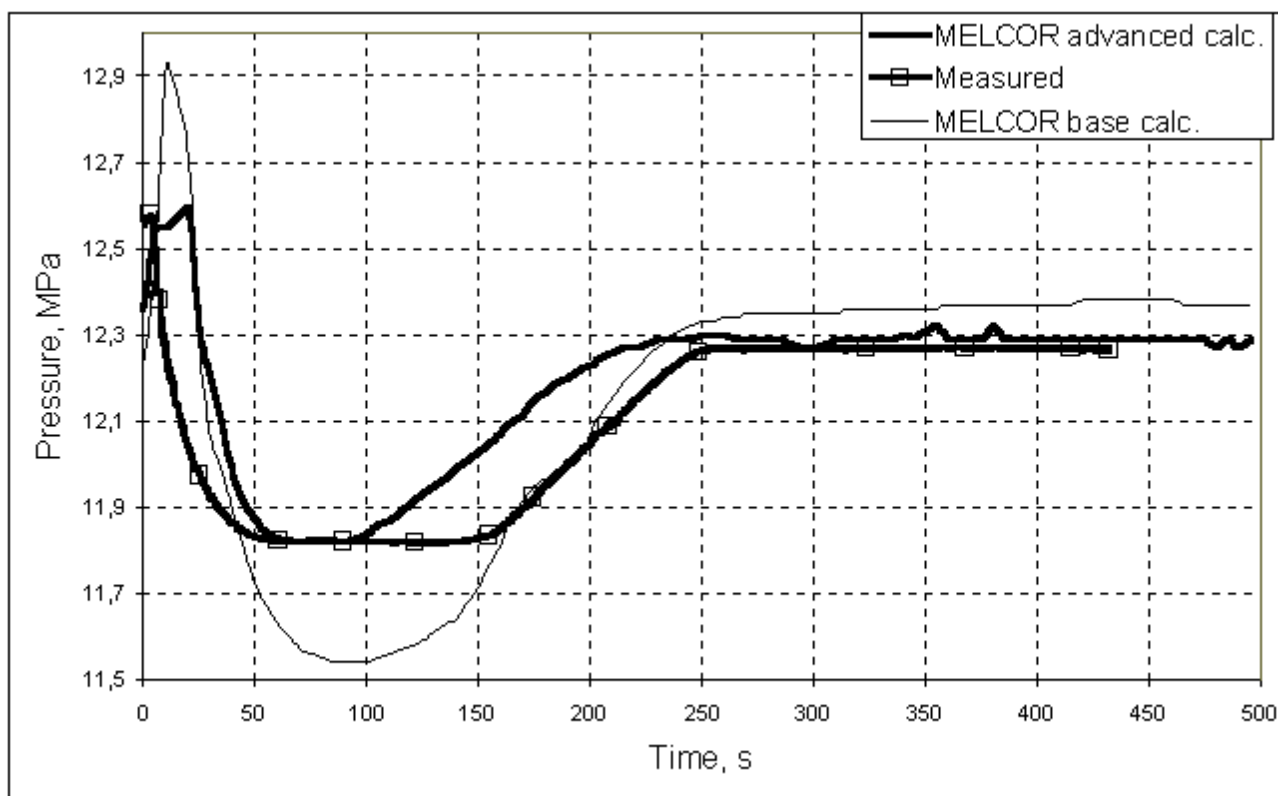
## 1.2. Нодализация компенсатора давления

Анализ модели компенсатора давления выполнен на основе экспериментальных данных для третьего энергоблока Кольской АЭС. В рассмотренном переходном режиме главные циркуляционные насосы были отключены системой безопасности ГЦН. Этот момент является началом переходного процесса. В базовом расчёте компенсатор давления моделировался в виде одного расчётного объёма. На Рис. 1-9 тонкой линией показано давление в КД в расчёте по базовой модели. На расчётной кривой давления в компенсаторе давления можно видеть скачок сразу после начала переходного режима, отсутствующий в эксперименте. В расчёте скачок обусловлен резким ростом уровня в компенсаторе давления в момент ухудшения теплоотвода во второй контур (из-за снижения расхода) при сохранения прежней мощности в активной зоне до момента срабатывания АЗ-1 через 3 сек. Проведенный анализ показал, что при увеличении давления срабатывает система впрыска в паровой объём компенсатора давления, которая и должна отработать этот скачок. Из сравнения можно заключить, что модель впрыска в используемом входном наборе недостаточно эффективна и требует корректировки. Далее следует столь же резкое падение давления в результате уменьшения тепловыделения в активной зоне и снижения средней температуры теплоносителя в первом контуре. Глубина падения давления в расчёте определяется инерционностью блоков электронагревателей в модели реактора. В базовой нодализационной схеме модель компенсатора давления представлена одним гидродинамическим элементом, частично заполненным водой. Для увеличения давления требуется разогрев всей имеющейся воды. Отличие состоит в том, что в реальной установке разогревается только часть теплоносителя, расположенная выше блоков электронагревателей, масса которой и следовательно температурная инерционность меньше. Из того же рисунка видно, что давление удерживается практически на одном уровне некоторое время, соответствующее периоду полного оборота воды по замкнутому контуру в результате разнонаправленного влияния работы блоков электронагревателей и снижения уровня теплоносителя в компенсаторе давления из-за снижения температуры во всей установке. После этого температура теплоносителя в реакторе достигает нового равновесного значения, падение уровня прекращается, и система поддержания давления первого контура выводит давление на уровень регулирования. Наклон кривой давления в этот период времени (100 – 250 секунд) почти полностью зависит от эффективности работы электронагревателей. Как уже отмечалось эффективность работы электронагревателей в базовой

нодализационной схеме оказалась недостаточной, что подтверждается также меньшим наклоном кривой давления в рассматриваемый период аварии.

Были выполнены расчёты с нодализацией компенсатора давления в виде двух и трех контрольных объемов, разделенных по его высоте в различных пропорциях. Установлено, что требуемая эффективность блока электронагревателей компенсатора давления достигается при его разбиении на два расчетных элемента. На графике давления, полученном по модифицированной нодализационной схеме – толстая линия на Рис. 1-9 - можно видеть хорошую сходимость с экспериментальными данными. В усовершенствованной модели КД также изменена модель системы впрыска в паровую часть компенсатора давления. Впрыск моделируется как источник тумана в паровой области компенсатора давления в виде:

CV603C1 MASS.2 (CF)XXX 3



**Рис. 1-9 Давление в КД (переходной режим - остановка ГЦН 3-го блоке Кольской АЭС). Расчёт с базовой и уточнённой моделью компенсатора давления**

### **1.3. Нодализация гидрозатворов**

При расчёте аварий с истечением теплоносителя важным является адекватное моделирование поведения гидрозатворов (U-образных участков трубопроводов) контура охлаждения. Различное их моделирование влияет на возможность прохождения пара, изменение уровней в коленах, количество остающейся воды и возможность её подтекания в реактор на поздней стадии аварии. Расчёты экспериментов на установках PMK-2, PACTEL, BETSY показали необходимость разбиения гидрозатворов на 3 контрольных объёма с выделением горизонтального и вертикальных участков.

### **1.4. Нодализация области активной зоны**

Влияние нодализации свободного объёма активной зоны, занятого водой или паром, исследовалось путём сравнения теплотехнических результатов расчёта для различных вариантов нодализации:

- 2 объёма в активной зоне (область ТВС и область выгордки);
- 4 объёма (3 параллельных канала в области ТВС и область выгордки);
- 12 объёмов (параллельные каналы дополнительно разделены на 3 участка по высоте активной зоны).

Схема нодализации активной зоны, включающая 12 объёмов (без учёта нижней камеры реактора), представлена на Рис. 1-10. Во всех трех вариантах область ТВС состояла из 3-х радиальных зон. Область выгордки моделировалась в виде отдельной радиальной зоны пакета COR и помещалась в отдельный расчётный объём. Это сделано для учёта окисления и плавления стали из состава выгордки. В версии MELCOR-1.8.5 появилась возможность моделировать плавление тепловых структур на границе активной зоны (пакет Heat Structure), однако нет возможности моделировать окисление. Кроме этого, расчёты показывают необходимость моделирования радиального перемещения расплавленных материалов в область выгордки и возможное дальнейшее её разрушение.

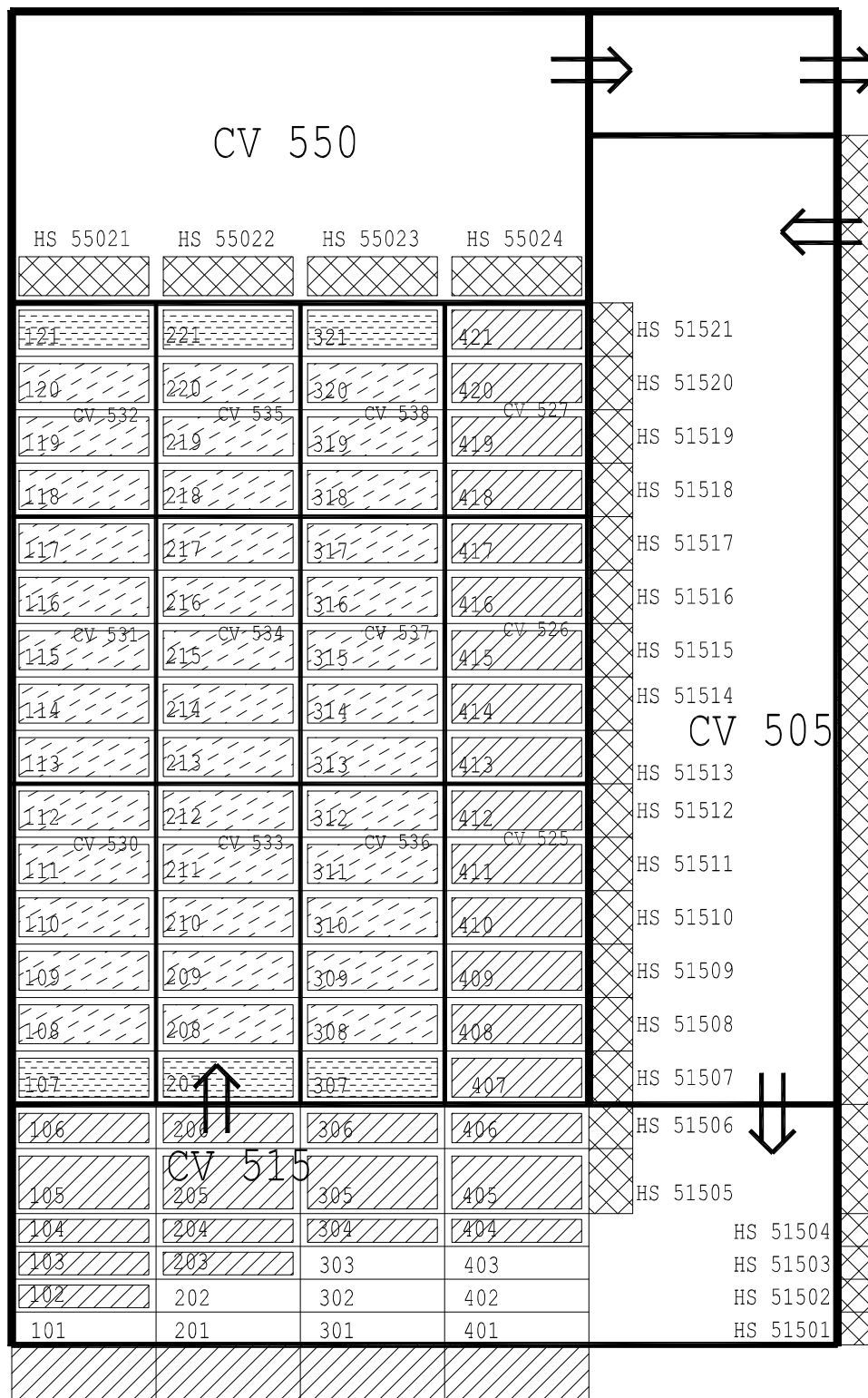
Влияние нодализации конструктивных элементов активной зоны представлено в следующей главе. В данной главе рассмотрено влияние нодализации теплогидравлических объёмов. На Рис. 1-11, Рис. 1-12 представлены графики

