ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ» АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ДЖЭТ» (АО ИТЦ «ДЖЭТ»)



ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

ММ ВВЭР -1000

Руководство пользователя

б/н

Номер редакции 1.0

На 75 листах

Москва, 2023

ПРАВА НА СОДЕРЖАНИЕ

Настоящий документ является собственностью АО ИТЦ «ДЖЭТ» и защищен законодательством Российской Федерации и международными соглашениями об авторских правах и интеллектуальной собственности

Копирование документа либо его фрагментов в любой форме, распространение, в том числе в переводе, воспроизводство, изменение в любой форме или частично, а также передача во временное или постоянное пользование третьим лицам, разглашение или использование сведений в коммерческих интересах третьих лиц возможны только с письменного разрешения АО ИТЦ «ДЖЭТ».

Документ и связанные с ним графические изображения могут быть использованы только в информационных, некоммерческих или личных целях.

АО ИТЦ «ДЖЭТ» оставляет за собой право на изменение или обновление настоящего документа без предварительного уведомления.

Все названия компаний и продуктов, которые являются товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками, являются собственностью соответствующих владельцев.

За содержание, качество, актуальность и достоверность используемых в документе материалов, права на которые принадлежат другим правообладателям, а также за возможный ущерб, связанный с использованием этих материалов, ответственности не несет.

АО ИТЦ ДЖЭТ

117335, г. Москва, Нахимовский проспект, дом 58
Сайт компании: <u>https://get-sim.ru/</u>
Тел.: +7 495 788 04 06
Электронный адрес службы поддержки: <u>itcget@rosatom.ru</u>

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАШЕНИЙ	5
1 Общие свеления и назначение	6
2 Объем моледивования	7
2 Собъем моделирования 3 Внутрикорпусная и внекорпусная сталии тяженой аварии	8
3 Внутрикорпусная и внекорпусная стадии тяжелой аварии	
4 1 Интеграни ная монеци реактора	арии 9
4.1 Интерральная модель реактора	
4.2 Пакет тяжело-аварииных модулей для анализа внутрикорпусной стадии ан	арии 13
4.3 Контрольный, интерфейсный и расчетный модуль s.ssaber	
4.4 Определение объемного энерговыделения	
4.5 Изменение геометрии твэл (модуль s.ssaradin)	
4.6 Определение свойств материалов (модуль s.ssakpron)	
4.7 Перемещение компонентов твэл (модуль s.ssaslum) и образование блокад.	17
4.8 Интерфейсные параметры: из SA в TH	
4.9 Интерфейсные параметры: из ТН в SA	
4.10 Интерфейсные параметры: из СН в SA	
4.11 Интерфейсные параметры: из SA в CH	
4.12 Выделение водорода	19
4.13 Выделение продуктов деления	19
4.14 Определение температур шахты реактора	
4.15 Определение максимальных температур	
5 Модуль s.ssacobo (взаимодействие расплава с внутрикорпусными	устройствами и
теплоносителем в реакторе)	
5.1 Три барьера задержки расплава	
5.2 Структуры, для которых рассчитываются температуры	
5.3 Моменты разрушения барьеров.	
5.4 Уравнения теплового баланса	22
5 5 Температура цервого барьера	22
5.6 Теплообмен между цервым барьером и расплавом	22
5.7 Теплообмен между первым барьером и теплоносителем	23
5.8 Контроль скорости разогрева цервого барьера	23
5.0 Контроль скорости разогрева первого барьера	
5.10 Texture area for and	
5.10 Температура второго барьера	
5.11 Теплооомен между вторым оарьером и расплавом	
5.12 Гемпературы слоев расплава	
5.13 Контроль скорости разогрева второго барьера	
5.14 Средняя температура расплава	
5.15 Средняя температура расплава на днище реактора	
5.16 Интерфейс между системами SA и TH по теплообмену между теплоно	сителем в камерах
реактора и кориумом	
5.17 Температуры в стенке корпуса реактора на стадии разогрева активной зо	ны 30
6 Модуль s.ssatemp (взаимодействие расплава с внутрикорпусными	
	устройствами и
теплоносителем в реакторе)	устройствами и 32
теплоносителем в реакторе) 7 Модуль s.ssaprop (определение свойств компонентов)	устройствами и 32 35

7.1 Свойства UO2	35
7.2 Свойства Zr	35
7.3 Свойства стали	36
7.4 Свойства ZrO2	36
8 Модуль s.ssazrc (паро-циркониевая реакция)	38
9 Модуль s.ssatrea (определение температуры твердых стенок с применением	энтальпийного
подхода)	40
10 Модуль s.ssafipr (выход продуктов деления)	41
11 Моделирование процессов в устройстве локализации расплава на внекорпусной о	стадии тяжелой
аварии (модуль s.ssalov)	42
11.2 Истечение расплава	45
11.3 Вода в теплообменниках УЛР	47
11.4 Коэффициенты теплообмена	48
11.5 Теплообмен между структурами УЛР	49
11.6 Балансные температуры	50
11.7 Выделение водорода из УЛР	51
12 Модель взаимодействия расплава с бетоном (модуль s.ssagoco)	53
13 База данных	56
13.1 Константы	56
13.2 Количественные параметры	56
13.3 Параметры для твэл и активной зоны	56
13.4 Параметры для корпуса реактора и внутрикорпусных устройств	57
14 База данных s.bdsa	59
15 Условия выполнения программы	71
15.1 Нодализационная схема	71
15.2 База данных	71
16 Выполнение программы	72
16.1 Инициализация расчета	72
16.2 Возможности настройки системы SA	72
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	74
Лист регистрации изменений	75

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ГОСТ Р	Государственный стандарт Российской Федерации
CR	Модель нейтронной физики (Neutron-physical model oh the reactor core)
SA	Модель тяжелых аварий (Severe accident modeling)
ТН	Теплогидравлическая модель первого контура (Thermo-hydraulic model of primary circuit)
USDS	Универсальная Система Разработки Программного обеспечения (Universal Software Development System)
АЭС	Атомная электростанция
БРУА	Быстродействующая редукционная установка сброса пара в атмосферу
ГПК	Главный паровой коллектор
OC	Операционная система
ПК	Персональный компьютер
пк кд	Предохранительный клапан компенсатора давления
ПК ПГ	Предохранительный клапан парогенератора
ПМТ	Полномасштабный тренажер
ПО	Программное обеспечение
РП	Руководство пользователя
РЭ	Руководство по эксплуатации
CAO3	Система аварийного охлаждения активной зоны реактора
СН	Модель защитной оболочки peaktopa (Containment)
TBC	Тепловыделяющая сборка
УЛР	Устройство локализации расплава

1 Общие сведения и назначение

Для отработки мероприятий по управлению запроектными и тяжелыми авариями и подготовки персонала на полномасштабном тренажере (ПМТ) необходимо дополнить математическую модель энергоблока, используемую в тренажере, специальной моделью, позволяющей анализировать тяжелую стадию аварии с деградацией активной зоны в реальном масштабе времени (в рамках тренажерного моделирования).

Тяжелая авария с плавлением топлива активной зоны реактора проходит две стадии: внутрикорпусную и внекорпусную. На внутрикорпусной стадии тяжелой аварии в результате потери теплоносителя и осушения активной зоны происходит ее разогрев, расплавление и деградация. Расплавленные материалы выходят на днище корпуса реактора. Корпус реактора разогревается и расплавляется. После этого начинается внекорпусная стадия тяжелой аварии, на которой расплавленные материалы вытекают из разрушенного реактора и попадают в устройство локализации расплава.

2 Объем моделирования

Программный комплекс для моделирования внутрикорпусной стадии тяжелой аварии предназначен для моделирования параметров в реакторном контуре на всем протяжении развития аварии: от исходного события до тяжелой стадии, рассматриваемой до момента проплавления корпуса реактора и перехода тяжелой аварии во внекорпусную стадию. При этом рассматриваются следующие аспекты:

- изменение теплогидравлических параметров в реакторной установке;
- разогрев, плавление и деградация активной зоны,
- поведение расплавленных материалов активной зоны и поле температур в нижней камере реактора,
- разогрев и разрушение корпуса реактора,
- паро-циркониевая реакция и разгерметизация твэл с выделением и распространением водорода и радиоактивных продуктов.

Программный комплекс для моделирования внекорпусной стадии тяжелой аварии предназначен для моделирования:

- параметров в подреакторном объеме,
- поведения расплава в устройстве локализации расплава (УЛР), при его наличии в проекте энергоблока,
- взаимодействия расплава с бетонным основанием подреакторного объема при отсутствии УЛР.
- При этом рассматриваются следующие аспекты:
- изменение параметров среды в подреакторном объеме и УЛР;
- стекание расплавленных материалов из разрушившегося корпуса реактора в УЛР;
- взаимодействие расплавленных материалов с жертвенным материалом и корпусом УЛР и поле температур в элементах УЛР,
- разогрев и разрушение внутреннего корпуса УЛР,
- подача воды в теплообменники УЛР и на поверхность расплава;
- теплоотвод от расплава и элементов УЛР к воде, паровоздушной среде, к бетонным и стальным конструкциям;
- взаимодействие расплава с бетонной составляющей жертвенного материала с выделением водяного пара и последующей паро-циркониевой реакцией с выделением водорода.

3 Внутрикорпусная и внекорпусная стадии тяжелой аварии

Разработка программного комплекса для моделирования внутрикорпусной стадии тяжелой аварии (контрольный модуль s.ssabef) осуществлялась с учетом требования интеграции этой модели с моделью теплогидравлики реакторной установки и, в частности, с интегральной моделью реактора.

Интегральная модель реактора, включает в себя новую покассетную модель активной зоны, аксиальное и секторальное (в плане) моделирование реактора, поперечные перетоки между каналами активной зоны и параллельными секторами в расчетной схеме реактора и тяжелоаварийные модули для описания внутрикорпусной фазы тяжелой аварии.

Модуль для анализа процессов, протекающих в активной зоне реактора типа ВВЭР, обеспечивает моделирование процессов, протекающих в активной зоне при ее разогреве, плавлении и деградации на тяжелой стадии запроектной аварии. При этом определяются:

- распределение температур по активной зоне, с учетом мощности остаточных тепловыделений, неравномерности распределения тепловыделений по активной зоне и теплового эффекта паро-циркониевой реакции;
- изменение геометрии твэл и каналов теплоносителя в активной зоне;
- выход водорода и распространения его по первому контуру;
- количество разгерметизированных твэл, выхода радиоактивных продуктов, накопленных под оболочкой твэл, и распространения их по первому контуру;
- выход расплавленных материалов активной зоны (состав, массы и энергии) в нижнюю камеру реактора.

Кроме температурных полей в активной зоне и процесса ее деградации рассчитываются температуры в нижней опорной решетке активной зоны, в перфорированном днище и цилиндрической обечайке шахты реактора, в днище и стенках корпуса реактора, в расплавленных массах, стекающих на опорную решетку активной зоны и на днища шахты и реактора. Моделируется стратификация расплава на днище реактора. Определяются моменты разрушения нижней опорной решетки активной зоны, днища шахты реактора и корпуса реактора.

Разработка программного модуля (s.ssalov) для моделирования внекорпусной стадии тяжелой аварии осуществлялась с учетом требования интеграции этого модуля с программным комплексом для моделирования внутрикорпусной стадии тяжелой аварии, с интегральной моделью реактора и с моделью теплогидравлики в помещениях защитной оболочки. При этом моделируются процессы подачи воды, заполнения УЛР расплавом, взаимодействия расплава с жертвенным материалом и корпусом УЛР, стратификации расплава, взаимодействия расплава с бетоном с выделением водяного пара и водорода, теплообмена в УЛР.

4 Расчетные схемы и расчетные модули для внутрикорпусной стадии тяжелой аварии

4.1 Интегральная модель реактора

Разработка программного комплекса для моделирования внутрикорпусной стадии тяжелой аварии осуществлялась с использованием интегральной модели реактора.

Интегральная модель реактора, включает в себя новую покассетную модель активной зоны, аксиальное и секторальное (в плане) моделирование реактора, поперечные перетоки между каналами активной зоны и параллельными секторами в расчетной схеме реактора и тяжелоаварийные модули для описания внутрикорпусной фазы тяжелой аварии.

Модуль для анализа процессов, протекающих в активной зоне реактора типа ВВЭР, обеспечивает моделирование процессов, протекающих в активной зоне при ее разогреве, плавлении и деградации на тяжелой стадии запроектной аварии. Основными задачами такого моделирования является определение:

- распределения температур по активной зоне, с учетом мощности остаточных тепловыделений, неравномерности распределения тепловыделений по активной зоне и теплового эффекта паро-циркониевой реакции;
- изменения геометрии твэл и каналов теплоносителя в активной зоне;
- выхода водорода и распространения его по первому контуру;
- количества разгерметизированных твэл, выхода радиоактивных продуктов, накопленных под оболочкой твэл, и распространения их по первому контуру;
- выхода расплавленных материалов активной зоны (состав, массы и энергии) в нижнюю камеру реактора.

Модули для анализа процессов, протекающих в нижней части корпуса реактора типа ВВЭР, обеспечивают расчет теплообмена между расплавленными материалами и внутрикорпусными устройствами реактора, расчет температур в нижней опорной решетке активной зоны, в перфорированном днище и цилиндрической обечайке шахты реактора, в днище и стенках корпуса реактора, в расплавленных массах, стекающих на опорную решетку активной зоны и на днище шахты реактора. Кроме того, моделируется стратификация расплава на днище реактора. Определяются моменты разрушения нижней опорной решетки активной зоны, днища шахты реактора и корпуса реактора.

При моделировании температурных полей учитывается неравномерность энерговыделений по высоте и радиусу активной зоны, которая рассчитывается в рамках отдельной нейтроннофизической модели активной зоны, интегрированной в тренажерный программный комплекс.

Нейтронно-физическая модель и теплогидравлическая модель активной зоны, включенная в модель интегрального реактора, работают по расчетной схеме (Рисунок 1 –), включающей в себя каждую топливную кассету с разбиением на аксиальные участки. Для реакторов ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000 – это 163 бесчехловых ТВС (Рисунок 2 –) ПМТ, и приведенные ниже размерности массивов учитывают это разбиение, хотя и число аксиальных ячеек, и число параллельных каналов, моделирующих ТВС активной зоны, может быть изменено (соответственно будут изменены и размерности массивов). В базе данных эти размерности определяются как:

saknr – число параллельных каналов, моделирующих активную зону,

saknz – число аксиальных ячеек в каждом канале.

Для полно-кассетного моделирования реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 принимается

saknr = 163, **saknz** = 15.

Для полно-кассетного моделирования реакторов ВВЭР-440 принимается

saknr = 349, **saknz** = 16

В расчетной схеме реактора верхняя и нижняя камеры реактора, а также опускной кольцевой канал разбиваются на 6 секторов с поперечными связями между собой:

- 6 контрольных ячеек моделируют верхнюю камеру от выхода из активной зоны до выходных патрубков реактора. Четыре из них соединены с выходными патрубками реактора. В два из них осуществляется подача воды от гидроемкостей САОЗ:
- 6 контрольных ячеек моделируют верхнюю часть опускного кольцевого канала с кольцом входных патрубков. Четыре из них соединены со входными патрубками реактора. В два из них осуществляется подача воды от гидроемкостей САОЗ;
- 6 контрольных ячеек моделируют основной участок опускного кольцевого канала;
- 6 контрольных ячеек моделируют нижнюю камеру от перфорированного эллиптического днища шахты (13) до нижней опорной решетки активной зоны;
- 1 контрольная ячейка моделирует объем под крышкой реактора;
- 1 контрольная ячейка моделирует объем между днищем реактора и перфорированным эллиптическим днищем шахты;
- 4 группы ТВС по (41, 41, 41, и 40) ТВС в каждой связаны с одним из четырех секторов нижней и верхней камер; при этом моделируется каждая кассета и для каждой кассеты вводится аксиальное разбиение на 15 ячеек.

Моделируются также поперечные связи между элементами.

В расчетную схему входит также связь с системой аварийного газоудаления (из объема под крышкой реактора) и связь с подреакторным объемом шахты реактора, которая открывается при проплавлении корпуса реактора и переходе аварии в тяжелую стадию.

В расчете учитывается возможность:

- выделения водорода и тепла при паро-циркониевой реакции,
- выхода радиоактивных веществ из-под оболочек твэл при их разгерметизации,
- выделения тепла при перемещении расплавленных материалов активной зоны в нижнюю камеру реактора,
- взаимного излучения от разогретых поверхностей расплава и стенок корпуса реактора,
- подачи воды в реактор в рамках мероприятий по управлению тяжелой аварией,
- расплавления решеток,
- образования блокад в отдельных кассетах при образовании и стекании расплава, с частичной или полной блокировкой проходного сечения,
- разгерметизации корпуса реактора при его проплавлении и переходе тяжелой аварии во внекорпусную стадию.

Всего расчетная схема реактора состоит из 181 расчетной ячейки, при этом каждая из ячеек 1-163, отведенных для моделирования ТВС, дополнительно разбивается по высоте на 15 аксиальных ячеек.



Рисунок 1 – Расчетная схема реактора

Для полно-кассетной расчетной схемы реактора:

номера ячеек верхней камеры реактора, соединенных с выходными патрубками sanvks1 = 166, sanvks2 = 167, sanvks3 = 169, sanvks4 = 170,

номер верхней центральной ячейки верхней камеры реактора

sanup = 164

номера ячеек верхней камеры реактора, соединенных с патрубками гидроемкостей (ГЕ) САОЗ

sanvksaccu1 = 165, sanvksaccu2 = 168

номера ячеек нижнего кольцевого канала, соединенных со входными патрубками

sanok1 = 178, sanok2 = 179, sanok3 = 181, sanok4 = 182,

номера ячеек нижней камеры реактора, соединенных с ячейками кольцевого канала sannks1 = 184, sannks2 = 185, sannks3 = 187, sannks4 = 188,

б/н

номер нижней центральной ячейки нижней камеры реактора

sandown = 189

номера ячеек нижней камеры реактора, соединенных с патрубками ГЕ САОЗ

sannksaccu1 = 183, sannksaccu2 = 186.

Для всех ячеек учитывается теплообмен с твердыми стенками.

Каждая кассета характеризуется эквивалентным твэлом, для которого и выполняется расчет. При этом предполагается, что все твэлы в данной кассете подобны эквивалентному твэлу. Отдельно может быть смоделирован выделенный канал с максимально напряженным твэлом.

Распределение температуры по радиусу твэла определяется решением одномерного радиального уравнения теплопроводности для каждого контрольного объема эквивалентного твэла. Кроме того, учитываются тепловые потоки между аксиальными ячейками за счет аксиальной теплопроводности и тепловые потоки между нижними и верхними торцами твэл и, соответственно расчетными ячейками верхней и нижней камер реактора за счет конвективного теплообмена и теплового излучения.



Рисунок 2 – Расчетная схема активной зоны

При решении одномерного уравнения радиальной теплопроводности каждый контрольный объем разбивается на семь радиальных слоев с динамически изменяющимися радиусами (Рисунок 1 –): диоксид урана UO₂ (слой 1, 2, 3); гелиевый зазор между топливом и оболочкой (слой 4); цирконий или раствор U-Zr-O (слой 5); двуокись циркония (слой 6); зона перемещения (слой 7).



Рисунок 3 – Расчетная схема радиальной ячейки твэла

При решении одномерного уравнения теплопроводности

 $\rho c \ \partial T_w / \partial \tau = (1/r) \ \partial / \partial r [\lambda r^* \partial T_w(r) / \partial r] + q_v$

используется аппроксимация

$Ti = Ai*sin(\pi Xi/\Delta ri) + Bi*(Xi/\Delta ri) + Ci$

где i – индекс зоны расчетного элемента твэл; A_i, B_i, C_i – коэффициенты, зависящие от времени; X_i – радиальная координата в пределах i-го слоя; Δr_i - толщина i-го слоя.

Для определения коэффициентов A_i, B_i, C_i используются условия равенства температур и тепловых потоков на границах между слоями и равенства тепловых потоков на внутренней и внешней границах. В результате получаем систему из 3N уравнений, где N – число радиальных слоев (в данном случае N=7)

> $C_{i-1} = C_i + B_i$ $\lambda_{i-1}(A_{i-1}\pi/\Delta r_{i-1} + B_{i-1}/\Delta r_{i-1}) = -\lambda_i(A_i\pi/\Delta r_i + B_i/\Delta r_i)$ $\lambda dT/dr + Qs = \dot{\alpha}_N (C_N - B_N - T_T),$ $\lambda dT/dr = \dot{\alpha}_0 (To - C_1),$

где T_T – температура теплоносителя, T₀ -температура в центре твэл, Qs – тепловой эффект паро-циркониевой реакции, q_{vi} - объемное энерговыделение в каждой ячейке.

Система 3N уравнений для коэффициентов Ai, Bi, Ci решается на каждом временном интервале.

Режим теплообмена и коэффициент теплоотдачи а рассчитывается в рамках расчета замыкающих соотношений.

При расчете каналов активной зоны моделируется распределение паросодержания, температур, коэффициентов теплопередачи и свойств теплоносителя.

Для бесчехловых кассет для каждой грани шестиугольной аксиальной расчетной ячейки учитывается поперечный расход теплоносителя между смежными ячейками.

При перемещении расплава в случае тяжелой аварии и застывании его в определенных сечениях с образованием блокад для каждой кассеты учитывается влияние перекрытия сечения на расход теплоносителя и на расчет коэффициента теплоотдачи.

4.2 Пакет тяжело-аварийных модулей для анализа внутрикорпусной стадии аварии

Пакет тяжело-аварийных модулей включает в себя расчетные модули, предназначенные для моделирования температурных полей и основных процессов, протекающих в активной зоне, нижней камере и корпусе реактора – на внутрикорпусной стадии.

В таблице ниже представлен перечень расчетных модулей модели тяжелой аварии (система SA) вызов которых осуществляется из модуля s.ssabef.

Модуль	Назначение модуля									
s.ssabef	Контрольный модуль для тяжело-аварийных модулей, в осуществляется: - вызов тяжело-аварийных модулей, - интерфейс со смежными системами (TH, CH, CR, RD),									
	 расчет распределения объемного энерговыделения по активной зоны, 	кассетам								
	б/н	13								

Таблица 1 – Перечень расчетных модулей

АО ИТЦ «ДЖЭТ»	Программное обеспечение ММ ВВЭР -1000 Руководство пользователя	Номер редакции 1.0
---------------	---	--------------------

	- расчет изменения геометрии твэл и образования блокад,
	- расчет полей температур в твэлах активной зоны и максимальных
	температур на поверхности корпуса реактора,
	- расчет температур шахты реактора,
	- расчет выхода водорода и радиоактивных продуктов,
	- расчет моментов наступления контрольных событий (начало
	выделения водорода и радиоактивных пролуктов, начало плавления
	компонентов топлива, моменты проплавления барьеров в нижней
	камере реактора и корпуса реактора)
s bdsa	Блок ланных лля тяжело-аварийных молулей
s.ssacobo	Расчет процессов в нижней камере реактора:
5.55.440000	- температуры внутрикорпусных структур и стенок корпуса реактора.
	- тепловые потоки между внутрикорпусными структурами, расплавом и
	теплоносителем
	- моменты расплавления оарьеров (нижней опорной плиты активной
	зоны и днища шахты реактора),
	- взаимодействие расплава с пароводяной средой в нижней камере
	реактора и корпусом реактора
s.ssafipr	Расчет выноса продуктов деления при разгерметизации твэл
s.ssakpron	Расчет свойств материалов твэл в функции от температуры
s.ssakzrc	Расчет паро-циркониевой реакции (выход водорода и тепловой эффект)
s.ssapict	Динамизация видеокадров
s.ssaprop	Расчет свойств расплава в зависимости от температуры
s.ssaradin	Расчет радиусов слоев в расчетной схеме твэл
s.ssaslum	Расчет соскальзывания расплавленных материалов твэл и образование
	блокад
s.ssatemp	Расчет поля температур в расплаве на днище реактора и в днище в
	рамках двумерной осесимметричной задачи теплопроводности
s.ssatrea	Расчет физических температур расплава
s.ysirt43	Линейная интерполяция

4.3 Контрольный, интерфейсный и расчетный модуль s.ssabef

Модуль **s.ssabef** является одновременно контрольным, расчетным и интерфейсным модулем для системы SA.

Интерфейс между модулями теплогидравлики первого контура и тяжело-аварийными модулями осуществляется следующим образом.

Из модели нейтронной кинетики (система CR) в систему SA передается распределение энерговыделений по всем кассетам активной зоны – массив **crxthqv**(saknr,saknz) [MBT] – для saknr TBC с разбиением на saknz ячеек по высоте для каждой кассеты. Число разбиений на расчетные ячейки может изменяться.

4.4 Определение объемного энерговыделения

В модуле **s.ssabef** происходит расчет распределения объемных энерговыделений по кассетам активной зоны и слоям эквивалентных твэл для каждой кассеты – массив **savpmq**(saknr,

saknz*7) [Bт/м³]. Массив **savpmq**(saknr, saknz*7) дает значение объемного энерговыделения в каждом из 7 радиальных слоев эквивалентного твэла (4.1Рисунок 3 –), в каждой из saknz аксиальных ячеек каждой из saknr TBC.

В модуле нейтронной кинетики, система CR, определяется массив энерговыделений crxthqv(saknr, saknz) [MBT]. Этому массиву в системе SA соответствует массив энерговыделений saqcr(saknr, saknz) = crxthqv(saknr, saknz)* 10^6 [BT].

Расчет значений объемных энерговыделений массива **savpmq** выполняется с учетом значений полных энерговыделений и расчета объемов радиальных слоев эквивалентных твэлов (радиусов радиальных слоев), выполняемого в модуле **s.ssabef**.

При переходе от массива **crxthqv** к массиву **saqcr** до тех пор, пока максимальная температура топлива не превышает 2000 °К (**sa:flag1**=.false.), массивы **crxthqv** и **saqcr** идентичны (с учетом пересчета из MBт в Bт).

В момент достижения максимальной температуры топлива значения 2000К (sa:flag1=.true.), расчеты нейтронной мощности в модуле CR становятся некорректными из-за того, что обратные связи по реактивности определяются только до температур топлива 2000К, а для более высоких температур при расчете обратных связей принимается, что эта температура остается 2000К. Поэтому в этот момент (sa:flag2=.true.) запоминается поле энерговыделений crxthqv, как массив saqv(saknr, saknz) [BT]. Определяется суммарное энерговыделение в активной зоне saqsum и относительное энерговыделение в активной зоне

saqotn0 = saqsum/sannom

где **sannom** – номинальная мощность реактора.

Определяется относительное энерговыделение Noth = Q(t)/Qnom, (Noth = sanotn)

sanotn = 1.0, если срабатывания АЗ не было, и

sanotn = функция от времени после срабатывания АЗ (по таблице зависимости остаточного энерговыделения от времени).

Срабатывание A3 (sa:az=.true.) определяется либо при генерации сигнала A3 в других системах (например, (rd:az =.true.), либо, в случае автономного расчета, задается в системе SA – (sa:flag3 = .true.)

При этом дальнейший расчет проводится без использования данных из системы CR по соотношению

saqcr(ir,iz) = saqv(ir,iz)*(sanotn/saqotn0)

Однако, этот алгоритм работает, только в режимах со срабатыванием АЗ. В режимах без срабатывания АЗ и в режимах с отказом аварийной защиты расчет энерговыделений осуществляется только по соотношению

saqcr(saknr, saknz) = crxthqv(saknr, saknz)*10⁶

Если, в случае разогрева активной зоны начались процессы плавления и стекания оболочек твэл и деградации активной зоны с нарушением геометрии твэлов и максимальная температура топлива (samaxtf3) достигает 2500 К, определяется **sa:flag6** = .true. и происходит переход от учета распределенности поля энерговыделений по объему активной зоны к равномерному распределению энерговыделений по активной зоне с сохранением интегрального энерговыделения:

saqcr(ir,iz) = sannom * sanotn / (saknr * saknz)

Энерговыделения в слоях для каждой расчетной ячейки выделяются в слоях 1, 2, 3, а также в слое 7 после попадания в этот слой расплавленной двуокиси урана (в результате расплавления

топлива в данной ячейке или в результате натекания расплавленного топлива из вышестоящих ячеек). В слоях 4, 5, 6 энерговыделения равны нулю.

4.5 Изменение геометрии твэл (модуль s.ssaradin)

Изменение геометрии твэл (радиусов радиальных слоев salradt(8)) рассчитывается в модуле s.ssaradin. При этом

salradt (8) – радиусы 7-ми радиальных зон в конкретной расчетной ячейке;

salradrod (saknr, saknz) наружные радиусы твэл (наружные радиусы зон релокации) в каждой расчетной ячейке;

salradr1 (saknr, saknz) внутренние радиусы зон релокации в каждой расчетной ячейке твэл.

При расчете изменения геометрии твэл исходные значения радиусов вычисляются с учетом проектных значений диаметров внутреннего отверстия и топливной таблетки, внутреннего и наружного диаметров оболочки твэл.