изменения уровня теплоносителя в области активной зоны реактора в аварии типа «большая течь» для различных вариантов нодализации. Для нодализации из 2-х расчётных объёмов наблюдается отставание скорости осушения активной зоны. И максимальное отличие времён полного выпаривания воды из корпуса реактора имеет место с вариантом нодализации из 12 расчётных объёмов – около 3500 сек. Анализ результатов показал, что такое отличие не связано с различным поведением уровня раздела фаз и различием количества истекающей воды на начальном этапе аварии. Как показано на Рис. 1-13, интегральное количество истекающей воды практически не различается в различных расчётах. Это говорит о хорошей устойчивости теплогидравлических результатов расчёта по коду MELCOR-1.8.5 к нодализации контура охлаждения. Причина различий объясняется различием моментов начала плавления элементов и следовательно, мощностей, расходуемых на выпаривание воды. На Рис. 1-14, Рис. 1-15 представлены графики изменения температуры оболочек твэл в верхней части активной зоны реактора для нодализации из 4-х и 12-и расчётных объёмов, соответственно. В расчёте для нодализации из 12-и расчётных объёмов заметно раньше достигается температура плавления материалов и происходит разрушение твэл. Расплавленный металл поступает под уровень теплоносителя и ускоряет выпаривание воды. Скорость разогрева твэл, в свою очередь, объясняется различием расчёта локальных температур среды в модуле  $dT/dz$ .

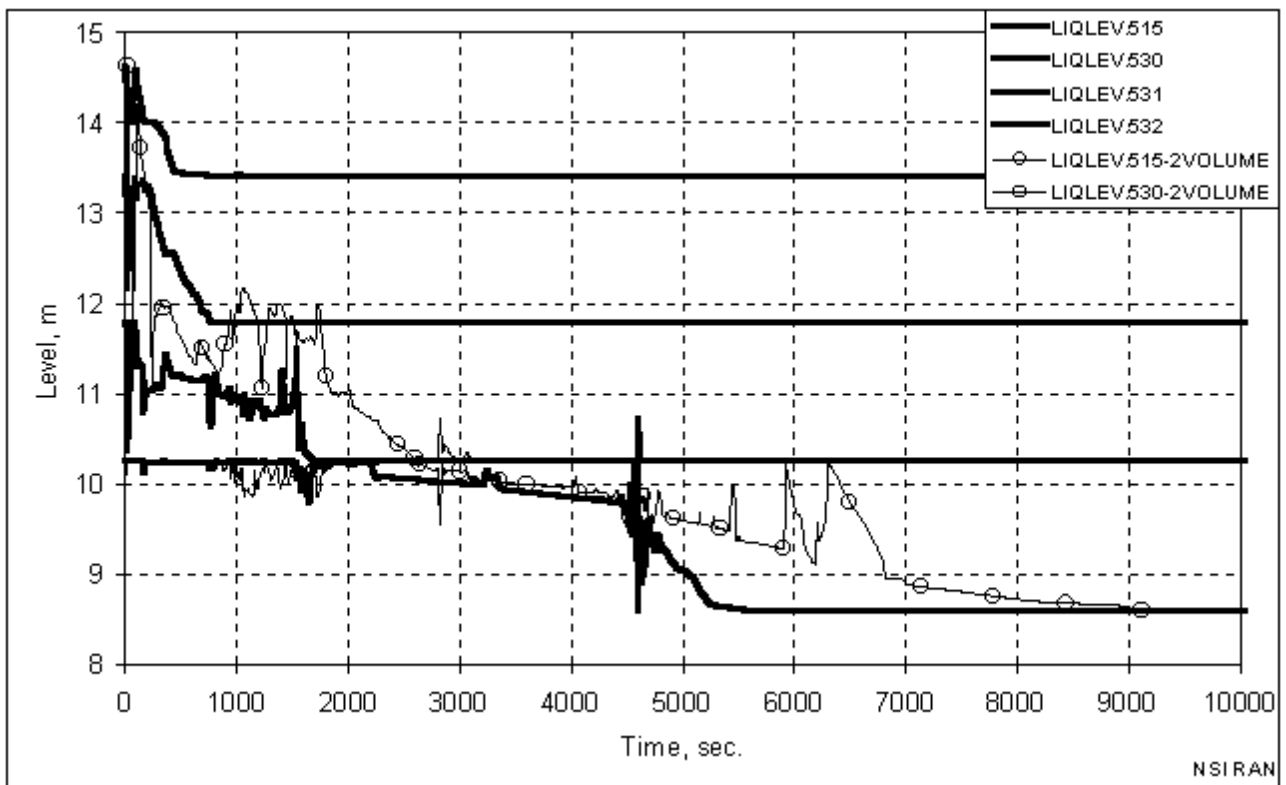
Представленное различие результатов должно учитываться при анализе аварий с частичным плавлением активной зоны либо её перегревом. Что касается тяжёлых аварий с полным плавлением активной зоны и выходом кориума в шахту реактора, то результаты их моделирования могут быть оценены сравнением следующих интегральных параметров: масса образовавшегося в активной зоне водорода; время начала выхода кориума в шахту реактора; масса выходящего кориума. На Рис. 1-16 показаны сравнительные результаты по образованию водорода в результате окисления Zr. Существенное занижение массы водорода для варианта нодализации из 12-и расчётных объёмов объясняется меньшим периодом времени от начала пароциркониевой реакции до момента разрушения твэл. На Рис. 1-17 представлены сравнительные результаты по массе кориума, поступающего в шахту реактора. Незначительные различия связаны с возникновением различий в стратификации материалов на днище корпуса реактора.

Подводя итог выполненного сравнительного анализа следует отметить, что использование схемы нодализации области активной зоны в составе расчётного

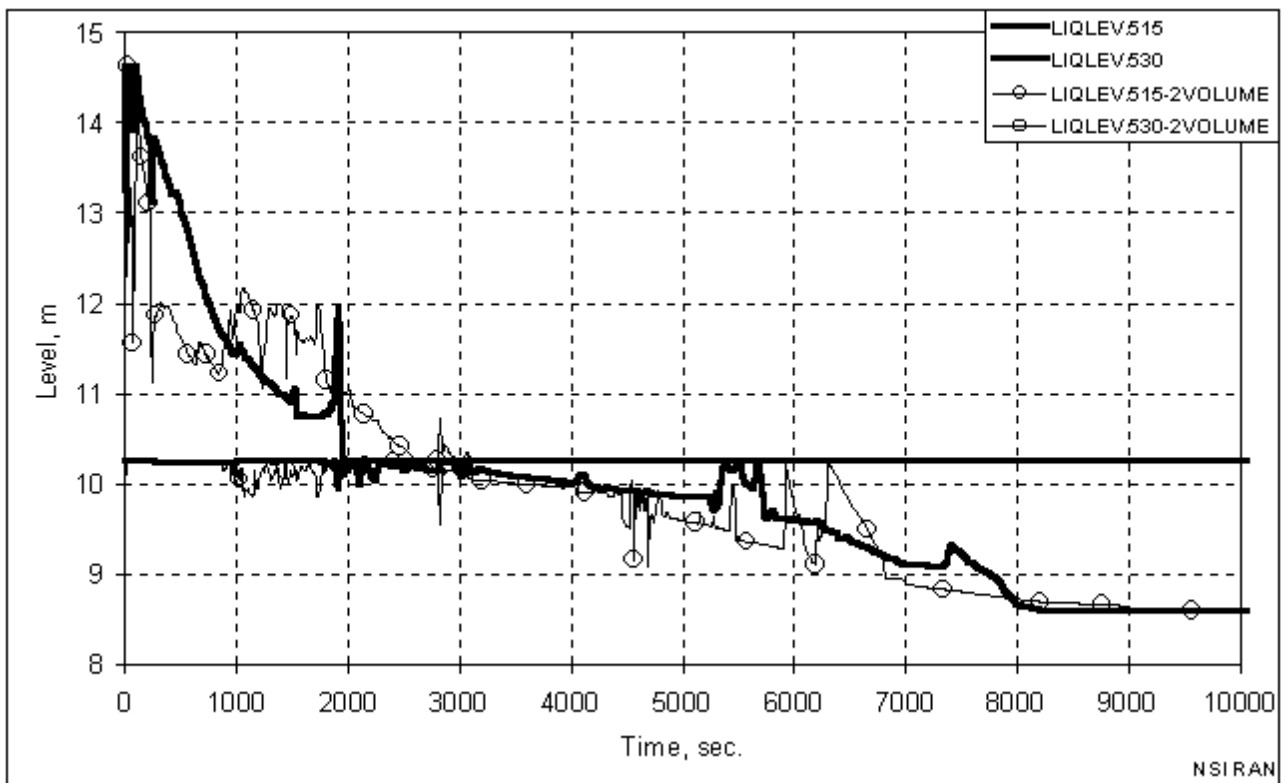
объёма, включающего более одной радиальной зоны представляется недопустимым из-за некорректности результата в модуле dT/dz. Деление расчётных объёмов по высоте активной зоны следует выполнять в случае возможного образования блокировок и возникновения сложных течений в активной зоне.