Изменение геометрии твэл происходит при изменении объема радиальных зон в каждой расчетной ячейке вследствие изменения масс радиальных зон и плотности компонентов. Это происходит вследствие нескольких факторов:

- паро-циркониевая реакция (модуль s.ssakzrc), в результате которой происходит уменьшение массы циркония (уменьшение толщины слоя 5, 4.1Рисунок 3 –) и увеличение массы двуокиси циркония (увеличение толщины слоя 6);
- частичное растворение двуокиси урана в слое циркония;
- плавление циркония, двуокиси циркония и, затем, двуокиси урана и переход их в слой 7, в котором происходит постепенное стекание расплавленных масс;
- появление участков, в которых происходит застывание стекающих расплавленных масс с образованием частичной или полной блокады;
- изменение свойств материалов твэла (плотности, теплоемкости и теплопроводности) при изменении температуры (определение свойств материалов твэла в функции от температуры по справочным данным производится в модуле **s.ssakpron**).

4.6 Определение свойств материалов (модуль s.ssakpron)

При определении свойств материалов используются справочные данные и выполняется линейная интерполяция по таблицам в функции от температуры (модуль s.ssairt43):

- плотность топлива: sakdu0(saktu0),
- теплопроводность топлива: sakku0(saktu0),
- теплоемкость топлива: sakcu0(saktu0),
- плотность циркониевой оболочки: sakdzrtab (saktzr),
- теплопроводность циркониевой оболочки: sakkzr (saktzr),
- теплоемкость циркониевой оболочки: sakczr (saktzr).

Свойства двуокиси циркония определяются в функции от температуры по экспериментальным зависимостям.

4.7 Перемещение компонентов твэл (модуль s.ssaslum) и образование блокад

Перемещение компонентов твэл в рассматриваемой аксиальной ячейке данной кассеты в слой 7 (зону релокации), и стекание расплавленных масс вниз по твэлу с возможным застыванием «замерзанием» расплава в нижерасположенных ячейках с образованием блокад моделируется в модуле **s.ssaslum**.

При этом предполагается, что в процессе разогрева твэл и достижения температур плавления компонентов твэл образуется расплав этих компонентов. Для моделирования процессов, перемещения расплава, используется модель «оплывания свечи», в которой стекание и отверждение расплава происходит на вертикальной наружной поверхности твэл.

В динамических и аварийных режимах, на первой стадии процесса, когда еще не начались паро-циркониевая реакция, слой 5 (4.1Рисунок 3 –), состоит только из циркония, а слои 6 и 7 присутствуют в расчете, как пленки двуокиси циркония малой толщины (1-4 мкн). В процессе окисления циркония образуется двуокись циркония и увеличивается слой 6, а слой 5 соответственно уменьшается. Учитывается возможность растворения двуокиси урана и двуокиси циркония в расплавленном цирконии.

По мере разогрева твэл растут температуры во всех слоях. Температура плавления достигается раньше всего в слое 5 (Zr). После достижения этой температуры и поглощения необходимого тепла для полного расплавления слоя циркония происходит выход расплава из слоя 5 в слой-рецептор 7, в границах которого происходит перемещение расплавленных материалов вдоль оси твэла и затвердевание на нижних, более холодных участках, или соскальзывание в нижнюю камеру реактора. Аналогичным образом осуществляется перемещение и остальных компонентов (двуокиси урана и двуокиси циркония) с более высокой температурой плавления. При этом также учитывается определенная задержка, связанная с необходимостью получения теплоты плавления для этих масс компонентов.

В процессе расчета число радиальных слоев в каждой расчетной ячейке остается неизменным, а радиусы слоев для каждой расчетной ячейки определяются на каждом шаге через массы компонентов в слоях.

При этом стекание материалов происходит с заданной скоростью, регулируемой массой, которая стекает на одном шаге из одной контрольной ячейки в ячейку, расположенную вниз по потоку.

Для предотвращения распада расчетной схемы при перетекании компонентов из внутренних радиальных зон в наружную зону релокации предполагается, что при расплавлении всей массы компонента в радиальной зоне в зону релокации перетекает 0,99 всей массы компонента, а 0,01 массы остается в данной радиальной зоне.

При образовании блокады проходного сечения теплоотвод от наружной поверхности твэла к теплоносителю практически прекращается до расплавления образовавшейся блокады.

При разрушении активной зоны, когда стекающий расплав полностью заполняет проходное сечение и затем отвердевает там, образуется блокировка проходного сечения.

С учетом всех этих факторов записываются уравнения баланса масс компонентов для каждого расчетного слоя твэл. Рассчитанные на этой основе текущие массы компонентов слоев твэл (в каждой аксиальной ячейке каждой кассеты) являются входными параметрами для модуля **s.ssakpron** при расчете изменения радиусов слоев и геометрии твэл.

4.8 Интерфейсные параметры: из SA в TH

После выполнения необходимых расчетов в систему ТН для каждого из 7 радиальных слоев эквивалентного твэла в каждой из 15 аксиальных ячеек каждой из 163 кассет передаются массивы:

- savpmq(saknr, saknz*7) объемные энерговыделения,
- savpmdel(saknr, saknz*7) толщина слоя,
- savpmroc(saknr, saknz*7) произведение плотности на теплоемкость для слоя,
- savpmal(saknr, saknz*7) теплопроводность для слоя.

Для каждой из saknz аксиальных ячеек каждой из saknr кассет в систему TH передается массив тепловыделений на поверхности твэл вследствие паро-циркониевой реакции - savpmqs(saknr, saknz).

4.9 Интерфейсные параметры: из ТН в SA

В свою очередь из системы TH в систему SA передаются:

- samvg(saknr, saknz) = thvpm(1 / saknr)mvg_1(1 / saknz) масса парогазовой смеси в каждой аксиальной ячейке каждой кассеты,
- satf1(saknr, saknz) = thvpm(1 / saknr)two_1(1,1 / saknz) температура T1, 4.1Рисунок 3 –, (зона 1, слева),
- satf2(saknr, saknz) = thvpm(1 / saknr)two_1(2,1 / saknz) температура T2, 4.1Рисунок 3 –, (зона 2, слева),
- satf3(saknr, saknz) = thvpm(1 / saknr)two_1(3,1 / saknz) температура Т3, 4.1Рисунок 3 –, (зона 3, слева),
- satf4(saknr, saknz) = thvpm(1 / saknr)two_1(4,1 / saknz) температура Т4, 4.1Рисунок 3 –, (зона 3, справа),
- satc1(saknr, saknz) = thvpm(1 / saknr)two_1(5,1 / saknz) температура Т5, 4.1Рисунок 3 –, (зона 5, слева),
- satc2(saknr, saknz) = thvpm(1 / saknr)two_1(8,1 / saknz) температура Т8, 4.1Рисунок 3 –, (зона 7, справа).

4.10 Интерфейсные параметры: из СН в SA

Из модели герметичных помещений (система CH) в систему SA передаются параметры среды в подреакторном объеме шахты реактора:

- satair = chtvgvol_1(nvolch) температура паровоздушной смеси,
- satwtr_ch=chtlvolne_1(nvolch) температура воды на поверхности расплава,
- sapcont = chpvol_1(nvolch) давление,
- samwatup= chmlvolne_1(nvolch) масса воды на поверхности расплава,
- nvolch номер элемента, моделирующего подреакторный объем в задаче CH_1.

4.11 Интерфейсные параметры: из SA в CH

Из системы SA в систему CH передаются тепловые потоки от корпуса peaktopa saqch1 и от поверхности расплава на бетонном основании шахты peaktopa на внекорпусной стадии тяжелой аварии saqch2.

4.12 Выделение водорода

Кроме того, из **SA** передаются также расходы и температуры газов, выделяющихся при взаимодействии расплава с бетоном. Массовые расходы водорода - **safh2**(saknr, saknz), который выделяется в расчетных ячейках активной зоны и реакторе – **safhydrogen**, при паро-циркониевой реакции, рассчитываются в рамках системы SA в модулях **s.ssabef** и **s.ssacobo**, соответственно, (при вызове модуля **s.ssakzrc** – расчет паро-циркониевой реакции). Суммарный расход водорода, выделяющийся при паро-циркониевой реакции в активной зоне и реакторе **safh2core**(**16**) передается в модель первого контура (система TH) и разносится по первому контуру до места течи, где передается из системы TH в систему CH.

Передается также температура и давление, выделяющегося водорода satreal(1,saknz) и sapwat.

Имеется возможность корректировки интенсивности паро-циркониевой реакции и, соответственно, количества выделяющегося водорода и теплового эффекта реакции путем корректировки коэффициентов sakdzr(4/6):

- sakdzr(4/5) корректируют паро-циркониевую реакцию на нижней плите активной зоны и днище шахты, в s.sabd задано sakdzr(4/5) = 10.
- sakdzr(6) корректирует паро-циркониевую реакцию в твэлах активной зоны, в s.sabd задано sakdzr(6) = 2.

С увеличением/уменьшением этих коэффициентов интенсивность паро-циркониевой реакции соответственно увеличивается/уменьшается.

4.13 Выделение продуктов деления

Определяется суммарный выход радиоактивных веществ при разгерметизации твэлов в той или иной кассете **safactivity**, который передается в систему TH и далее через разрыв – в систему CH.

4.14 Определение температур шахты реактора

Температуры шахты реактора определяются для двух участков:

- - между верхней и нижней отметкой активной зоны (верхний участок) satsh1
- - между нижней отметкой активной зоны и верхней отметкой перфорированного днища шахты (нижний участок) satsh2

Эти температуры определяются по следующему алгоритму:

- satok температура теплоносителя в опускном кольцевом канале
- satco средняя температура периферийных ТВС
- sacmsh1 произведение теплоемкости на массу шахты, по умолчанию 10⁷ Дж/К.
- sakalfcosh1 коэффициент теплоотдачи от активной зоны к стенке шахты (200).
- sakalfsh1sh2 произведение коэффициента теплоотдачи на сечение стенки шахты (30)
- sakalfsh2wtr произведение коэффициента теплоотдачи на поверхность шахты2 (500.)
- sassh1 боковая поверхность верхнего участка шахты (35.0)
- sassh2 боковая поверхность нижнего участка шахты (35.0)
- sakalfsh1ok коэффициент теплоотдачи от стенки шахты к теплоносителю опускного канала

- $sakalfsh1ok = (thkalfpnt_1(nok1,1) + thkalfpnt_1(nok2,1) + thkalfpnt_1(nok3,1) + thkalfpnt_1(nok4,1))/4.$

- Если первый барьер не разрушен (sa:grid1 = .false.), то

- **saqcosh1** = sakalfcosh1*sassh1*(satco-satsh1) !Q from core to shaft1

- **saqsh1ok** = sakalfsh1ok*sassh1*(satsh1-satok) !Q from shaft1 to coolant

- saqsh1sh2 = sakalfsh1sh2*(satsh1-satsh2) !Q from shaft1 to shaft2

- saqsh2wtr = 2.0*sakalfsh2wtr*(satsh2-satwtr) !Q from shaft2 to coolant

- **satsh1**=satsh1+(saqcosh1-saqsh1ok-saqsh1sh2-saqsh_rr)*satdt/sacmsh1

- **satsh2**=satsh2+(saqsh1sh2-saqsh2wtr)*satdt/(sacmsh1/3.)

Лучистый теплообмен между верхней частью шахты с внутренней поверхностью корпуса peaktopa saqsh_rr определяется следующим образом:

 $safiok = (thfipnt_1(nok1) + thfipnt_1(nok2) + thfipnt_1(nok3) + thfipnt_1(nok4))/4.$

Если safiok <0.7, то saqsh_rr = 0.0

Если safiok >=0.7, то:

saqsh_rr = saqsh1rr(1)+saqsh1rr(2)+saqsh1rr(3)

saqsh1rr(1) = (safiok-0.7)*saksigma*sas(218,2)*(satsh1**4.-sat1(218)**4.)

saqsh1rr(2) = (safiok-0.7)*saksigma*sas(208,2)*(satsh1**4.-sat1(208)**4.)

```
saqsh1rr(3) = (safiok-0.7)*saksigma*sas(198,2)*(satsh1**4.-sat1(198)**4.)
```

Если первый барьер разрушен, а второй не разрушен (sa:grid1.and..not.sa:grid2), то saqsh1ok =sakalfsh1ok*sassh1*(satsh1-satok) !Q from shaft1 to coolant in ok

saqfg2sh2 = sakalffg2sh2*sassh2*(satfg2-satsh2) !Q from corium of core to shaft2

saqsh2ok = sakalfsh1ok*sassh2*(satsh2-satok) !Q from shaft2 to coolant

saqsh1sh2= sakalfsh1sh2*(satsh1-satsh2) !Q from shaft1 to satsh2

satsh1 = satsh1+(saqvkssh1-saqsh1ok-saqsh1sh2-saqsh_rr*

sassh1/(sas(198,2)+sas(208,2)+sas(218,2)))*

```
satdt/(saktsh1*sacmsh1)
```

satsh2 = satsh2+(saqfg2sh2-saqsh2ok+saqsh1sh2-saqsh_rr*

```
sassh2/(sas(198,2)+sas(208,2)+sas(218,2)))*
```

```
satdt/(saktsh2*sacmsh1)
```

Если выполняется условие

((satsh1.ge.(satlj(4)-5.)).and.(.not.sa:melt_sh))

где satlj(4) – температура перехода стали в жидкое состояние,

sa:melt_sh – признак бокового проплавления шахты реактора,

то постулируется боковое проплавление шахты реактора (присваивается sa:melt_sh = .true.) и часть компонентов расплава (samjche(1/4)) попадает на днище реактора.

После разрушения первого барьера оставшаяся часть расплава попадает на второй барьер.

4.15 Определение максимальных температур

Кроме того в модуле **s.ssabef** рассчитывается значения максимальных температур твэл в активной зоне **samaxtf3** и максимальных температур на поверхности корпуса реактора **satwo**.

Определяются момент наступления контрольного события - нарушения герметичности корпуса peakropa sataufail, который наступает при satwo >1144 °K.

5 Модуль s.ssacobo (взаимодействие расплава с внутрикорпусными устройствами и теплоносителем в реакторе)

Модуль предназначен для анализа процессов, протекающих в корпусе реактора после начала плавления компонентов топлива. В этом модуле выполняется расчет всего комплекса тепловых потоков (за счет теплопроводности, конвекции и теплового излучения) между внутрикорпусными структурами и между твердыми стенками и теплоносителем. При этом учитывается положение уровня воды в нижней камере. Учитывается также остаточное тепловыделение и тепловой эффект паро-циркониевой реакции.

5.1 Три барьера задержки расплава

При моделировании учитывается задержка расплавленных масс на трех барьерах - двух промежуточных и конечном барьерах:

- первый барьер - нижняя опорная плита активной зоны,

- второй барьер - перфорированное днище шахты,

- третий барьер – стенка корпуса реактора.

Расплавленные материалы попадают и накапливаются сначала на первом, затем на втором барьерах, и только после проплавления последнего – попадают на днище реактора. В соответствии с этими стадиями строится алгоритм расчета.

5.2 Структуры, для которых рассчитываются температуры

С учетом этого в модуле **s.ssacobo** на основе записи и решения уравнений теплового баланса выполняется расчет температур следующих структур (расчет температурных полей в твэлах кассет производится в системе TH):

- температура нижней опорной плиты активной зоны (до момента ее расплавления) satgr1;
- распределение температур в кориуме на днище шахты реактора после проплавления нижней опорной плиты активной зоны (15 расчетных слоев по высоте) satfg2b(15);
- средняя температура кориума satfg2;
- температура части кориума, попавшего на днище корпуса реактора после проплавления нижней опорной плиты активной зоны **satfh**;
- температура перфорированного днища шахты satgr2;
- распределение температур в корпусе реактора sat1(230).

5.3 Моменты разрушения барьеров

Кроме того, в модуле **s.ssacobo** рассчитываются взаимодействие расплава с пароводяной средой в нижней камере реактора и корпусом реактора, а также моменты расплавления первого и второго барьеров: нижней опорной плиты активной зоны и перфорированного днища шахты (момент разрушения третьего барьера – стенки корпуса реактора – определяется в модуле **s.ssabef**).

АО ИТЦ «ДЖЭТ»	Программное обеспечение ММ ВВЭР -1000 Руководство пользователя	Номер редакции 1.0
---------------	---	--------------------

Принимается, что разрушение первого и второго барьеров – нижней опорной плиты активной зоны и перфорированного днища шахты происходит по условиям:

satgr1 > satfail, satgr2 > satfail, satfail = 1700 K

Моменты наступления этих событий обозначаются как satgrid1 и satgrid2, соответственно. Момент нарушения герметичности корпуса реактора (разрушение третьего барьера) sataufail определяется в модуле s.ssabef по максимальной температуре наружного слоя металла корпуса – когда температура превысит 1144 К, формируется признак проплавления корпуса реактора.

5.4 Уравнения теплового баланса

При записи уравнений тепловых балансов учитываются:

- остаточное тепловыделение в слоях расплава, где присутствует топливо,
- тепло паро-циркониевой реакции в слоях расплава (если она имеет место),
- теплообмен между слоем расплава и барьером, на котором он находится,
- теплообмен между слоем расплава и теплоносителем (с учетом положения уровня воды в реакторе),
- теплообмен между барьером и теплоносителем (с учетом положения уровня воды в реакторе),
- теплообмен между наружной поверхностью корпуса реактора и атмосферой помещений, в которых расположен реактор, или водой, залитой в подреакторный объем.

5.5 Температура первого барьера

Температура первого барьера определяется по соотношению

satgr1 = satgr1 + (saqfgr1-saqwgr1)*satdt/sacmgr1

где saqfgr1 – тепловой поток от расплава к первому барьеру, saqwgr1 – тепловой поток от первого барьера к теплоносителю, sacmgr1 – полная теплоемкость (C*M) первого барьера, satdt – шаг расчета (0,05 с).

5.6 Теплообмен между первым барьером и расплавом

Для расчета saqfgr1 используется следующий алгоритм:

saqfgr1 = kf0

if (satfg1.gt.satgr1) then

saqfgr1 = sahfgr1*saafgr1*(satfg1-satgr1)

else

safigr1 = $[\sum thvpmNfi_1(15)]/13, N=76/88$

if (safigr1.lt.0.01).or.(sareal1.lt.0.5)) then

saqfgr1=kf0

else

saqfgr1 = saksigma* safigr1* sareal1/realnr*saafgr1*(satcoreave**4.-satgr1**4.)

end if

end if

Здесь

- thvpmNfi_1(15) паросодержания на выходе кассет N, N=76/88,
- sareal1 число заблокированных кассет вследствие застывания стекающего расплава,
- realnr общее число кассет (тип real), realnr=real(saknr),
- saksigma= 5.67е-08 коэффициент Стефана-Больцмана,
- sahfgr1 коэффициент теплопередачи между слоем расплава, контактирующим с первым барьером,
- saafgr1 площадь поверхности первого барьера, относящаяся к тепловому контакту первого барьера с активной зоной,
- satcoreave средняя температура активной зоны,
- sacmgr1 = samgrid1*sacspheat(4),
- sacspheat(4) теплоемкость стали первого барьера,
- samgrid1 масса первого барьера.

5.7 Теплообмен между первым барьером и теплоносителем

Для расчета saqwgr1 используется следующий алгоритм:

```
saqwgr1=sahwgr1*saawgr1*(satgr1-satw1)
```

Здесь

- satw1 температура теплоносителя в нижней камере под первым барьером. Эта температура определяется, как температура жидкой фазы (satwtr), если уровень воды в реакторе выше уровня первого барьера, или как температура парогазовой фазы (satwtr2), если уровень воды в реакторе ниже уровня первого барьера;
- saawgr1- площадь поверхности первого барьера, относящаяся к тепловому контакту первого барьера с теплоносителем нижней камеры реактора;
- sahwgr1 коэффициент теплопередачи между первым барьером и теплоносителем в нижней камере, контактирующим с первым барьером (зависит от положения уровня в реакторе).

Для определения того или иного положения уровня производится сравнение объема воды в нижней камере (savdc) с объемом нижней камеры от нижней образующей до отметки первого барьера (savwgrl). Если (savdc > savwgrl), то первый барьер находится под уровнем воды, и наоборот.

5.8 Контроль скорости разогрева первого барьера

Скорость разогрева первого барьера можно контролировать, изменяя **samgrid1**. При снижении этой величины скорость разогрева увеличивается и наоборот.

5.9 Компоненты расплава

При моделировании материалов активной зоны рассматриваются 4 компонента:

АО ИТЦ «ДЖЭТ»

UO₂, (2) Zr, (3) ZrO₂, (4) сталь.

При достижении в каждой расчетной ячейке температур полного перехода і-го компонента в жидкое состояние (satlj)

data	satlj(1)	/ 3123.00000 / ! UO2
data	satlj(2)	/ 2138.00000 / ! Zr
data	satlj(3)	/ 2250.00000 / ! ZrO2
data	satlj(4)	/ 1781.00000 / ! сталь

происходит перемещение этого компонента в зону релокации (зона 7, 4.1Рисунок 3 –) и последующее стекание в ячейки, расположенные ниже, при наличии в них свободного объема для принятия натекающей порции расплава.

Анализируется состав расплава и массы входящих в него компонентов. Для расплава, скапливающегося на первом барьере – это samjcg1:

samjcg1(1) – масса UO_2

samjcg1(2) – масса Zr

samjcg1(3) – масса ZrO_2

samjcg1(4) – масса стали

Соответственно, для расплава, скапливающегося на втором барьере – это samicg2(1/4), а на третьем барьере (днище реактора) – это samjche(1/4).

Остаточные тепловыделения от расплава, задержанного на втором барьере после разрушения первого барьера (sahdecay2) рассчитываются по соотношению

sahdecay2 = saqm*samjcg2(1)

а на третьем барьере (sahdecayh) – по соотношению

sahdecayh = saqm * samjche(1)

Здесь saqm – массовое энерговыделение в активной зоне:

saqm = sannom*sanotn/samuo2core,

где

sannom – номинальная мощность реактора, Вт,

samuo2core – проектная масса топлива в активной зоне,

sanotn – относительное остаточное энерговыделение (см. выше).

Расплав рассматривается как эвтектика компонентов с весовыми коэффициентами, пропорциональными их массам.

5.10 Температура второго барьера

Температура второго барьера определяется по соотношению

```
satgr2 = satgr2+(saqcorgr2(1)-saqwgr2)*satdt/(samgrid2*sacspheat(4))
```

где

sacspheat(4) – теплоемкость стали второго барьера,

samgrid2 – масса второго барьера.

saqwgr2 – теплообмен между вторым барьером и теплоносителем,

saqcorgr2(1) – теплообмен между вторым барьером и нижним слоем расплава, переместившегося на второй барьер.

5.11 Теплообмен между вторым барьером и расплавом

Для расчета saqcorgr2(1) используется следующий алгоритм: if (satfg2b(2).lt.3110.) then

saqcorgr2b(1) = sahfgr2*saafgr2*(satfg2b(1)-satgr2)*0.4 saqcorgr2b(2) = sahfgr2*saafgr2*(satfg2b(2)-satgr2)*0.2 saqcorgr2b(3) = sahfgr2*saafgr2*(satfg2b(3)-satgr2)*0.2 saqcorgr2b(4) = sahfgr2*saafgr2*(satfg2b(4)-satgr2)*0.2saqcorgr2(1) = saqcorgr2b(1)+saqcorgr2b(2)+saqcorgr2b(3)+saqcorgr2b(4)

else

```
saqcorgr2(1) = sahfgr2*sareal8*saafgr2*(satfg2b(1)-satgr2)
```

end if

Здесь

- sahfgr2 коэффициент теплоотдачи от переместившегося на второй барьер расплава ко второму барьеру,
- saafgr2 поверхность контакта расплава со вторым барьером,
- satfg2b(1/15) распределение температур по высоте в 15 расчетных слоях расплава
- sareal8 коэффициент увеличения теплообмена между расплавом и вторым барьером при переходе расплава (над слоем контакта) в жидкое состояние, по умолчанию sareal8 =100

- saqcorgr2b(1/4) – теплообмен между нижними слоями расплава и вторым барьером.

5.12 Температуры слоев расплава

Температуры слоев расплава satfg2b(1/15) определяются через балансные температуры satfg2a(1/15) в модуле **s.ssatrea**. Балансные температуры определяются в соответствии с уравнением теплового баланса в рамках энтальпийного подхода, при котором рост температуры слоя кориума связан с ростом энтальпии этого слоя. В том числе и на интервале энтальпий от начала плавления того или иного компонента ($h_{solidus}$) до полного его расплавления ($h_{liqidus}$) при выделении всей необходимой для этого теплоты плавления. Реальная же температура на этом интервале остается постоянной и равной температуре плавления компонента. До достижения энтальпии $h_{solidus}$ реальная температура совпадает с балансной. После полного расплавления компонента реальная температура начинает отставать от реальной температуры на величину ($T_{liqidus}$ - $T_{solidus}$).

Балансная температура слоев кориума на втором барьере определяется по следующему алгоритму:

do iz=1,4

satfg2a(iz) = satfg2a(iz) + ((sahdecay2 + sahzr2)/realnz - saqfwgr2(iz) + (sahdecay2 + saqfwgr2(iz) + (sahdecay2 + sahzr2)/realnz + (sahdecay2 + sahzr2)/r

saqcorgr2(iz+1)-saqcorgr2(iz) - saqcorgr2b(iz))*satdt/sacef2

end do

&

четырех

26

```
do iz=5,saknz-1
        satfg2a(iz) = satfg2a(iz) + ((sahdecay2 + sahzr2)/realnz - saqfwgr2(iz) +
&
        saqcorgr2(iz+1)-saqcorgr2(iz))* satdt/sacef2
 end do
if (savdc.lt.savwgr2) then
 sareal15 = saksigma*sakemiswtr*saafullcore*(satfg2b(saknz)**4.-sareal14**4.)
else
 sareal15 = kf0
end if
 satfg2a(saknz) = satfg2a(saknz)+((sahdecay2+sahzr2)/
&
        realnz-saarray7(saknz)-sareal15-saqcorgr2(saknz))*satdt/sacef2
 Здесь
 - saknz – число разбиений по высоте (saknz = 15).
 - sahdecay2 и sahzr2 – остаточное тепловыделение и тепловой эффект паро-циркониевой
  реакции в расплаве на втором барьере,
 - saqfwgr2(iz) – теплоотвод от слоя iz расплава с поверхностью saafwgr2 к пару с
  температурой - satw2 и коэффициентом теплоотвода sahfwgr2
        saqfwgr2(iz)=sahfwgr2*saafwgr2*(satfg2b(iz)-satw2)
 - saqcorgr2(iz) – теплообмен между слоями расплава (iz) и (iz-1)
  saqcorgr2(iz)=saafgr2*sakef2/(salcore/realnz)* (satfg2b(iz)-satfg2b(iz-1))
  if ((satfg2b(iz).gt.3110.).or. (satfg2b(iz-1).gt.3110.)) saqcorgr2(iz)=saqcorgr2(iz)*sareal8
           saafgr2 – площадь контакта между слоями расплава
                                                            расплава
           sakef2
                       эффективная
                                       теплопроводность
                                                                        (эвтектика
  компонентов)
          sacef2 – эффективная теплопроводность расплава
               sacef2=sacef2+samjcg2(j)*sakc2jc(j)/realnz,
                                                                      i = 1/4
               sakef2=sakef2+samjcg2(j)*sakk2jc(j)/samcorg2
               sakc2jc(1/4) – теплоемкости четырех компонентов
               sakk2jc(1/4) - теплопроводности четырех компонентов
        sareal15 – теплообмен между верхним слоем расплава и стенкой верхней камеры
        реактора с температурой sareal14,
        if (savdc.lt.savwgr2) then
               sareal15 = saksigma*sakemiswtr*saafullcore*(satfg2b(saknz)**4.-sareal14**4.)
        else
               sareal15 = kf0
                                 б/н
```

end if

- savwgr2 – объем нижней камеры от нижней образующей до отметки второго барьера.

5.13 Контроль скорости разогрева второго барьера

Скорость разогрева второго барьера можно контролировать, изменяя **samgrid2**. При снижении этой величины скорость разогрева увеличивается и наоборот.

5.14 Средняя температура расплава

Средняя температура расплава satfg2 определяется по средней балансной температуре расплава satfg2ef в модуле s.ssatrea. При этом температура satfg2ef определяется по следующему алгоритму.

В момент разрушения первого барьера

satfg2ef = (samtcore+samgrid1*satfail)/(samcore+samgrid1)

где

- samtcore = сумма (по всем расчетным ячейкам всех TBC) произведений масс компонентов UO₂, Zr, ZrO₂, находящихся в активной зоне в момент разрушения первого барьера, на их температуры.
- samgrid1 масса первого барьера,
- satfail температура, при которой происходит разрушение барьера (по умолчанию 1700 К),
- samcore начальная суммарная масса топливных таблеток и оболочек твэл в ректоре, для реактора ВВЭР-1200 она составляет 109565 кг.

Далее эта температура определяется из соотношения

satfg2ef = \sum satfg2a(1/15)/15.