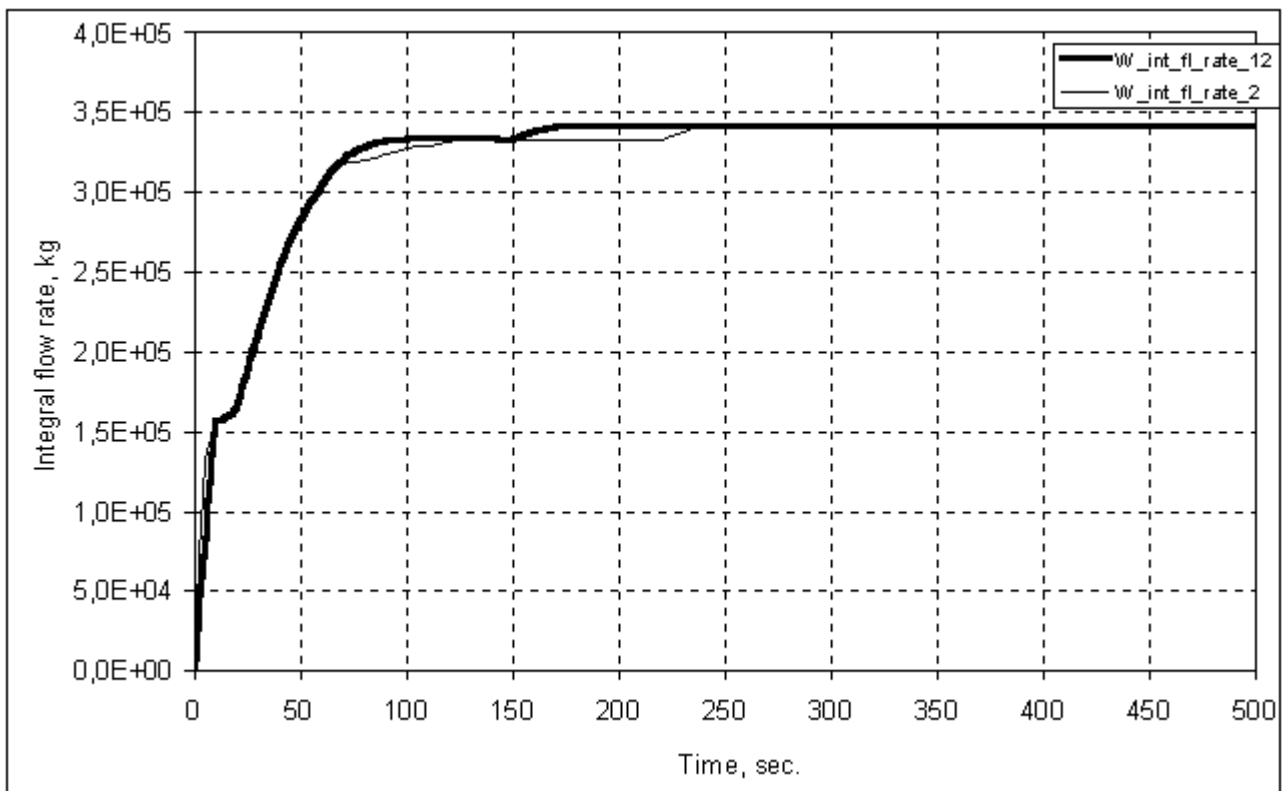
**Рис. 1-10** Схема нодализации активной зоны реактора ВВЭР-1000, включающая 4 радиальных области, 21 аксиальный участка и 13 расчётных объёмов пакета CVH



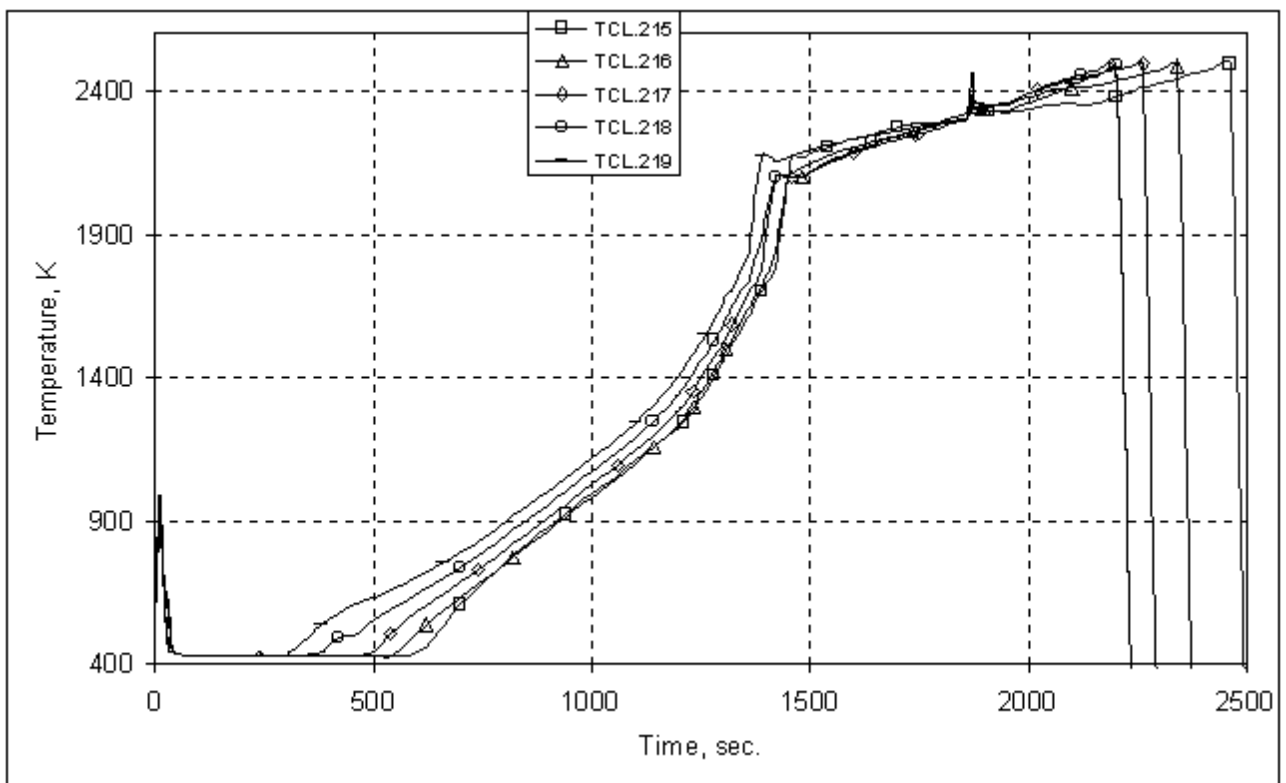
**Рис. 1-11** Уровень теплоносителя в активной зоне и нижней камере реактора для вариантов расчёта: 12 расчётных объёмов в активной зоне; 2 расчётных объёма в активной зоне



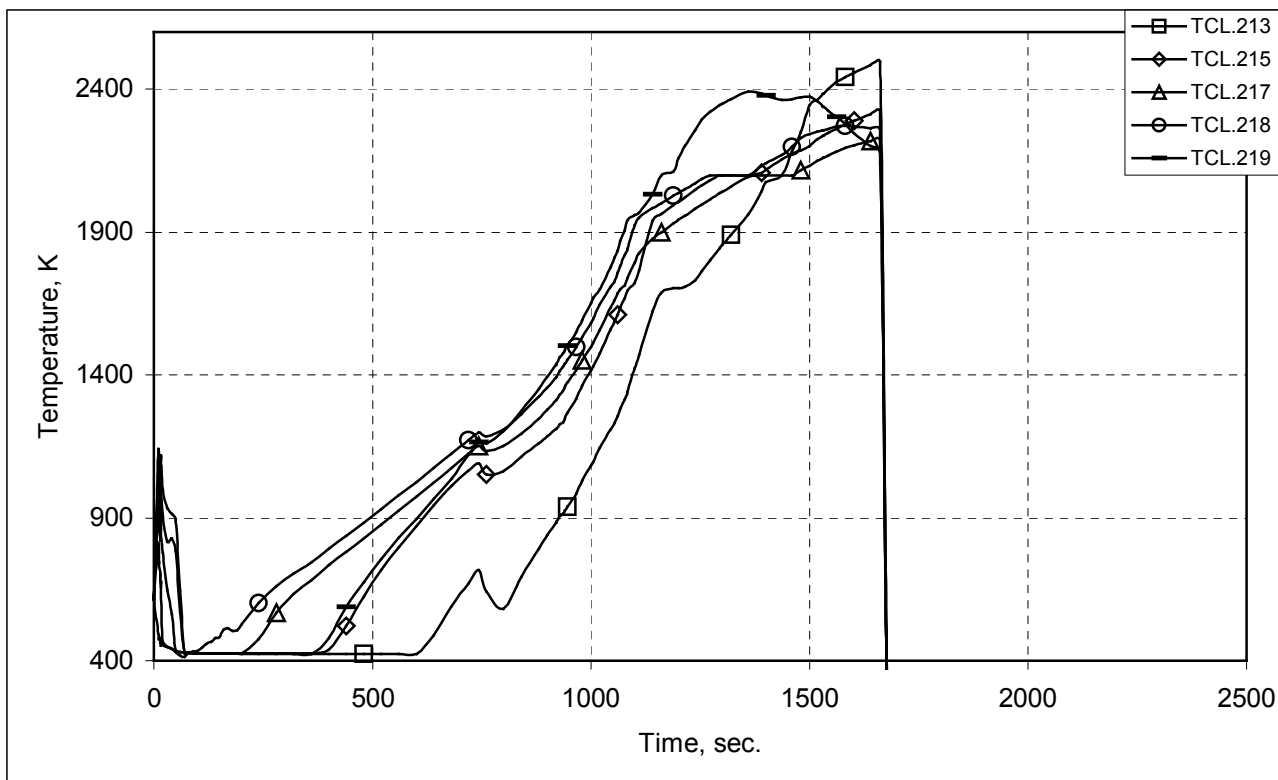
**Рис. 1-12** Уровень теплоносителя в активной зоне и нижней камере реактора для вариантов расчёта: 4 расчётных объёма в активной зоне; 2 расчётных объёма в активной зоне



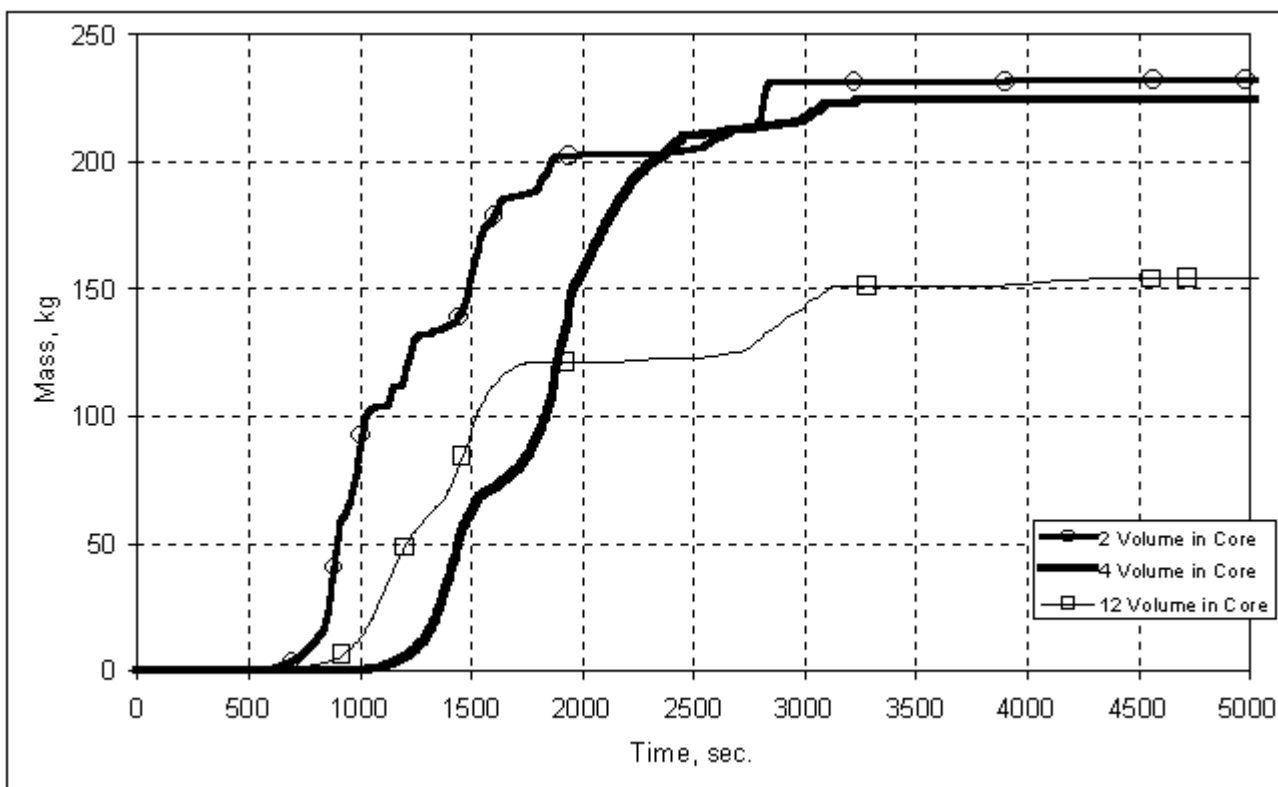
**Рис. 1-13 Интегральный выброс воды из реактора для вариантов расчёта: 12 расчётных объёмов в активной зоне; 2 расчётных объёма в активной зоне**



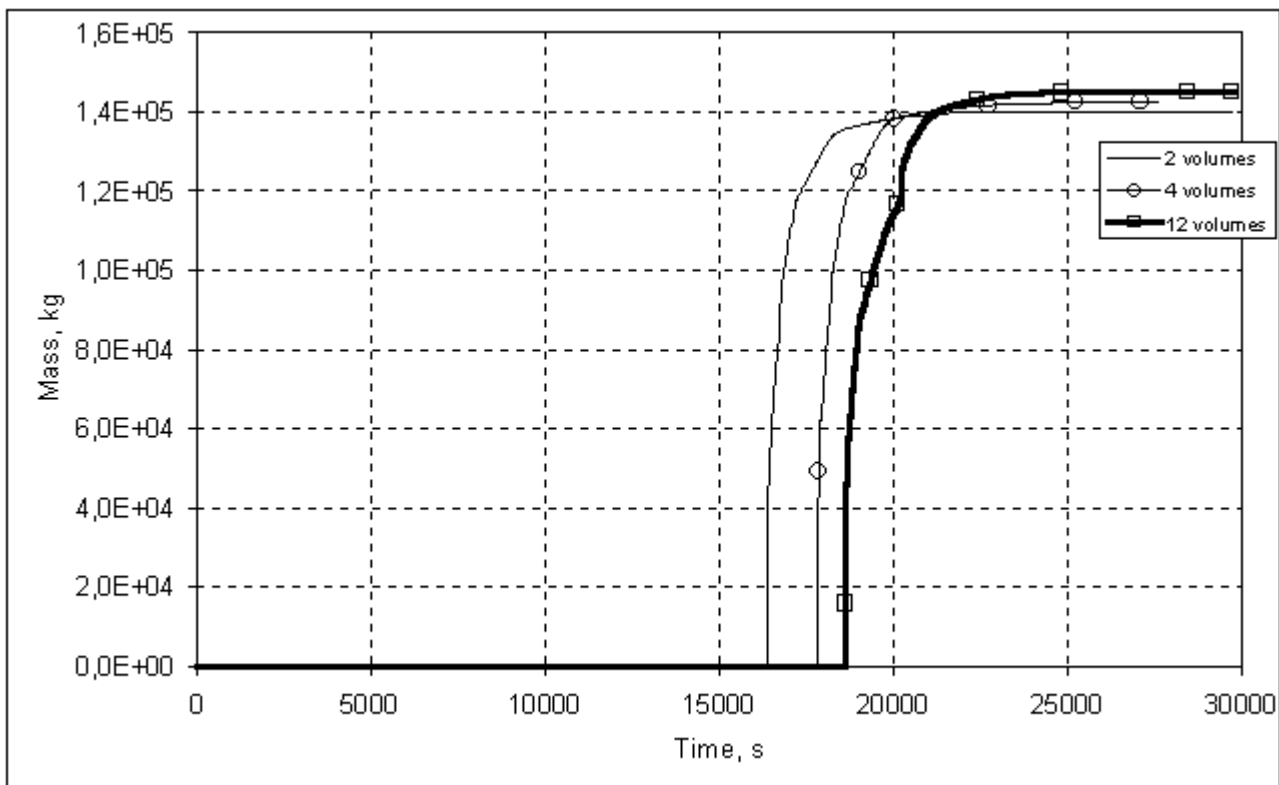
**Рис. 1-14 Температура оболочек твэл в наиболее энергонапряжённой части активной зоны. Расчёт с 4 расчётными объёмами в активной зоне**



**Рис. 1-15 Температура оболочек твэл в наиболее энергонапряжённой части активной зоны. Расчёт с 12 расчётными объёмами в активной зоне**



**Рис. 1-16 Интегральная масса водорода, образующегося в результате реакции окисления Zr (без учета окисления стали), в расчетах с различным количеством расчётных объёмов активной зоны (авария типа «большая течь»).**



**Рис. 1-17** Масса кориума, поступающего из реактора в бетонную шахту для вариантов расчёта: 12 расчётных объёмов в активной зоне; 4 расчётных объёма; 2 расчётных объёма

## 2. Оптимизация расчётной (нодализационной) схемы активной зоны реактора

Выбор схемы нодализации активной зоны может существенно зависеть от её конструкции. Наиболее характерным примером является активная зона реактора ВВЭР-440.

Основная особенность конструкции активной зоны реактора ВВЭР-440 – наличие 37 аварийно-регулирующих кассет (ТВС АК) - Рис. 2-2. ТВС АК представляет собой подвижную конструкцию, состоящую из ТВС, по конструкции незначительно отличающейся от обычной ТВС и поглощающей надставки. ТВС АК свободно перемещается в вертикальном направлении для поддержания требуемого нейтронно-физического состояния активной зоны. Структура MELCOR предполагает отнесение материала поглощающих стержней к байпасу активной зоны, в соответствии с конструкцией реактора BWR. В реакторе ВВЭР-440, байпас и основной канал ниже опорной плиты активной зоны меняются местами. Это приводит к невозможности моделировать объём внутри ТВС АК и между ТВС АК в составе одной радиальной

зоны. В противном случае, при релокации материалов из активной зоны, материалы твэлов располагаются в объеме внутри ТВС АРК, а поглотитель в объеме между ТВС АРК. Однако, это не соответствует реальной картине процесса. (Рис. 2-1). В пакете CVH пространство внутри всех ТВС АРК моделируется как отдельный канал, а именно, несколько расчётных объёмов по высоте активной зоны. В пакете COR ТВС АРК моделируются в виде отдельной расчётной зоны.

Сходные обстоятельства говорят в пользу задания выгородки в виде отдельной радиальной зоны пакета COR, вместо определения её в виде тепловых структур (пакет HS).

Вслед за этим возникает вопрос о степени детальности моделирования самих ТВС: необходимое число радиальных зон и аксиальных участков. Важно не только ответить на этот вопрос, но и убедиться в устойчивости интегральных результатов к количественному изменению нодализации. С целью уточнения этого вопроса выполнено расчётное исследование представленное ниже.