5.15 Средняя температура расплава на днище реактора

В момент перемещения расплава на второй барьер при разрушении первого барьера предполагается, что некоторая часть этого расплава (saxff) попадает непосредственно на днище реактора. Средняя температура этой части расплава (satfh) определяется по средней балансной температуре satfhef в модуле s.ssatrea. В момент разрушения первого барьера satfhef = satfg2ef. В дальнейшем температура satfhef определяется по следующему алгоритму:

satfhef = satfhef + (sahdecayh-saqfwhe-saqfhe)*satdt/sacefh

При этом, в момент разрушения второго барьера происходит пересчет этой температуры по соотношению

satfhef = (samcoregrid1*satfgrid2+samgrid2*satfail)/(samcoregrid1+samgrid2)

Здесь

- sahdecayh остаточное энерговыделение в расплаве на днище,
- sacefh суммарная теплоемкость расплава на днище,
- satfgrid2 = satfg2ef средняя балансная температура в расплаве на втором барьере,
- samcoregrid1 = samcore+samgrid1, определение samcore было дано выше,
- sacefh теплоемкость расплава (эвтектики 4-х компонентов) на днище реактора,
- saqfwhe теплообмен между расплавом на днище и теплоносителем:

saqfwhe=sahfwhe*saafwhe*(satfh-satw2)

Здесь

- saafwhe – площадь контакта кориума на днище реактора с водой.

Если второй барьер не разрушен и выполняется условие (savdc> savwgr2), то

satw2 – температура жидкой фазы в нижней камере реактора,

sahfwhe – коэффициент теплоотдачи к воде;

если savdc< savwgr2, то

satw2 – температура парогазовой фазы;

sahfwhe – коэффициент теплоотдачи к парогазовой смеси.

Если второй барьер разрушен и выполняется условие (savdc> savdcmin), то

satw2 – температура жидкой фазы в нижней камере реактора,

sahfwhe – коэффициент теплоотдачи к воде;

если savdc < savdcmin, то

satw2 – температура парогазовой фазы;

sahfwhe – коэффициент теплоотдачи к парогазовой смеси;

по умолчанию savdcmin = 0,1 м3;

- saqfhe – теплообмен кориума на днище реактора с днищем

saqfhe = sahfhe*saafhe*(satfh-sat1(10))

где

- sahfhe и saafhe коэффициент теплообмена и площадь контакта между кориумом на днище и днищем реактора,
- sat1(10) температура внутреннего слоя стенки днища реактора (стенка корпуса реактора и днища разбивается на 10 слоев, наружный слой -1, внутренний слой 10)

После того, как начинает выполняться условие (savdc< savdcmin), выполняется присвоение sa:failcore = .true. и осуществляется переход к двумерной осесимметричной

модели теплообмена для кориума и корпуса реактора, описываемый в модуле s.ssatemp.

5.16 Интерфейс между системами SA и TH по теплообмену между теплоносителем в камерах реактора и кориумом

Интерфейс между системами SA и TH по теплообмену между теплоносителем в верхней и нижней камерах реактора и кориумом, а также барьерами в нижней камере ректора осуществляется следующим образом. В системе TH резервируется массив thpheat9_1(14,3), в котором:

thpheat9_1(1/4,1) – тепловой поток к расчетным ячейкам нижней камеры реактора, связанным со входными патрубками реактора (через соответствующие расчетные ячейки нижнего кольцевого канала);

thpheat9_1(5,1) – тепловой поток к нижней центральной расчетной ячейке нижней камеры реактора;

thpheat9_1(6/9,1) – тепловой поток к расчетным ячейкам верхней камеры реактора, связанным со выходными патрубками реактора;

thpheat9_1(10,1) – тепловой поток к верхней центральной расчетной ячейке верхней камеры реактора;

thpheat9_1(11/14,1) – тепловой поток к расчетным ячейкам опускного кольцевого канала

Тепловым потокам в массиве thpheat9_1(1/14,1) соответствуют тепловые потоки в массиве sapheat9(1/14,1)

thpheat9_1(i,1) = sapheat9(i,1), i = 1 / 14,

которые определяются следующим образом.

- sakfmldown = \sum thmlpnt_1(i) / (\sum thmlpnt_1(i)+ thmlpnt_1(sandown)), i=sannks1/ sannks4

- sakalfvks = \sum thkalfpnt_1(i,1)* sascvks / (4.*5.), i= sannks1 / sannks4

- sakalfok = \sum thkalfpnt_1(i,1)* sassh1 / (4.*4.), i= sannok1 / sannok4

- sascvks – поверхность контакта активной зоны с верхней камерой (15.0 м²)

- sassh1 – боковая поверхность шахты1 (35.0 м²)

Если первый барьер не разрушен и нет бокового проплавления шахты, то

sapheat9(1/4,1) = saqwgr1/4.

sapheat9(5,1) = 0.0

Если выполняется условие: (savdc.gt.savwgr1), то sapheat9(6/14,1)=0.0

Если выполняется условие:(savdc.lt.savwgr1), то:

- satcv средняя температура оболочек твэл на выходе активной зоны
- satcv = \sum satreal(N,15)/8., N=6,26,37,75,103,127,138,162
- sapheat9(6/10,1)= sakalfvks* (satcv -thtvgpnt_1(i)), i= sanvks1 / sanvks4, sanup
- sapheat9(11/14,1) = sakalfok* (satsh1-thtvgpnt_1(i)), i= sanok1 / sanok4

Если первый барьер не разрушен и есть боковое проплавление шахты, то

- sapheat9(i,1)= sakfmldown*(saqfwhe+saqwgr1)/4., i = 1 / 4

- sapheat9(5,1)= (1.0- sakfmldown)*(saqfwhe+saqwgr1)

- sapheat9(6/14,1)=0.0

Если первый барьер разрушен, а второй барьер не разрушен, то

- sapheat9(1/4,1)= sakfmldown*(sareal13+saqwgr2+saqfwhe)/4.
- sapheat9(5,1)= (1.- sakfmldown)*(sareal13+saqwgr2+saqfwhe)
- sareal13 = ∑saqfwgr2(iz), iz=1/15 теплоотвод от расплава на втором барьере к теплоносителю
- sapheat9(6/10,1) = sakalfvks* (satfg2-thtvgpnt_1(i)), i= sanvks1 / sanvks4, sanup
- sapheat9(11/14,1) = sakalfok* (satsh2-thtvgpnt_1(i)), i= sanok1 / sanok4

Если первый и второй барьер разрушены и sa:failcore = .false., то

- sapheat9(1/4,1) = saqfwhe/4.* sakfmldown
- sapheat9(5,1) = saqfwhe*(1.- sakfmldown)
- sapheat9(6/14,1)=0.0

Если (sa:failcore = .true.) и (savdc.gt.savdcmin), то

- saqgr1nks4 = sakfmldown*(saqgr1vks + sakfqcc*sareal10)/4. ! sakfqcc=0.8
- saqsgr1vks1=sahwgr1cr*(sat1(27)-satwtr) !Qs melt-water
- saqsgr1vks2=sahwgr1cr*(sat1(185)-satwtr)!Qs melt-water
- saqsgr1vks3=sahwgr1cr*(sat1(186)-satwtr)!Qs melt-water
- saqsgr1vks4=sahwgr1cr*(sat1(187)-satwtr)!Qs melt-water

saggr1vks = sagsgr1vks1*sas(27,1) + sagsgr1vks2*sas(185,1) + sagsgr1vks3*sas(186,1) +saqsgr1vks4*sas(187,1) sapheat9(1,1)=saqgr1nks4 sapheat9(2,1)=saqgr1nks4 sapheat9(3,1)=saqgr1nks4 sapheat9(4,1)=saqgr1nks4 sapheat9(5,1)=(kf1 - sakfmldown)*(saggr1vks+sakfqcc*sareal10) sapheat9(6/14,1) = 0sat1(27) – температура верхнего слоя расплава sas(27,1) – поверхность теплоотвода от верхнего слоя расплава (27) в вертикальном направлении Если (sa:failcore = .true.) и (savdc.lt.savdcmin)), то saqsgr1vks1=sahwgr1cr*(sat1(27)-satvks) !Qs saqsgr1vks2=sahwgr1cr*(sat1(185)-satvks) !Qs saqsgr1vks3=sahwgr1cr*(sat1(186)-satvks) !Qs saqsgr1vks4=sahwgr1cr*(sat1(187)-satvks) !Qs saqgr1vks = saqsgr1vks1*sas(27,1) + saqsgr1vks2*sas(185,1) + saqsgr1vks3*sas(186,1) +saqsgr1vks4*sas(187,1) sapheat9(1,1)=thmpnt_1(sannks1)/(mpntsum+0.01)*saggr1vks sapheat9(2,1)=thmpnt_1(sannks2)/(mpntsum+0.01)*saqgr1vks sapheat9(3,1)=thmpnt_1(sannks3)/(mpntsum+0.01)*saggr1vks sapheat9(4,1)=thmpnt_1(sannks4)/(mpntsum+0.01)*saqgr1vks sapheat9(5,1)=thmpnt_1(sandown)/(mpntsum+0.01)*saqgr1vks sapheat9(6,1)=thmpnt_1(sanvks1)/(mpntsum+0.01)*saqgr1vks sapheat9(7,1)=thmpnt_1(sanvks2)/(mpntsum+0.01)*saqgr1vks sapheat9(8,1)=thmpnt 1(sanvks3)/(mpntsum+0.01)*saggr1vks sapheat9(9,1)=thmpnt_1(sanvks4)/(mpntsum+0.01)*saqgr1vks sapheat9(10,1)=thmpnt_1(sanup) /(mpntsum+0.01)*saqgr1vks sapheat9(11,1)=thmpnt_1(sanok1)/(mpntsum+0.01)*saqgr1vks sapheat9(12,1)=thmpnt 1(sanok2)/(mpntsum+0.01)*saggr1vks sapheat9(13,1)=thmpnt_1(sanok3)/(mpntsum+0.01)*saqgr1vks sapheat9(14,1)=thmpnt_1(sanok4)/(mpntsum+0.01)*saqgr1vks 5.17 Температуры в стенке корпуса реактора на стадии разогрева

5.17 Температуры в стенке корпуса реактора на стадии разогрег активной зоны

Определение температур в стенке корпуса реактора на стадии разогрева

активной зоны производится в модуле s.ssacobo. При выпадении расплава на днище корпуса реактора расчет этих температур производится в модуле s.ssatemp.

При снижении уровня воды в реакторе и оголении активной зоны начинается ее разогрев и, соответственно, разогрев шахты реактора, особенно на верхнем участке, находящемся между

нижней и верхней отметками активной зоны. Частично тепло от шахты отводится к теплоносителю опускного кольцевого канала (конвективный теплообмен), а частично, по мере возрастания объемного паросодержания в опускном канале, - к внутренней поверхности стенок корпуса реактора (лучистый теплообмен).

Расчет изменения температур стенок корпуса начинается при выполнении условия

(safiok.ge.0.7), определение safiok приведено в описании модуля s.ssabef.

При выполнении этого условия:

saq1head(1)=saqsh1rr(1)

```
saq2head(1)=saqsh1rr(2)
```

saq3head(1)=saqsh1rr(3)

saq1head(i)=sauhead_(i)*sas(218,2)* (sat1(216+i)-sat1(217+i)), i=2/10

saq2head(i)=sauhead_(i)*sas(208,2)* (sat1(206+i)-sat1(207+i)), i=2/10

saq3head(i)=sauhead_(i)*sas(198,2)* (sat1(196+i)-sat1(197+i)), i=2/10

sauhead_(1/10) – коэффициент теплопередачи между слоями в стенке корпуса, по толщине стенка корпуса разбита на 10 слоев;

тепловые потоки от наружной поверхности стенки корпуса к окружающему воздуху с температурой satair

saq1head (11)=saalfcriz*sas(218,2)*(sat1(227)-satair)

saq2head (11)=saalfcriz*sas(208,2)*(sat1(217)-satair)

saq3head (11)=saalfcriz*sas(198,2)*(sat1(207)-satair);

Температуры стенок корпуса для ячеек (197+i), (207+i), (217+i), i=1/10

sat1(217+i)=sat1(217+i)+(saq1head(i) - saq1head(i+1))* satdt/((samm218+0.01)*sakc2jc(4)),

sat1(207+i) = sat1(207+i) + (saq2head(i) - saq2head(i+1)) * satdt/((samm208+0.01) * sakc2jc(4))

sat1(197+i)=sat1(197+i)+(saq3head(i) - saq3head(i+1))* satdt/((samm198+0.01)*sakc2jc(4))

samm218, samm208, samm198 – массы металла в расчетной ячейке стенки корпуса sakc2jc(4) – теплоемкости металла в функции от температуры в расчетной ячейке

6 Модуль s.ssatemp (взаимодействие расплава с внутрикорпусными устройствами и теплоносителем в реакторе)

Модуль предназначен для расчета поля температур в расплаве на днище реактора и в стенках корпуса и днища в рамках двумерной осесимметричной задачи теплопроводности.

Учитывается стратификация расплава на тяжелую и легкую фракции. При моделировании теплопередачи между расчетными ячейками учитывается фазовое состояние материалов.

Учитывается теплообмен между слоями расплава, корпуса реактора и структурами верхней камеры реактора, между реактором и окружающей атмосферой шахты реактора и верхнего объема, теплоотвод к внутренней поверхности контайнмента и от наружной поверхности контайнмента – в окружающую атмосферу.

Расчетная схема двумерной осесимметричной модели теплопроводности приведена на Рисунок 4 –. Слои 11-17, 29-31, 42-44, 55-57 относятся к тяжелой части расплава (UO₂), а слои 18-27, 68-70, 81-83, 94-96, 107-109, 120-122, 133-135, 146-148, 159-161, 172-174, 185-187 – к легкой части расплава (цирконий, сталь и двуокись циркония). Слой 28 моделирует среднюю температуру металла верхней части реактора. Слои 1-10 моделируют днище реактора. Остальные слои моделируют стенки корпуса реактора.

При разбиении расплава на слои выделяется узкая трехслойная зона, прилегающая к корпусу и днищу реактора. Кроме того, такая же зона выделяется в верхней части нижнего более тяжелого слоя расплава (UO₂) на границе с верхней, более легкой, частью расплава (металлы и легкие окислы). Это делается для учета возможности образования тонких корок на верхней поверхности расплава и поверхностях, прилегающих к корпусу и днищу реактора.

Температура в каждой расчетной ячейке определяется из уравнения теплового баланса, учитывающего тепловые потоки через границы ячейки в осевом и радиальном направлениях за счет теплопроводности для внутренних границ и за счет конвективного или лучистого теплообмена – для наружных границ, а также остаточное тепловыделение в тех ячейках, где присутствует двуокись урана:

$(CM)_i dT_i / d\tau = \sum Q_{ij,ik}$

где

(CM)_i - произведение теплоемкости на массу материала в ячейке, для ячеек расплава – это сумма произведений теплоемкости на массу компонентов расплава для каждой ячейки;

Q_{ij,ik} - тепловой поток через границы ячейки в осевом и радиальном направлениях за счет теплопроводности для внутренних границ и за счет конвективного или лучистого теплообмена – для наружных границ.

Таким образом, температура определяется, как

$T_i^{n+1} = T_i^n + \sum Q_{ij,ik} \, \varDelta \tau \, / \, (CM)_i$

При расчете тепловых потоков через внутренние границы двух ячеек учитывается фазовое состояние этих ячеек. Если две смежные ячейки находятся в расплавленном состоянии, то вводится фактор увеличения теплообмена между ними.



Рисунок 4 – Расчетная схема двумерной модели теплопроводности (расплав на днище)

Постулируется разрушение днища корпуса реактора по достижению максимальной температуры на наружной поверхности корпуса реактора заданного значения. По данным ОКБ «Гидропресс» это значение составляет 1144 К. Максимальная температура наружной поверхности корпуса реактора **satwo** определяется в модуле **s.ssabef**. При достижении этой температуры критерия разгерметизации корпуса происходит вскрытие корпуса реактора и стекание расплава в устройство локализации расплава или на бетонное основание подреакторного объема шахты реактора. Проплавление стенки корпуса реактора наблюдается в зоне «легкой» составляющей слоя кориума (металлы) недалеко от границы этой зоны с зоной «тяжелой» составляющей слоя кориума (двуокись урана). Геометрически это близко к зоне сварного шва днища корпуса.

Каждая расчетная ячейка (слой) характеризуются своим объемом savol(230), толщиной в двух направлениях (решается двумерная осесимметричная задача теплопроводности) - sadlt(230,2), поверхностью теплового контакта в двух направлениях sas(230,2), массой sam(230). Для каждой расчетной ячейки определяются физические и балансные температуры sat1(230) и satef1(230), а также свойства в функции от температуры: теплоемкость - sac(230) и теплопроводность - saksti(230).

Для каждой границы между смежными ячейками в двух направлениях определяются коэффициенты теплопередачи в осевом направлении saarray8(230) и радиальном направлении saarray9(230) и соответствующие удельные тепловые потоки saqs(230,2). При этом, если

б/н

температуры в двух смежных ячейках достигают температуры плавления, то соответствующие коэффициенты теплопередачи увеличиваются с коэффициентом **saktomelt** (по умолчанию saktomelt =10.). Тепловые потоки на границах расчетной ячейки определяются по соотношению

saq(i,1/2) = saqs(i,1/2)* sas(i,1/2), i = 1/230.

Для каждой расчетной ячейки рассчитывается суммарный тепловой баланс

 $sadq(i) = \sum saq(ij,1/2)$

где saq(ij,1/2) - тепловые потоки к ячейке i от смежных с ней ячеек j в обоих направлениях.

Для ячеек, моделирующих расплав, в суммарном тепловом балансе учитывается также остаточное тепловыделение. При этом предполагается, что в расплаве на днище реактора выделяется 75% от общего остаточного энерговыделения активной зоны, а 25% выделяется из под оболочек твэл при их разгерметизации и уносится из первого контура под защитную оболочку. Кроме того, предполагается, что 70% от энерговыделения в расплаве выделяется в 7 слоях нижней «тяжелой» части расплава (sakfqlo = 0.7), а 30% (sakfqhi =1.0 - sakfqlo) выделяется в 10 слоях верхней «легкой» части расплава. В свою очередь в этих 10 слоях (с 18 по 27) энерговыделение распределяется неравномерно в следующих долях (снизу вверх):

0.19, 0.17, 0.15, 0.13, 0.11, 0.09, 0.07, 0.05, 0.03, 0.01 (суммарно, 1,0)

Балансная температура определяется по уравнению теплового баланса

satef1(i)=satef1(i)+saalf(k)*sadq(i)*satdt/sac(i)/sam(i)

Здесь saalf(k) – коэффициент для возможности корректировки темпа разогрева или расхолаживания расплава.

Для слоев топлива («тяжелая» часть расплава) saalf(k) = saalf(21), (по умолчанию = 1.)

Для «легкой части расплава saalf(k) = saalf(22), (по умолчанию = 1.)

Для слоев днища saalf(k) = saalf(23), (по умолчанию = 1.)

Для слоев стенки корпуса, прилегающих к pacплаву, saalf(k) = saalf(24), (0.5)

Для слоев стенки корпуса, над расплавом saalf(k) = saalf(25), (0.5)

Для металлоконструкций верхней части реактора (слой 28) saalf(k) = saalf(26), (1.0)

Для интерфейсной передачи в систему СН определяется тепловой поток от наружной поверхности корпуса и дница реактора saqsn.

7 Модуль s.ssaprop (определение свойств компонентов)

Свойства каждого компонента определяются как функции температуры расплава по справочным данным. При этом используется линейная интерполяция (модуль s.ssairt43) по таблицам теплофизических свойств компонентов в зависимости от температуры. Ниже приведены интерполяционные таблицы из файла s.bdsa.

7.1 Свойства UO2

Температ	rypa UO2	Теплоемко	сть UO2	Плотность	UO_2	Теплопроводност	ь UO2
saktu0(1)	/ 373.0 /	sakcu0(1)	/ 260.0 /	sakdu0(1)	/ 10376.0	/ sakku0(1)	/ 6.83 /
saktu0(2)	/ 473.0 /	sakcu0(2)	/ 279.0 /	sakdu0(2)	/ 10376.0	/ sakku0(2)	/ 5.98 /
saktu0(3)	/ 573.0 /	sakcu0(3)	/ 290.0 /	sakdu0(3)	/ 10376.0	/ sakku0(3)	/ 5. 30 /
saktu0(4)	/ 673.0 /	sakcu0(4)	/ 297.0 /	sakdu0(4)	/ 10376.0	/ sakku0(4)	/ 4. 74 /
saktu0(5)	/ 773.0 /	sakcu0(5)	/ 303.0 /	sakdu0(5)	/ 10376.0	/ sakku0(5)	/ 4. 28 /
saktu0(6)	/ 873.0 /	sakcu0(6)	/ 307.0 /	sakdu0(6)	/ 10376.0	/ sakku0(6)	/ 3.89 /
saktu0(7)	/ 973.0 /	sakcu0(7)	/ 311.0 /	sakdu0(7)	/ 10376.0	/ sakku0(7)	/ 3. 55 /
saktu0(8)	/ 1073.0 /	sakcu0(8)	/ 314.0 /	sakdu0(8)	/ 10376.0	/ sakku0(8)	/ 3. 26 /
saktu0(9)	/ 1173.0 /	sakcu0(9)	/ 317.0 /	sakdu0(9)	/ 10376.0	/ sakku0(9)	/ 3.01 /
saktu0(10)	/ 1273.0 /	sakcu0(10)	/ 320.0 /	sakdu0(10)	/ 10376.0) / sakku0(10)	/ 2.79 /
saktu0(11)	/ 1373.0 /	sakcu0(11)	/ 323.0/	sakdu0(11)	/ 10376.0)/ sakku0(11)	/ 2. 61 /
saktu0(12)	/ 1405.0 /	sakcu0(12)	/ 324.0/	sakdu0(12)	/ 10376.0) / sakku0(12)	/ 2. 55 /
saktu0(13)	/ 1473.0 /	sakcu0(13)	/ 326.0/	sakdu0(13)	/ 10376.0)/ sakku0(13)	/ 2. 45 /
saktu0(14)	/ 1573.0 /	sakcu0(14)	/ 331.0/	sakdu0(14)	/ 10376.0) / sakku0(14)	/ 2. 32 /
saktu0(15)	/ 1673.0 /	sakcu0(15)	/ 337.0/	sakdu0(15)	/ 10376.0) / sakku0(15)	/ 2. 22 /
saktu0(16)	/ 1773.0 /	sakcu0(16)	/ 345.0 /	sakdu0(16)	/ 10376.0)/ sakku0(16)	/ 2. 14 /
saktu0(17)	/ 1873.0 /	sakcu0(17)	/ 355.0 /	sakdu0(17)	/ 10376.0)/ sakku0(17)	/ 2.09 /
saktu0(18)	/ 1973.0 /	sakcu0(18)	/ 368.0 /	sakdu0(18)	/ 10376.0) / sakku0(18)	/ 2.06 /
saktu0(19)	/ 2073.0 /	sakcu0(19)	/ 385.0 /	sakdu0(19)	/ 10280.0) / sakku0(19)	/ 2.06 /
saktu0(20)	/ 2173.0 /	sakcu0(20)	/ 405.0 /	sakdu0(20)	/ 10230.0) / sakku0(20)	/ 2. 08 /
saktu0(21)	/ 2273.0 /	sakcu0(21)	/ 430.0 /	sakdu0(21)	/ 10170.0)/ sakku0(21)	/ 2. 12 /
saktu0(22)	/ 2373.0 /	sakcu0(22)	/ 458.0 /	sakdu0(22)	/ 10110.0) / sakku0(22)	/ 2. 18 /
saktu0(23)	/ 2473.0 /	sakcu0(23)	/ 490.0 /	sakdu0(23)	/ 10050.0) / sakku0(23)	/ 2. 26 /
saktu0(24)	/ 2573.0 /	sakcu0(24)	/ 527.0 /	sakdu0(24)	/ 9982.0	/ sakku0(24)	/ 2. 35 /
saktu0(25)	/ 2670.0 /	sakcu0(25)	/ 566.0 /	sakdu0(25)	/ 9912.0	/ sakku0(25)	/ 2. 45 /
saktu0(26)	/ 2673.0 /	sakcu0(26)	/ 568.0 /	sakdu0(26)	/ 9912.0	/ sakku0(26)	/ 2. 45 /
saktu0(27)	/ 2773.0 /	sakcu0(27)	/ 612.0 /	sakdu0(27)	/ 9839.0	/ sakku0(27)	/ 2. 56 /
saktu0(28)	/ 2873.0 /	sakcu0(28)	/ 660.0 /	sakdu0(28)	/ 9762.0	/ sakku0(28)	/ 2. 68 /
saktu0(29)	/ 2973.0 /	sakcu0(29)	/ 711.0 /	sakdu0(29)	/ 9681.0	/ sakku0(29)	/ 2. 80 /
saktu0(30)	/ 3073.0 /	sakcu0(30)	/ 766.0 /	sakdu0(30)	/ 9596.0	/ sakku0(30)	/ 2. 93 /
saktu0(31)	/ 3074.0 /	sakcu0(31)	/ 4960.0	/ sakdı	ıO(31) /	9596.0 / sakku	0(31) / 2.93
saktu0(32)	/ 3122.0 /	sakcu0(32)	/ 4960.0	/ sakdı	ıO(32) /	9555.0 / sakku	0(32) / 2.99
saktu0(33)	/ 3123.0 /	sakcu0(33)	/ 792.0 /	sakdu0(33)	/ 9555.0	/ sakku0(33)	/ 2. 99 /
saktu0(34)	/ 3200.0 /	sakcu0(34)	/ 792.0 /	sakdu0(34)	/ 9555.0	/ sakku0(34)	/ 3. 0 /
saktu0(35)	/ 3400.0 /	sakcu0(35)	/ 792.0 /	sakdu0(35)	/ 9555.0	/ sakku0(35)	/ 3.00 /

7.2 Свойства Zr

Температура Zr		Теплоемкость Zr			Плотность	Zr T	Теплопроводность Zr	
saktzr(1)	/ 300.0 /	sakczr(1)	/ 286.0 /	sakdzrtab(1)	/ 6550.0	sakkzr(1)	/ 19.3 /	
saktzr(2)	/ 400.0 /	sakczr(2)	/ 302.0 /	sakdzrtab(2)	/ 6550.0	sakkzr(2)	/ 18.5 /	
saktzr(3)	/ 500.0 /	sakczr(3)	/ 318.0 /	sakdzrtab(3)	/ 6550.0	sakkzr(3)	/ 18.1 /	

АО ИТЦ «	«ДЖЭТ»	Програм	Номер редакции 1.0				
saktzr(4)	/ 600.0 /	sakczr(4) / 333.0	/ sakdzrtab(4)	/ 6550.0	sakkzr(4)	/ 18.0 /	
saktzr(5)	/ 700.0 /	sakczr(5) / 349.0	/ sakdzrtab(5)	/ 6550.0	sakkzr(5)	/ 18.3/	
saktzr(6)	/ 800.0 /	sakczr(6) / 365.0	/ sakdzrtab(6)	/ 6550.0	sakkzr(6)	/ 18.9 /	
saktzr(7)	/ 900.0 /	sakczr(7) / 381.0	/ sakdzrtab(7)	/ 6550.0	sakkzr(7)	/ 19.8 /	
saktzr(8)	/ 1000.0 /	/ sakczr(8) / 397.0	/ sakdzrtab(8)	/ 6350.0	sakkzr(8)	/ 21.1 /	
saktzr(9)	/ 1100.0 /	/ sakczr(9) / 413.0	/ sakdzrtab(9)	/ 6321.0	sakkzr(9)	/ 22.7 /	
saktzr(10)	/ 1200.0	/sakczr(10) / 360.	0 / sakdzrtab(10)	/ 6293.0	sakkzr(10)	/ 25.5 /	
saktzr(11)	/ 1300.0	/ sakczr(11)	/ 367.0 / sakdzrt	ab(11) / 62	64.0 sakkz	zr(11) / 27	.5 /
saktzr(12)	/ 1400.0	/ sakczr(12)	/ 374.0/ sakdzrt	ab(12) / 62	.36.0 sakkz	zr(12) / 29	.5 /
saktzr(13)	/ 1500.0	// sakczr(13)	/ 380.0/ sakdzrt	ab(13) / 62	07.0 sakkz	zr(13) / 31	.5 /
saktzr(14)	/ 1600.0	// sakczr(14)	/ 286.0/ sakdzrt	ab(14) / 61	78.0 sakkz	zr(14) / 33	.5/
saktzr(15)	/ 2100.0	// sakczr(15)	/ 420.0/ sakdzrt	ab(15) / 60	35.0 sakkz	zr(15) / 35	.5 /
saktzr(16)	/ 2133.0	/ sakczr(16)	/ 4220.0/	sakdzrtab(16)	/ 6110.0	sakkzr(16)	/ 35.5
/				. ,			
saktzr(17)	/ 2138.0	// sakczr(17)	/ 4220.0/	sakdzrtab(17)	/ 6110.0	sakkzr(17)	/ 35.5
/		× /		、			
saktzr(18)	/ 2140.0	// sakczr(18)	/ 700.0/ sakdzrt	ab(18) / 60	35.0 sakkz	zr(18) / 35	.5 /
saktzr(19)	/ 2200.0	/ sakczr(19)	/ 600.0/ sakdzrt	ab(19) / 60	35.0 sakkz	zr(19) / 35	.5 /
saktzr(20)	/ 2300.0	/ sakczr(20)	/ 600.0/ sakdzrt	ab(20) / 60	35.0 sakkz	zr(20) / 35	.5 /