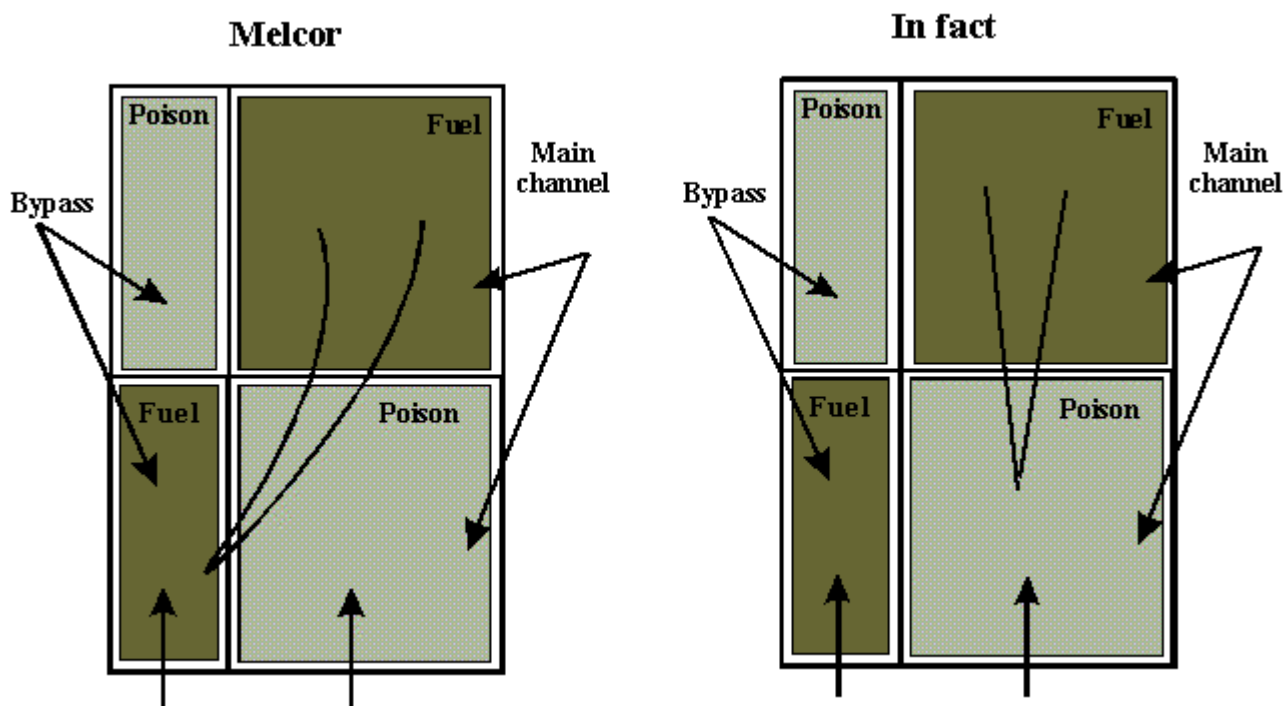


Рис. 2-1 Схема релокации материалов из активной зоны в область ТВС АРК в реакторе ВВЭР-440 и в модели MELCOR

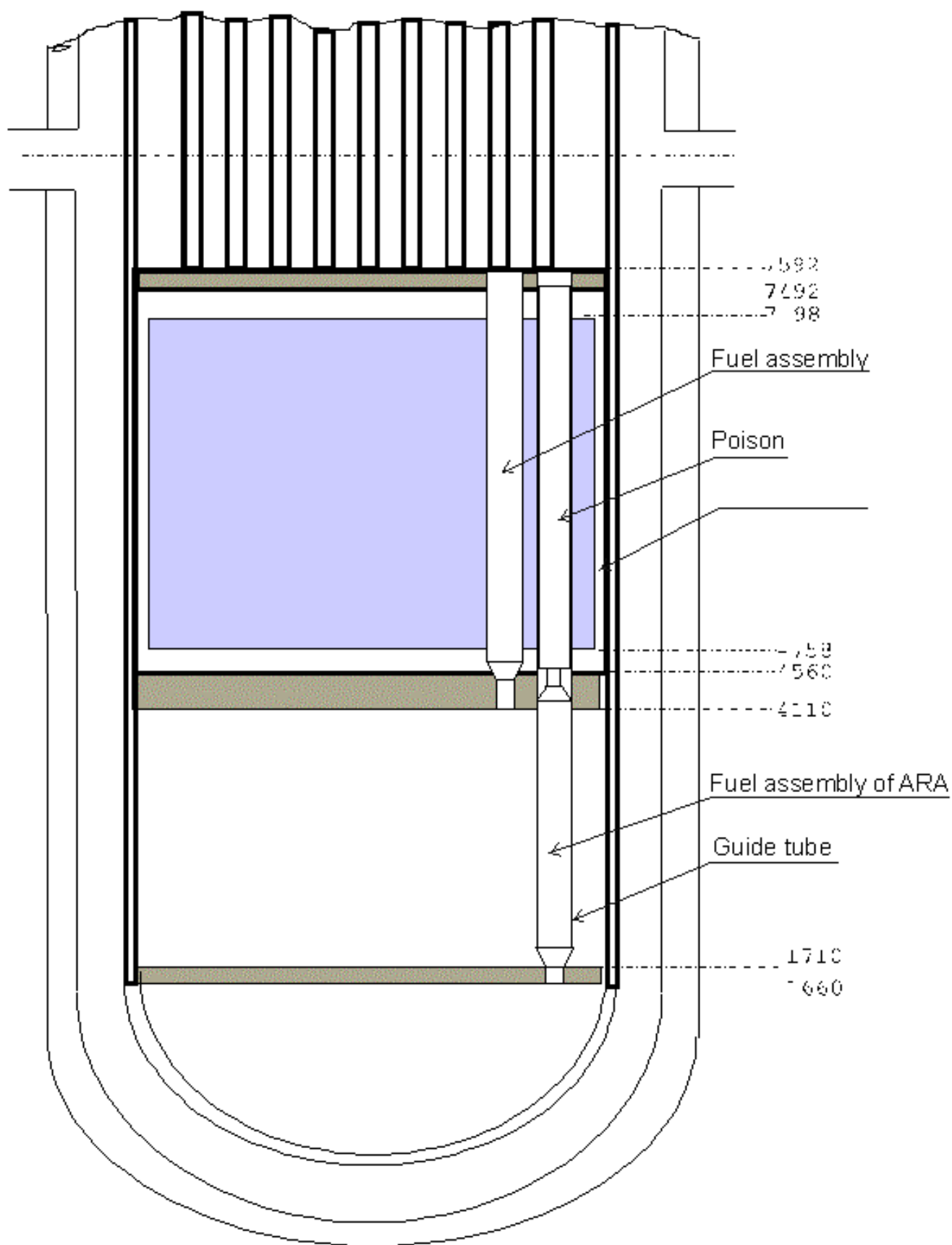


Рис. 2-2 Схema активной зоны реактора ВВЭР -440

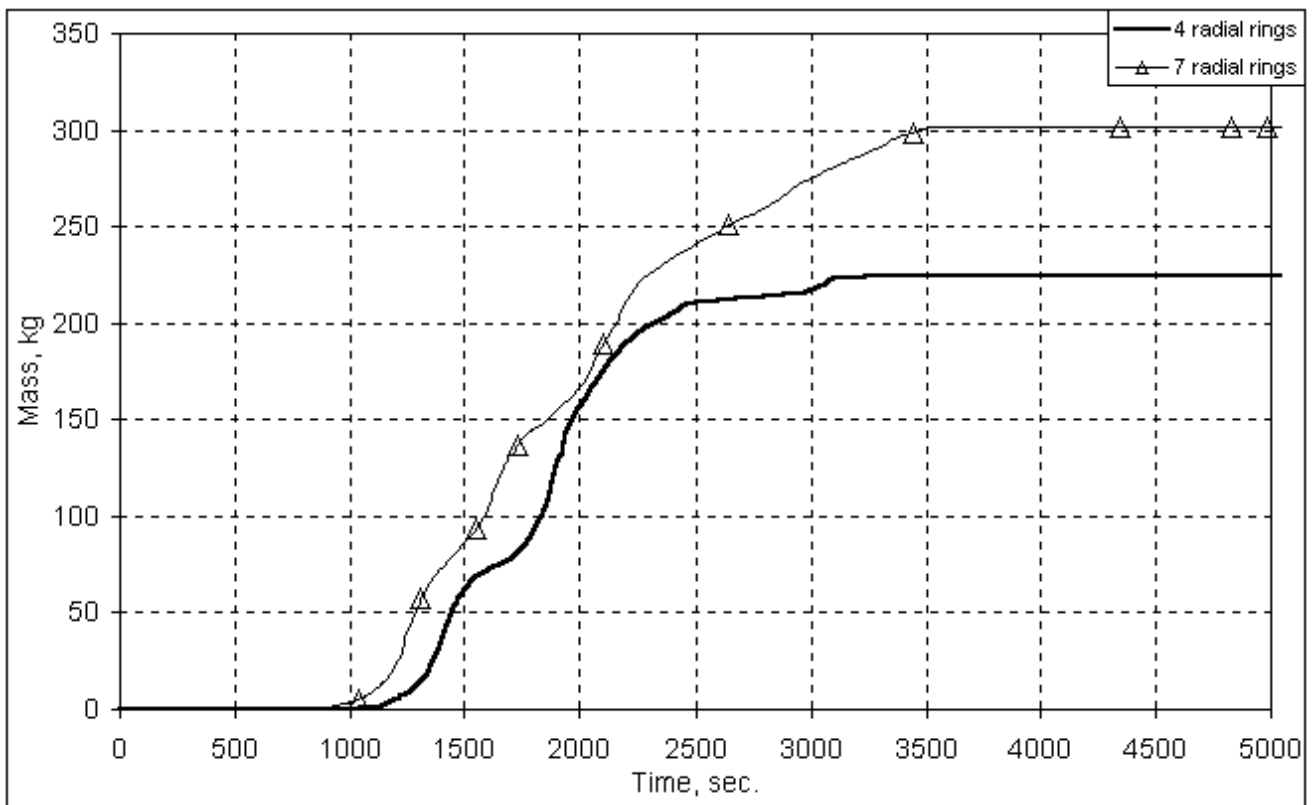
## **2.1. Влияние числа радиальных расчётных зон на поведение активной зоны при тяжёлой аварии**

Выполнен анализ результатов расчётов тяжёлых аварий реактора ВВЭР-1000 для модели активной зоны, состоящей из различного числа радиальных расчётных зон. При этом каждая расчётная зона находилась в отдельном гидродинамическом объёме (пакет CVH). Априори можно утверждать, что увеличение числа радиальных зон позволит снизить мощность радиационного теплопереноса от центра активной зоны в радиальном направлении, к выгородке. Это объясняется особенностями модели радиационного теплопереноса в коде MELCOR-1.8.5, использующей среднюю температуру расчётных элементов. При том, как показывают расчёты, средняя температура расчётных элементов может превышать температуру поверхности на сотни градусов. Снижение радиационного теплопереноса к выгородке приводит к ускорению разрушения активной зоны, уменьшению области плавления выгородки и её окисления.