7.3 Свойства стали

Температур	а стали	Теплоемкос	ть стали	Плотно	ость ста	али	Ter	плопровод	ность стали
coltat(1)	/ 200 0 /	calcost (1)	/ 502 0 /	aakdat ((1)	7054.0	coldet (1)	/ 14.0	
sakisi(1)	/ 300.0 /	sakest (1)	/ 302.0/	sakust ((1) /	7934.0	Sakkst (1)	/ 14.0	
saktst(2)	/ 400.0 /	sakcst (2)	/ 516.0 /	sakdst ((2)	/909.0	sakkst (2)	/ 15.5	
saktst(3)	/ 500.0 /	sakcst (3)	/ 529.0 /	sakdst ((3)	7864.0	sakkst (3)	/ 17.1	
saktst(4)	/ 600.0 /	sakcst (4)	/ 542.0 /	sakdst ((4)	7817.0	sakkst (4)	/ 18.7	
saktst(5)	/ 700.0 /	sakcst (5)	/ 556.0 /	sakdst ((5)	7770.0	sakkst (5)	/ 20.2	
saktst(6)	/ 800.0 /	sakcst (6)	/ 569.0 /	sakdst ((6)	7722.0	sakkst (6)	/ 21.8	
saktst(7)	/ 900.0 /	sakcst (7)	/ 583.0 /	sakdst ((7)	7674.0	sakkst (7)	/ 23.4	
saktst(8)	/ 1000.0 /	sakcst (8)	/ 596.0 /	sakdst ((8)	7574.0	sakkst (8)	/ 23.4	
saktst(9)	/ 1100.0 /	sakcst (9)	/ 609.0 /	sakdst ((9)	7523.0	sakkst (9)	/ 26.5	
saktst(10)	/ 1200.0 /	sakcst (10)	/ 623.0 /	' sakdst ((10)	/ 7523.0	sakkst (10)	/ 28.1	
saktst(11)	/ 1300.0 /	sakcst (11)	/ 636.0 /	′ sakdst ((11)	/ 7471.0	sakkst (11)	/ 29.7	
saktst(12)	/ 1400.0 /	sakcst (12)	/ 650.0 /	′ sakdst ((12)	/ 7365.0	sakkst (12)	/ 31.2	
saktst(13)	/ 1500.0 /	sakcst (13)	/ 663.0 /	′ sakdst ((13)	/ 7365.0	sakkst (13)	/ 32.8	
saktst(14)	/ 1600.0 /	sakcst (14)	/ 676.0 /	′ sakdst ((14)	/ 7311.0	sakkst (14)	/ 34.4	
saktst(15)	/ 1740.0 /	sakcst (15)	/ 690.0 /	′ sakdst ((15)	/ 7256.0	sakkst (15)	/ 35.9	
saktst(16)	/ 1743.0 /	sakcst (16)	/ 5526.0	/	sakdst	(16)	/ 7256.0 sak	kst (16)	/ 35.9
saktst(17)	/ 1781.0 /	sakcst (17)	/ 5526.0	/	sakdst	(17)	/ 7457.0 sak	kst (17)	/ 37.3
saktst(18)	/ 1784.0 /	sakcst (18)	/ 700.0 /	' sakdst ((18)	/ 7457.0	sakkst (18)	/ 37.3	
saktst(19)	/ 2000.0 /	sakcst (19)	/ 700.0 /	' sakdst ((19)	/ 7457.0	sakkst (19)	/ 37.3	

7.4 Свойства ZrO2

Свойства ZrO2 рассчитываютя по формулам:

Плотность

5852.0-0.1440*Т, если T<1472 К -30727.0+24.706*Т, если 1472 К< T <1489 К 6414.-0.2379*Т, если 1489 К< T <2977 К -32349.+12.783*t, если 2977 К< T <3000 К
6000, если T > 3000 K

Теплоемкость 604, если T <2960 К 36600, если 2960 К< T <2970 К 812, если T >2970 К Теплопроводность 1.2

8 Модуль s.ssazrc (паро-циркониевая реакция)

При температуре свыше 1000 К начинает играть важную роль процесс окисления циркониевой оболочки твэл. Эта экзотермическая реакция

Zr + 2H2O = ZrO2 + 2H2 + QZr

приводит к дополнительному выделению тепла в зоне реакции и к генерации водорода. Рост температуры оболочки, связанный с выделением тепла вызывает увеличение скорости окисления циркония. Факторами, сдерживающим развитие паро-циркониевой реакции являются дефицит водяного пара и затрудненность доступа окислителя (водяного пара) к поверхности циркония вследствие образования слоя двуокиси циркония и образования «водородной рубашки».

При выполнении расчетов паро-циркониевой реакции решается интегральное параболическое уравнение для кинетики реакции окисления циркония, с учетом скорости диффузии кислорода через увеличивающийся слой двуокиси циркония, без расчета профиля концентраций кислорода по трем зонам;

Учет скорости диффузии приводит к параболическому закону для кинетики реакции окисления циркония:

 $dX^2/d\tau = K$

где Х – толщина слоя или полная масса кислорода, вступившего в реакцию с цирконием.

Зависимость кинетической константы К от температуры описывается уравнением Аррениуса

 $K = A e^{-B/RT}$

где Т – температура металлического компонента.

Для определения константы К используются данные

Cathcart-Pawel

A = $36.22 $	B = 167200 дж/моль	
Urbanic-Heidrick		
$A = 3.64 \mathrm{kr} 2/\mathrm{c}/\mathrm{M}4;$	B = 140000 дж/моль	если T<1853 К
A = $10.82 $	B = 138200 дж/моль	если T>1853 K
Prater-Courtright		
A = $36.22 $	B = 167200 дж/моль	если T<1753 К
$A = 32.94 \ \kappa \Gamma 2/c/m4;$	B = 220000 дж/моль	если T>1753 К

Газовая постоянная R = 8.314 дж/моль/град

Для численного решения уравнение кинетики интегрируется следующим образом:

 $X(\tau + \Delta \tau) = (X^2(\tau) + K^* \Delta \tau) 0.5$

где Δτ - шаг по времени;

Т – температура в начале шага;

К – константа в уравнении кинетики;

Х – полная масса кислорода (на единицу поверхности), вступившего в реакцию окисления.

Изменение массы прореагировавшего циркония определяется через массу кислорода, вступившего на данном шаге в реакцию:

 $\Delta MZr = \Delta MO_2 * A * m_Z r/m_{O2}$

где $\Delta M_{O2} = (M_{O2})^{n+1} - (M_{O2})^n$

m_{Zr} = 91,22 – молекулярный вес циркония;

m_{O2} = 32 – молекулярный вес кислорода;

А – поверхность, на которой осуществляется реакция. Для кориума принимается, что эта поверхность пропорциональна объемной доле циркониевого компонента в слое кориума.

Соответственно общая масса циркониевого компонента уменьшается

 $(\mathbf{M}_{\mathbf{Z}\mathbf{r}})^{\mathbf{n}+1} = (\mathbf{M}_{\mathbf{Z}\mathbf{r}})^{\mathbf{n}} - \Delta \mathbf{M}_{\mathbf{Z}\mathbf{r}}$

а общая масса двуокиси циркония увеличивается

 $(M_{ZrO2})^{n+1} = (M_{ZrO2})^n + \Delta M_{Zr}^* m_{ZrO2} / m_{Zr}$

m_{ZrO2} = 123,22 – молекулярный вес двуокиси циркония.

Расход генерируемого при реакции водорода определяется по соотношению (интерфейсная величина, передаваемая в систему th)

 $G_{H2} = (\Delta M_{Zr}/\Delta \tau)^* (2^* m_{H2}/m_{Zr})$

m_{H2} = 2 – молекулярный вес водорода.

Тепловой эффект паро-циркониевой реакции определяется по соотношению

$Q_{Zr} = q_{Zr} * \Delta M_{Zr} / \Delta \tau$

q_{Zr} = 6.25e6 – тепловой эффект паро-циркониевой реакции.

9 Модуль s.ssatrea (определение температуры твердых стенок с применением энтальпийного подхода)

Расчет реальной (физической) температуры производится в модуле **s.ssatrea**. Каждый из компонентов, входящих в состав кориума, имеет свою теплоту и температуру плавления. Для того, чтобы учесть поглощение тепла при плавлении каждого компонента и выделение тепла при затвердевании, наряду с реальной (физической) температурой, которую имеет слой материалов активной зоны, рассматривается балансная температура, которая определяется по балансу тепла для данного слоя материалов и меняется пропорционально энтальпии. Реальная температура совпадает с балансной до тех пор, пока балансная температура меньше температуры плавления.

По мере разогрева твэл, вследствие превышения тепловыделения в твэле над теплоотводом в теплоноситель, и достижения температур плавления каждого компонента рост физической температуры данного компонента прекращается, а энтальпия компонента продолжает возрастать пока не будет получено количество тепла, необходимое для полного расплавления этого компонента. Для сохранения расчетного алгоритма в модели вводятся температуры начала и конца плавления (T_{solidus} и T_{liquidus}). Они различаются на несколько градусов, при этом теплоемкость компонента в интервале T_{solidus} < T < T_{liquidus} резко возрастает и составляет величину Q^{плав}_i/(T_{liquidus} - T_{solidus}), где Q^{плав}_i - теплота плавления. Теплофизические свойства компонентов определяются как функции температуры.

10 Модуль s.ssafipr (выход продуктов деления)

При анализе выхода продуктов деления из под оболочки твэл при их разгерметизации используется покассетный подход. В процессе разогрева твэла, при достижении максимальной по высоте температуры оболочки для данной кассеты satmax(i) температурного критерия разгерметизации (1073 °K, по данным ОКБ «Гидропресс») производится присвоение sa:fptvs(i)=.true. (i = 1/saknr) и начинается определение выхода продуктов деления, находящихся в газовом зазоре твэла и в трещинах в топливе.

В модели рассматривается вынос трех основных продуктов деления из газового зазора твэла: Xe¹³⁵, Kr⁸⁸, I¹³³ по соотношению

$$dX_i/dt = -f_iX_i$$

где - X_i – текущее количество изотопа, f_i – коэффициент скорости выноса изотопа, определяемый по модели SASHA.

Решение этого уравнения имеет вид

 $X_i^{n+1} = X_i^n * \exp(-f_i * \Delta t)$

 $\Delta X_i = X_i{}^{n+1}$ - $X_i{}^n$ масса, выносимая на шаге

Коэффициент при экспоненте f_i (**safi**) определяется в соответствии с моделью SASHA, как fi = X_j / 100, где X_j для каждого продукта деления определяется как функция от максимальной температуры в данной TBC (satmax(i)):

Таблица 2 – Коэффициенты модели

Т	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
Xe	0.02	0.045	0.4	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Kr	0.02	0.045	0.4	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Ι	0.02	0.045	0.4	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

При этом соответствии с этой моделью при достижении температуры оболочки значения, при котором начинается разгерметизация, происходит одномоментный вынос небольшой части продуктов деления, сосредоточенных в газовом зазоре. При этом выносится: I – 1.7%, Xe –3%, Kr – 3%, от начального их количества в топливе.

11 Моделирование процессов в устройстве локализации расплава на внекорпусной стадии тяжелой аварии (модуль s.ssalov)

После проплавления (разрушения) корпуса реактора начинается внекорпусная стадия тяжелой аварии. Расплав через центральное отверстие плиты нижней начинает перетекать из корпуса реактора в УЛР. Для АЭС Руппур (Бангладеш), НВАЭС-2 устройство локализации расплава имеет вид



Рисунок 5 – Устройство локализации расплава (УЛР)

В модуле s.ssalov моделируются процессы подачи воды, заполнения расплавом, взаимодействия расплава с жертвенным материалом и двойным стальным корпусом УЛР, стратификации расплава, взаимодействия расплава с бетоном, входящим в состав некоторых слоев жертвенного материала, с выделением водяного пара и водорода, теплообмена в УЛР. Основной задачей такого моделирования является определение временных характеристик процессов, протекающих в устройстве локализации, определение температур расплава, конструкционных материалов УЛР и воды, подаваемой в УЛР, а также отработка мероприятий по управлению тяжелой аварией (подача воды на расплав и др.).

Моделирование процессов теплообмена в УЛР осуществляется в рамках двумерного осесимметричного подхода. Расчетная схема УЛР приведена на Рисунок 6 –. По высоте двойной корпус УЛР с жертвенным материалом разбивается на пять слоев, в соответствии со структурой расположения блоков жертвенных материалов и свободного пространства. УЛР заполняется расплавом снизу вверх в свободных объемах и каналах кладки блоков. По мере заполнения УЛР

б/н

АО ИТЦ «ДЖЭТ»	Программное обеспечение ММ ВВЭР -1000 Руководство пользователя	Номер редакции 1.0
---------------	---	--------------------

происходит взаимодействие расплава с блоками жертвенного материала, в результате чего происходит постепенное выравнивание их температур. В модели растворение жертвенного материала в расплаве рассматривается как результат теплового взаимодействия и выравнивания температур. Предполагается, что после выравнивания температур в расплаве и жертвенном материале, которое предполагается при выполнении условия:

| satlovef(16+i)<(satlovef(11+i)+100.) |

или

| satlovef(16+i)<(satlovef(11+i))+200.) | μ satlovef(11+i)> satlj(3) i = 1/5

происходит объединение масс расплава и жертвенного материала в соответствующем слое и переход от эвтектики расплава к эвтектике расплава и жертвенного материала при определении свойств слоя. При этом осуществляется генерация признака sa:levmelt(i)=.true.

- В расчетную схему УЛР (Рисунок 6 –) включены следующие компоненты:
- днище корпуса реактора (T1),
- плита нижняя со слоистой структурой (теплоизоляция, подложка, бетон, сталь) (Т2-Т5),
- бетонная консоль с тепловой изоляцией (Т7-Т9),
- пять слоев по высоте, заполненных первоначально воздухом, а затем, по мере натекания расплавом, вытекшим в УЛР (Т12-Т16), нумерация слоев здесь и далее идет сверху вниз – 1-й слой вверху, 5-й слой внизу,
- пять уровней блоков четырехкомпонентного жертвенного материала (БГК, ЦКС, ПОЖА, сталь), расположенного в корпусе УЛР (Т17-Т21), нижний уровень дополнительно включает пятый компонент бетон,
- пять аксиальных расчетных ячеек двойного стального корпуса УЛР с теплоизоляцией ГОЖА между внутренним и наружным корпусом (внутренний корпус T41-T45, теплоизоляция ГОЖА T46-T50, наружный корпус T51-T55),
- находящиеся вокруг корпуса УЛР теплообменники с водой, поступающей из бакаприямка (в процессе нормальной эксплуатации вода в теплообменнике отсутствует) (T24),
- бетонные стены (Т25-Т27),
- слой воды на поверхности расплава (T11), который может появиться в результате подачи воды в рамках управления аварией,
- воздушные объемы (Т6, Т10).