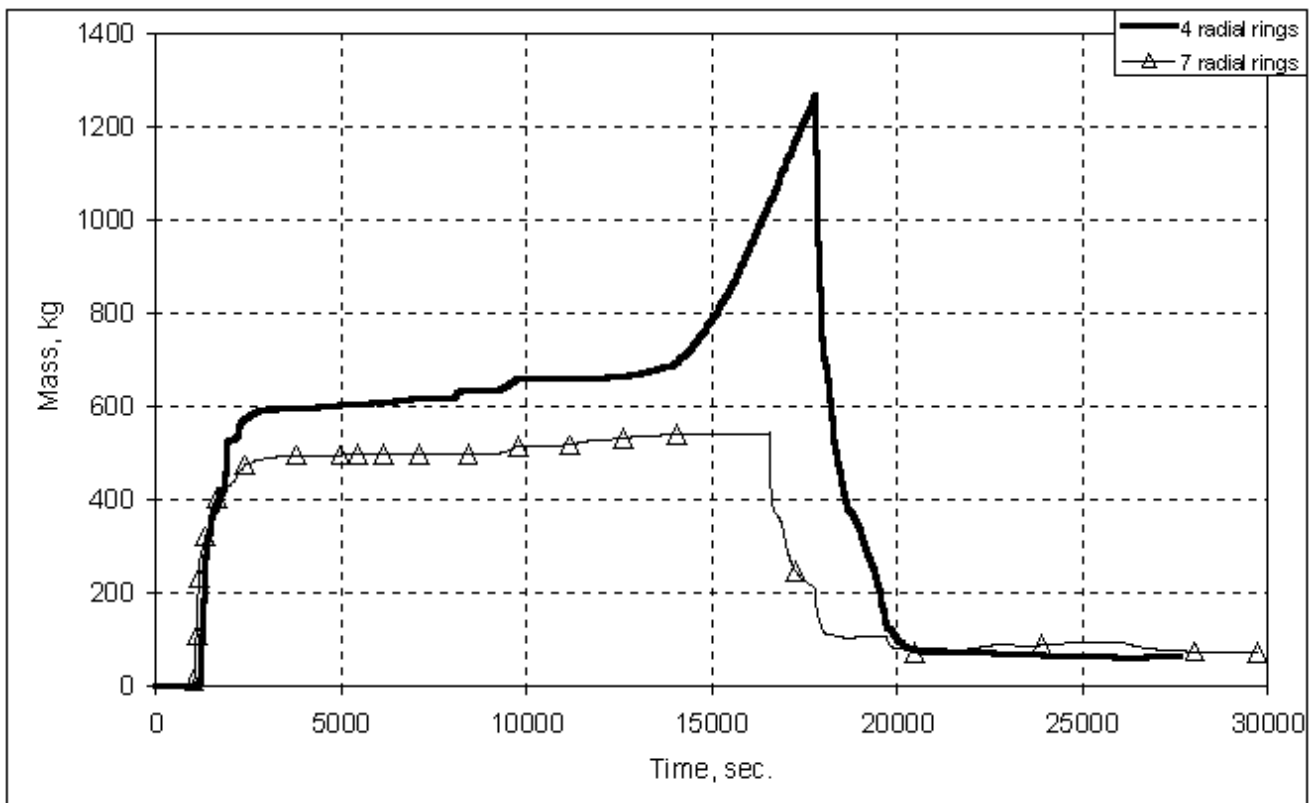
На Рис. 2-3 представлена интегральная масса водорода, образующегося в результате окисления Zr (без учета окисления стали) для двух моделей расчёта: 4 радиальных зоны; 7 радиальных областей. Превышение количества водорода в случае 7 радиальных областей составляет ~75 кг (около 30%). Это объясняется большей степенью усреднения температур в активной зоне в случае 4-х областей и сокращением периода времени с начала реакции окисления до разрушения твэл. Это можно наблюдать на графиках масс ZrO<sub>2</sub> представленных отдельно по каждой радиальной расчётной области - Рис. 2-5, Рис. 2-6. Следует учитывать, что интенсивность окисления Zr после разрушения твэл незначительна.

На Рис. 2-4 представлены суммарные массы окислов стали для двух вариантов расчёта. В случае 4-х расчётных областей наблюдается заметное превышение массы образовавшихся окислов. Как и ожидалось это объясняется увеличением области температур начала окисления стали в выгородке, содержащей основное количество стали. Кроме этого увеличивается масса расплавленной стали, поступающая из выгородки.

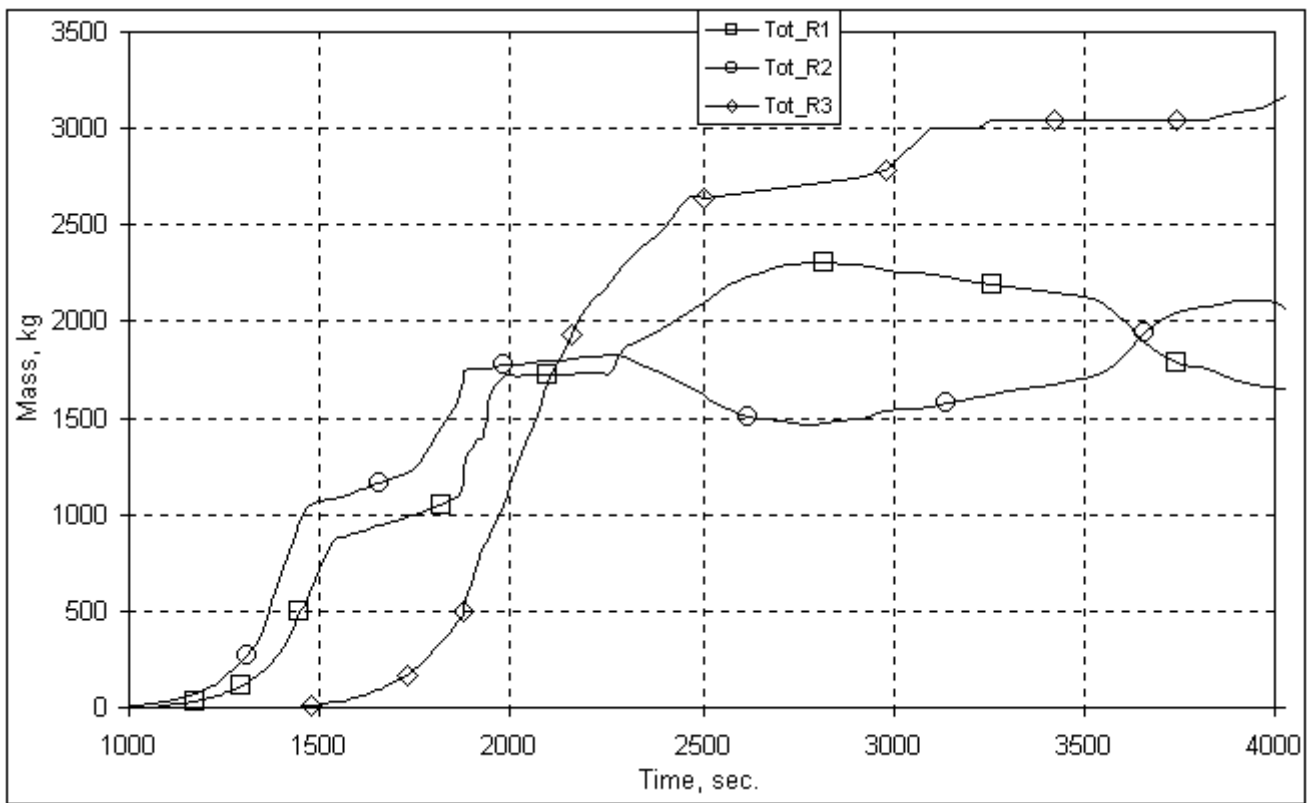
Следует отметить плавность изменения полученных интегральных результатов для вариантов расчёта с различным количеством радиальных областей.



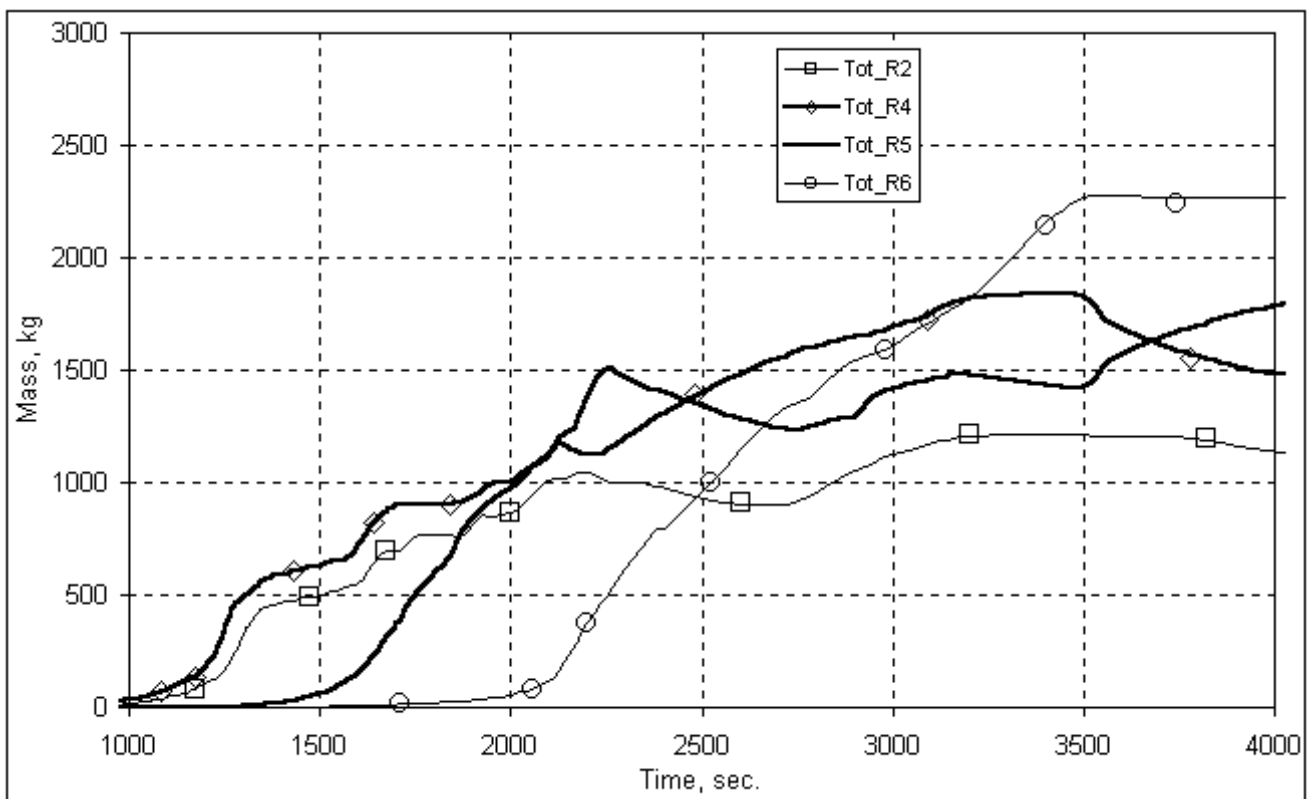
**Рис. 2-3 Интегральная масса водорода, образующегося в результате реакции окисления Zr (без учета окисления стали), в расчетах с различным количеством радиальных расчётных зон (авария типа «большая течь»)**



**Рис. 2-4 Интегральная масса окислов стали в расчетах с различным количеством радиальных расчётных зон (авария типа «большая течь»)**



**Рис. 2-5** Масса ZrO<sub>2</sub> в радиальных расчётных зонах активной зоны (4-х зонная модель)

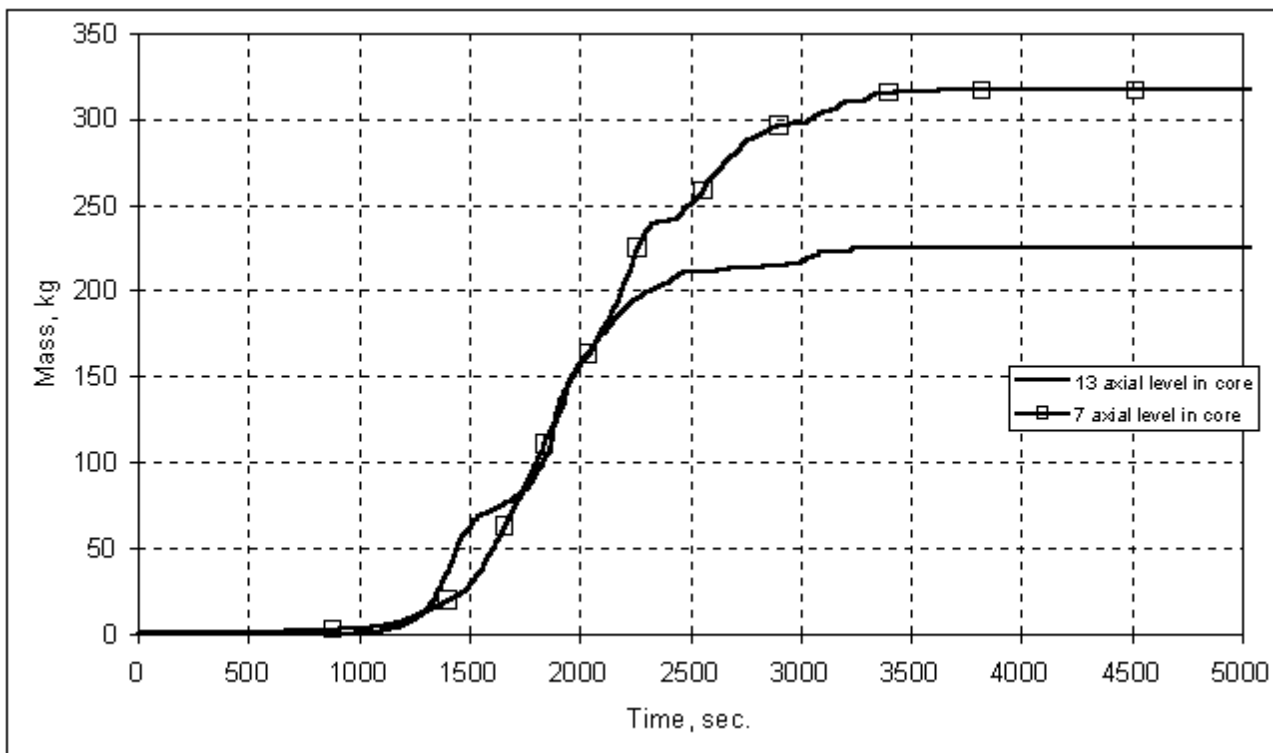


**Рис. 2-6** Масса ZrO<sub>2</sub> в радиальных расчётных зонах активной зоны (7-и зонная модель)

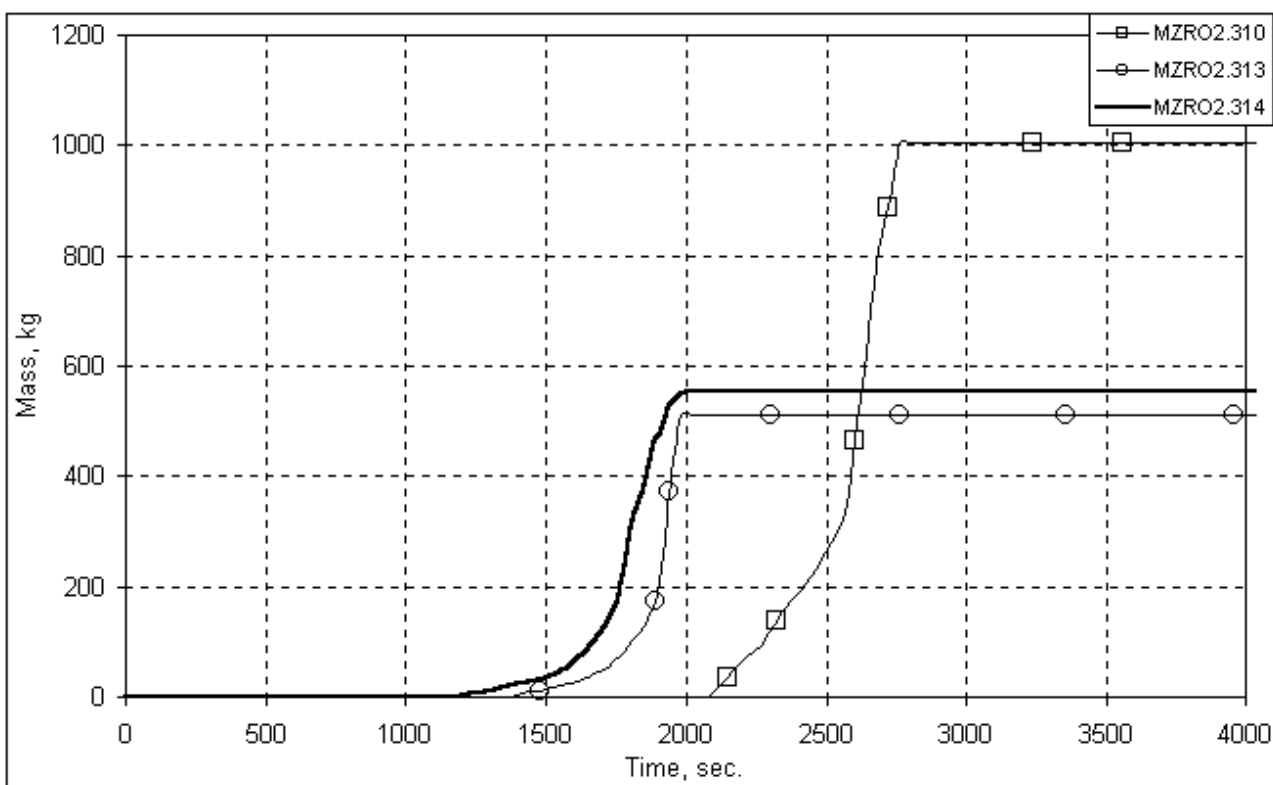
## **2.2. Влияние числа аксиальных расчётных участков на поведение активной зоны при тяжёлой аварии**

Выполнен анализ результатов расчётов тяжёлых аварий реактора ВВЭР-1000 для модели активной зоны, состоящей из различного числа аксиальных расчётных участков. Во всех расчётах использовалась модель, включающая 4 радиальных расчётных области и соответствующие им гидродинамические объёмы. По аналогии с рассмотренным выше - увеличение числа аксиальных участков позволит снизить мощность радиационного теплопереноса от центра активной зоны в аксиальном направлении, к верхней и нижней плите активной зоны. Снижение радиационного теплопереноса вверх приводит к ускорению разрушения активной зоны, уменьшению области плавления верхней плиты и её окисления.

На Рис. 2-7 представлена интегральная масса водорода, образующегося в результате окисления Zr (без учета окисления стали) для двух моделей расчёта: 7 аксиальных областей в обогреваемой части активной зоны; 13 радиальных областей. Полученный результат противоположен выводам сделанным в расчётах для различного количества радиальных областей – в случае менее детальной нодализации получено большее количество водорода. Детальный анализ показал, что в данном случае определяющим является размер расчётных ячеек попадающих на границу расплава в активной зоне – ячеек, которые частично заполнены дебрисом при полном разрушении ячеек выше. В подобных ячейках наблюдается практически 100% окисление металлов. Пример подобной расчётной ячейки – COR310 на Рис. 2-8. Таким образом, результат существенно зависит от дискретности входных данных – высоты расчётных ячеек. Чтобы этого избежать следует уменьшать высоту расчётных ячеек в области предполагаемого уровня расплава до значений при которых масса Zr в них составляет незначительную часть от общей массы Zr.



**Рис. 2-7 Интегральная масса водорода, образующегося в результате реакции окисления Zr (без учета окисления стали), в расчетах с различным количеством аксиальных участков активной зоны (авария типа «большая течь»)**



**Рис. 2-8 Масса ZrO2 в характерных расчётных ячейках активной зоны (7 аксиальных уровней в активной зоне)**

### 2.3. Адаптация кода MELCOR для расчёта гексагональной решетки в активной зоне

Все модели кода MELCOR предполагают взаимное расположение стержней твэл по квадратной матрице. В реакторе ВВЭР-1000, как и в других реакторах советского производства, твэлы располагаются по гексагональной (треугольной) матрице. Влияние типа матрицы на теплогидравлические процессы в активной зоне может быть учтено в пакетах CVH и FL. Её влияние на поведение активной зоны при плавлении и деградации может быть учтено через коэффициенты чувствительности SC1151. Коэффициенты чувствительности SC1151(1-4) используются в модели расчёта площади поверхности дебриса (conglomerate debris) и доли поверхности нерасплавленных элементов блокированные дебрисом. Расчёт коэффициентов для квадратной и гексагональной матрицы приведён в Табл. 2-1, а их физический смысл проиллюстрирован на Рис. 2-10.

Выполнен анализ влияния коэффициентов чувствительности SC1151(1-4) на результаты расчёта по образованию водорода. Различие результатов проявляется после момента начала плавления материалов в активной зоне и для гексагональной и квадратной матрицы составляет 8% в аварии типа большая течь - **Ошибка! Источник ссылки не найден.** В авариях с более поздним началом осушения и разогрева активной зоны это различие возрастает и может достигать 15%.

**Табл. 2-1 Расчёт коэффициентов чувствительности SC1151(1-4) для квадратной и гексагональной решётки**

Величина	Квадратная матрица	Гексагональная матрица
<b>SC1151(1)</b>		
Площадь части поверхности твэл- $A_i$	$0.5\pi RH$	$\pi RH/3$
Площадь части поверхности капельки - $A_{C1}$	$0.5\pi(P-2R)H$	$0.5\pi(P-2R)H$
$SC1151(1) = A_{C1}/A_i$	$(P-2R)/R$	$1.5(P-2R)/R$
	0.556 для PWR	0.834 для ВВЭР
<b>SC1151(3)</b>		
Объём части канала между твэл - $V_i$	$0.25(P^2 - \pi R^2)H$	$(0.25P^2\sqrt{3}-\pi R^2/6)H$
Объём части капельки - $V_{C1}$	$0.125\pi(P-2R)^2H$	$0.125\pi(P-2R)^2H$
$SC1151(3) = V_{C1}/V_i$	$\pi(P-2R)^2/2(P^2-\pi R^2)$	$0.125\pi(P-2R)^2/(0.25P^2\sqrt{3}-\pi R^2/6)$
	0.143 для PWR	0.0536 для ВВЭР
<b>SC1151(2)</b>		
Площадь части поверхности твэл- $A_i$	$0.5\pi RH$	$\pi RH/3$
Площадь части поверхности капельки - $A_{C2}$	$0.5\pi(P/\sqrt{2}-R)H$	$2\pi(\sqrt{3}P/3-R)H/3$
$SC1151(2) = A_{C2}/A_i$	$(P/\sqrt{2}-R)/R$	$2(\sqrt{3}P/3-R)/R$
	0.807 для PWR	0.951 для ВВЭР

SC1151(4)		
Объём части канала между твэл - $V_i$	$0.25(P^2 - \pi R^2)H$	$(\sqrt{3}P^2/4 - \pi R^2/6)H$
Объём части капельки - $V_{C2}$	$0.25(P^2 - \pi R^2)H - 0.25\pi(P/\sqrt{2}-R)^2H$	$(P^2\sqrt{3}/4 - \pi R^2/6)H - \pi(R\sqrt{3}/3-R)^2H$
$SC1151(4) = V_{C2}/V_i$	$1 - \pi(P/\sqrt{2}-R)^2/(P^2 - \pi R^2)$	$1 - \pi(R\sqrt{3}/3-R)^2/(\sqrt{3}P^2/4 - \pi R^2/6)$
	0.396 для PWR	0.692

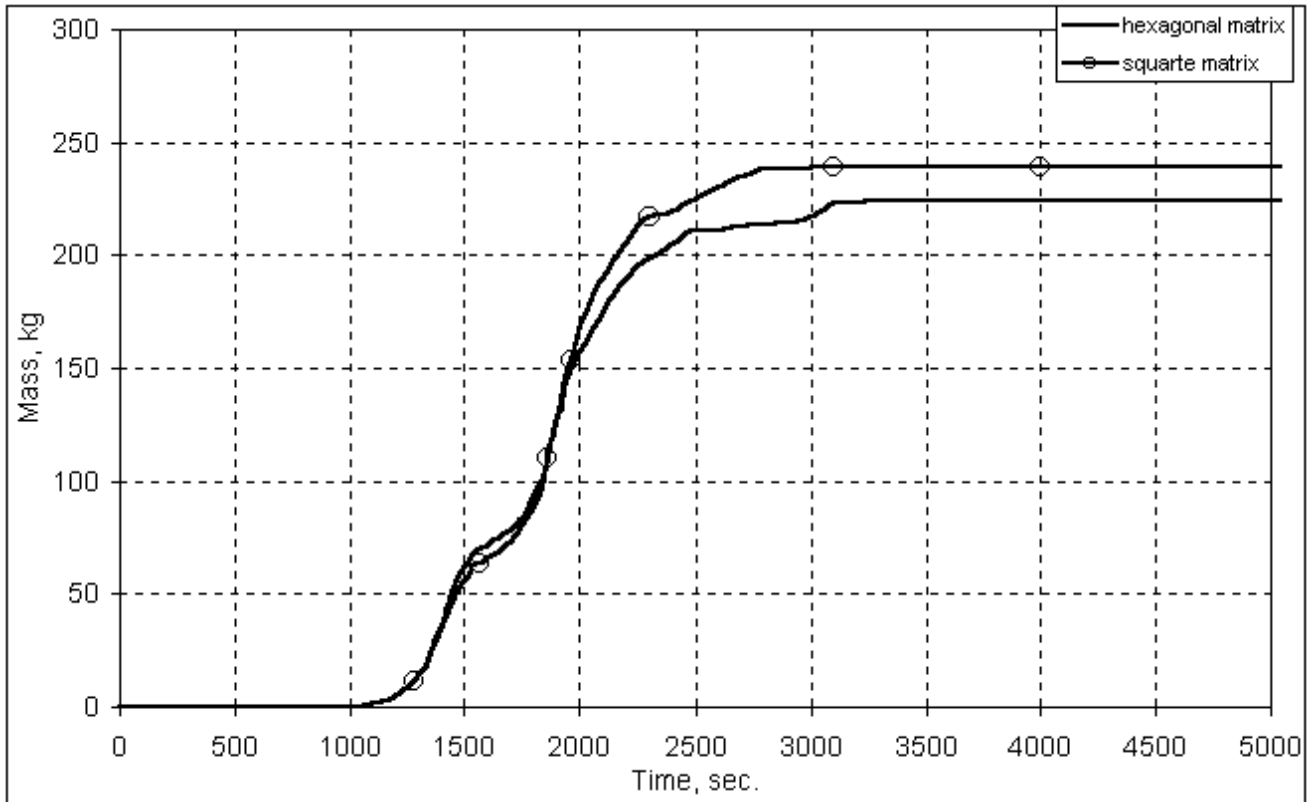


Рис. 2-9 Интегральная масса водорода, образующегося в активной зоне реактора в результате реакции окисления Zr (без учета окисления стали), для квадратной и гексагональной решётки твэл (авария типа «большая течь»).

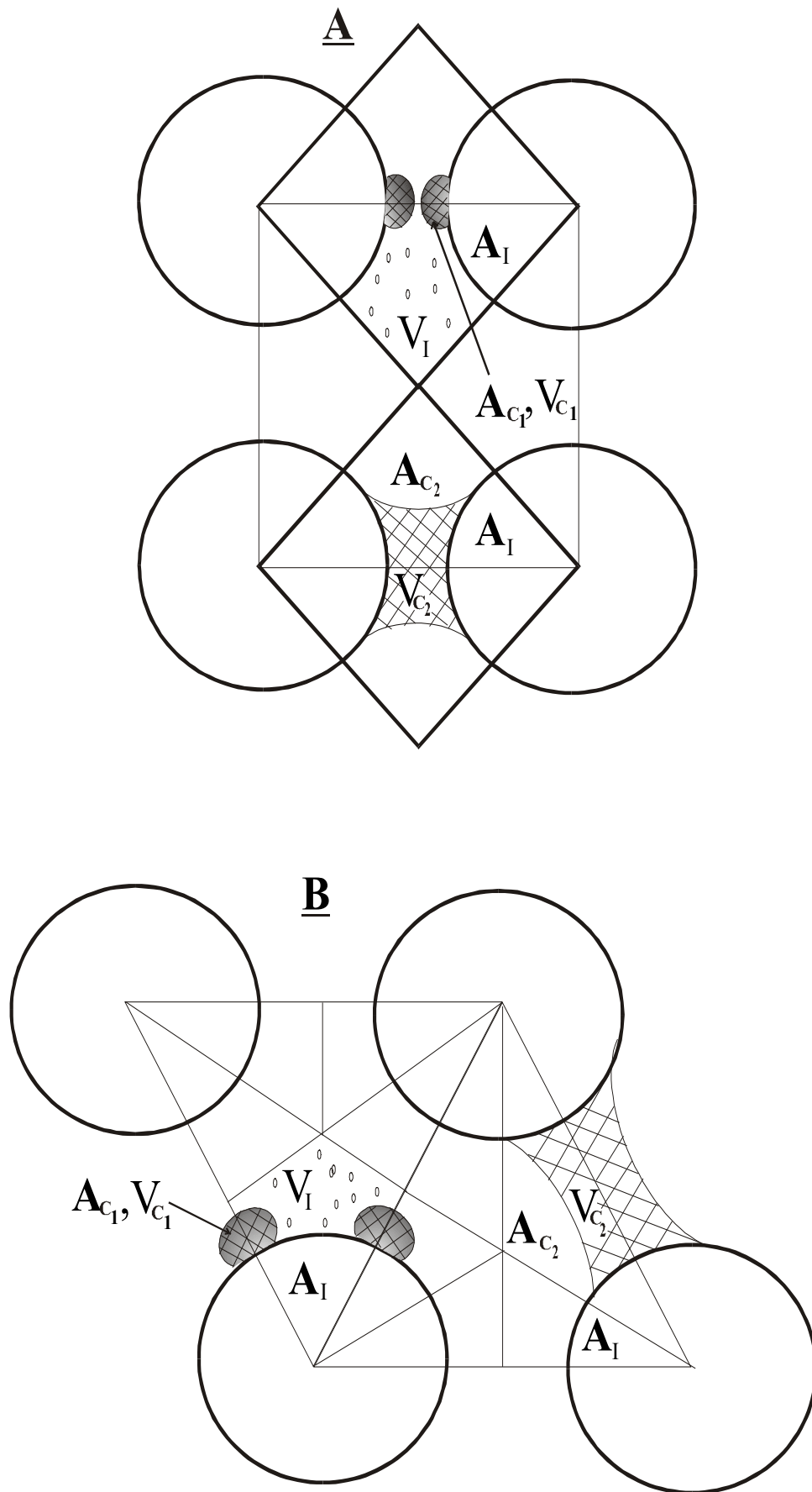


Рис. 2-10 Схема блокирования канала для квадратной и гексагональной решетки ТВЭЛ