Расчетная схема УЛР



Рисунок 6 – Расчетная схема УЛР

Параметры в объеме 10 и слое воды 11 рассчитываются в рамках модели герметичных помещений (модель CH) и через интерфейс передаются в модель SA:

- давление в объеме 10 между реактором и УЛР chpvol_1(nvolch),
- температура паровоздушной смеси T10 chtvgvol_1(nvolch), где nvolch номер объема между реактором и УЛР в модели CH,
- температура воды на поверхности расплава T11 chtlvolne_1(nvolch),
- масса воды на поверхности расплава М11 chmlvolne_1(nvolch).

При первом вызове модуля s.ssalov происходит инициализация необходимых исходных данных:

- saxmetbet(1/55) – индекс расчетной структуры, характеризующий материал:

- 1 сталь,
- 2 тепловая изоляция, бетон
- **-** 3 вода,
- 4 воздух,
- 5 расплав,

6 – жертвенный материал

- sahktolov(1/55) – коэффициент теплопередачи для расчета тепловых потоков,

- saxdel(1/14) – константы для вычисления коэффициентов теплообмена с внутренней и наружной стенками двойного стального корпуса УЛР,

- saalov(1/55) – поверхность теплообмена для расчета тепловых потоков,

- samlov(1/55) – начальные значения масс,

- sacplov(1/55) – теплоемкость структуры.

Полные массы компонентов расплава, находящихся в реакторе на момент его проплавления, которые поступят в УЛР за время истечения расплава.

- samfelov – масса стали,

- samuo2lov = samuo2core масса топлива в активной зоне (исходная)
- samzrlov = samzrcore-safh2core(20)*22.8 масса циркония,
- samzrcore -масса циркония в активной зоне (исходная),
- safh2core(20) интегральная наработка водорода перед разрушением корпуса,
- 22.8 = M_{Zr} / $2M_{H2}$ стехиометрический коэффициент,
- samzro2lov = safh2core(20)*30.75 масса двуокиси циркония

- $30.75 = M_{ZrO2} / 2M_{H2} -$ стехиометрический коэффициент.

Принимается, что расплав, попадающий в УЛР, имеет среднюю температуру (satcorium) и среднюю теплоемкость (saccorium) находящегося в реакторе расплава (как эвтектики четырех компонентов).

Суммарная масса расплава, попадающего в УЛР:

samcorium0 = samfelov+samuo2lov+samzrlov+samzro2lov

11.2 Истечение расплава

Поскольку существует неопределенность по определению расхода истекающего (или вываливающегося) **расплава**, задается временной интервал, в течение которого происходит вытекание основной массы расплава в УЛР. Кроме того, на основе расчетных данных, приведенных в отчете по обоснованию безопасности, выполняется качественное профилирование расхода – большая часть расплава вытекает на первой короткой фазе истечения вследствие нивелирной составляющей в объеме расплава в реакторе (между уровнем расплава и местом истечения расплава из корпуса), а оставшаяся часть расплава вытекает на второй длительной фазе истечения.

При расчете внутрикорпусной стадии аварии (модуль **s.ssatemp**) предполагается, что в расплаве, находящемся на днище корпуса реактора, происходит стратификация, при которой в верхней части расплава располагается более легкий слой металлов. Поэтому, на внекорпусной стадии тяжелой аварии в первой фазе истечения расплава из корпуса реактора вытекает преимущественно сталь. Это обусловлено тем фактом, что сечение, в котором достигается проплавление корпуса, расположено в районе сварного шва в нижней части металлического слоя расплава, находящегося в корпусе реактора. После снижения уровня расплава до места проплавления начинают поступать в УЛР все компоненты расплава.

В модуле s.ssabef(1/13) в соответствии с данными ПООБ соответствующего энергоблока задаётся время sacdtimefull и коэффициенты sacdtimekf и sacdflow для расчета расхода истекающего расплава:

Проекты СПбАЭП (ЛАЭС2, Белорусская АЭС):

б/н

АО ИТЦ «ДЖЭТ»	Программное обеспечение ММ ВВЭР -1000 Руководство пользователя	Номер редакции 1.0
---------------	---	--------------------

sacdtimefull - время истечения основной части	расплава в УЛР	(3600 c)
sacdtimekf(1) = 0.0555	sacdflow(1) = 200.0	
sacdtimekf(2) = 0.5	sacdflow(2) = 8.33	
sacdtimekf(3) = 0.1111	sacdflow (3)= 267.5	
sacdtimekf(4) = 0.0555	sacdflow (4)=105.0	
sacdtimekf(5) = 0.1667	sacdflow(5) = 45.0	
sacdtimekf(6) = 0.1111	sacdflow (6)= 8.75	

Проекты МоАЭП (НВАЭС2, Руппур):

sacdtimefull - время истечения основи	ной части расплава в УЛР	(4200 c)
sacdtimekf $(1) = 0.0476$	sacdflow(1) = 165.0	
sacdtimekf(2) = 0.429	sacdflow(2) = 3.889	
sacdtimekf(3) = 0.0952	sacdflow(3) = 0.001	
sacdtimekf(4) = 0.0476	sacdflow(4) = 225.0	
sacdtimekf(5) = 0.1426	sacdflow(5) = 153.3	
sacdtimekf(6) = 0.238	sacdflow(6) = 39.0	

Расход истекающего расплава **safmelt** определяется в модуле **s.ssalov** следующим образом: Интеграл массы расплава, вытекающей из реактора:

```
samcorint = samcorint + safmelt*satdt
```

Если samcorint < samcorium0, см выше, то

```
sacdfast = sacdtimefull/3600.
                                               ! лля ЛАЭС2
sacdfast = sacdtimefull/4200.
                                               ! для АЭС Руппур
sacdtimeksum(1) = 0 + sacdtimekf(1)
sacdtimeksum(2) = sacdtimeksum(1) + sacdtimekf(2)
sacdtimeksum(3) = sacdtimeksum(2) + sacdtimekf(3)
sacdtimeksum(4) = sacdtimeksum(3) + sacdtimekf(4)
sacdtimeksum(5) = sacdtimeksum(4) + sacdtimekf(5)
sacdtimeksum(6) = sacdtimeksum(5) + sacdtimekf(6)
\tau = satcurr – текущее время (с момента срабатывания A3)
\tau_{fail} = sataufail – время проплавления корпуса реактора
\tau_1 = sataufail+ sacdtimefull * sacdtimeksum(1)
\tau_2 = sataufail+ sacdtimefull * sacdtimeksum(2)
\tau_{3} = sataufail+ sacdtimefull * sacdtimeksum(3)
\tau_{4} = sataufail+ sacdtimefull * sacdtimeksum(4)
\tau_5 = sataufail+ sacdtimefull * sacdtimeksum(5)
safmelt = sacdflow(1)/sacdfast, если (\tau < \tau_1)
safmelt = sacdflow(2)/sacdfast, если (\tau > \tau_1) и (\tau < \tau_2)
safmelt = sacdflow(3)/sacdfast, если (\tau > \tau_2) и (\tau < \tau_3)
safmelt = sacdflow(4)/sacdfast, если (\tau > \tau_3) и (\tau < \tau_4)
safmelt = sacdflow(5)/sacdfast, если (\tau > \tau_4) и (\tau < \tau_5)
safmelt = sacdflow(6)/sacdfast, если (\tau > \tau_5)
```

АО ИТЦ «ДЖЭТ»	Программное обеспечение ММ ВВЭР -1000 Руководство пользователя	Номер редакции 1.0
---------------	---	--------------------

После истечения из реактора первой порции расплава M_{ctl} (по данным ПООБ ЛАЭС-2 M_{ctl} = 55 тонн, по данным ПООБ АЭС Руппур M_{ctl} = 40 тонн расплавленной стали) оставшаяся в реакторе часть расплава, которая будет продолжать истекать в УЛР из реактора, составит

 $samcorium2 = (samfelov- M_{ct1})+samuo2lov+samzrlov+samzro2lov$

плотность этого расплава составит sarcorium2.

При этом массовые доли четырех компонентов в этой части расплава составят saccorium2(1/4).

Объемы пустот в пяти слоях жертвенного материала, включая центральный свободный объем, перед началом поступления расплава в УЛР составляют savair(1/5).

Массы расплава, заполняющие последовательно свободные объемы в слоях с 1-го по 5-ый составляют samcorlev(1/5). При заполнении свободного объема соответствующего слоя генерируется признак sa:levfull(1/5) = .true.

Энергия стекающего расплава определяется, как sancorium = satcorium*safmelt*saccorium

Массы стали и массы жертвенного материала в пяти слоях жертвенного материала составляют соответственно samst(1/5) и samzm(1/5).

Суммарная масса жертвенного материала samzms = \sum samzm(1/5).

11.3 Вода в теплообменниках УЛР

При протекании аварийного режима, еще до наступления внекорпусной стадии аварии, в случае появления воды в баках-приямках эта вода через свободные коридоры начинает поступать в объем теплообменников УЛР (ТО УЛР), окружающих корпус УЛР. Масса этой воды **samlov(24)** определяется из уравнения баланса массы

samlov(24) = samlov(24) + (safwatto-safwattoout-safstwatup)*satdt

Здесь

safwatto – расход воды поступающей из бака-приямка (определяется в системе CH в соответствии с положением уровней в баке-приямке и в ТО УЛР);

safwattoout – слив воды из ТО УЛР, если уровень воды в ТО достигнет отметки перелива;

safstwatup – расход пара из ТО УЛР, при кипении воды в них:

safstwatup = 0., если (satlov(24).<.satsatto),

safstwatup = $(\sum saqlov(51/55)-saqlov(32))/(sah2wat-sah1wat)$, если (satlov(24).=.satsatto) satlov(24) – температура воды в ТО УЛР,

satsatto - температура насыщения в ТО УЛР при давлении

sapcont = chpvol_1(nvolch)

saqlov(51/55) – тепловые потоки от наружного корпуса УЛР к воде ТО УЛР,

saqlov(32) – тепловой поток от к воды в ТО УЛР к бетонной стенке шахты УЛР,

sah2wat и sah1wat – энтальпии насыщения пара и воды при давлении sapcont.

Температура воды в ТО УЛР satlov(24) определяется по уравнению теплового баланса:

 $satlov(24) = satlov(24) + (\sum saqlov(51/55) - saqlov(32) + safwatto*sahwatto-safstwatup*sah2wat-$

safwattoout*sah1wat)*satdt/(samlov(24)*sacpwat)

Здесь

АО ИТЦ «ДЖЭТ»	Программное обеспечение ММ ВВЭР -1000 Руководство пользователя	Номер редакции 1.0
---------------	---	--------------------

sahwatto – энтальпия воды, поступающей в ТО УЛР из баков-приямков

sacpwat = sacpwat(sapcont) – теплоемкость воды в ТО УЛР.

Уровень в ТО УЛР salevelto, учитываемый в системе СН при определении поступления воды из баков-приямков определяется по массе воды samlov(24) с учетом конфигурации объема ТО УЛР.

При поступлении расплава в УЛР происходит нагрев воды в ТО УЛР и ее кипение в режиме отвода тепла от расплава.

11.4 Коэффициенты теплообмена

Коэффициенты теплообмена (КТО) между наружной стенкой двойного стального корпуса и водой в ТО УЛР.

Для учета изменения режима отвода тепла от наружного корпуса УЛР при нагреве и кипении воды в ТО УЛР используется следующий алгоритм:

Tw = satlov(24) – температура воды в ТО УЛР

Ts = satsatto - температура насыщения в ТО УЛР

КТО к воде при нагреве от вертикальных стенок - saxdel(8) = 500. (задается)

КТО к воде в области недогретого кипения - saxdel(9) = 1000. (задается)

КТО при кипении в большом объеме - saxdel(1) = 6000. (задается)

sahktolov(50+i)= saxdel(8), если Tw < (Ts - 5.0), i = 1/5

sahktolov(50+i) = saxdel(8) + (saxdel(9) - saxdel(8))*(Tw-(Ts-5.))/4.,

если (Tw > (Ts - 5.0)) и (Tw < (Ts - 1.0)), i = 1/5

sahktolov(50+i) = saxdel(9) + (saxdel(10) - saxdel(9))*(Tw-(Ts-1.0)),

если (Tw > (Ts - 1.0)) и (Tw < Ts)), i = 1/4

sahktolov(50+i) = saxdel(9) + (saxdel(10) / 5.))*(Tw- (Ts-1.0)),

если (Tw > (Ts - 1.0)) и (Tw < Ts)), i = 5

sahktolov(50+i)= saxdel(10), если (Tw = Ts), i = 1/4

sahktolov(50+i)= saxdel(10) / 3. если (Tw = Ts), i = 5

Задания значений saxdel(8/10) могут быть изменены или заменены на расчетные соотношения.

При этом мощность остаточного тепловыделения в расплаве превышает суммарную мощность, отводимую от корпуса УЛР, и температуры в слоях расплава и на внутреннем корпусе УЛР растут вплоть до достижения температуры плавления. Температуры на внешнем корпусе УЛР также растут на начальном этапе, пока вода в теплообменнике УЛР не начинает кипеть, после чего отвод тепла к воде ТО УЛР резко увеличивается и температуры внешнего корпуса снижаются. Максимальные температуры внешнего корпуса не превышают 500°К и сохраняется его целостность.

Коэффициенты теплообмена между засыпкой и стенками двойного стального корпуса УЛР определяются по следующему алгоритму.

 $T(\kappa) = \text{satlov}(\kappa), \kappa = 17/21, 41/55$ (Рисунок 6 –).

KTO(j) = sahktolov(j), j = 25/29, 41/50 (Рисунок 6 -).

Tsol = satmeltic(4) - температура начала плавления стали,

КТО от слоев жертвенного материала к внутреннему стальному корпусу

sahktolov(24+i) = 2000., если (sa:levmelt(i)) или (T(40+i)>Tsol), i=1/5

sahktolov(24+i) = 500., если (sa:levmelt(i)=.true.) и (T(40+i) <Tsol), i=1/5

КТО от слоев засыпки к внутреннему и наружному стальным корпусам

sahktolov(40+i)=saxdel(11), если (T(40+i) <Tsol), i=1/5

sahktolov(45+i)=saxdel(11), если (T(40+i) <Tsol), i=1/5

sahktolov(40+i)=saxdel(12), если (T(40+i) >Tsol) и (T(45+i) < 2023.), i=1/5

sahktolov(45+i)=saxdel(11), если (T(40+i) >Tsol) и (T(45+i) < 2023.), i=1/5

sahktolov(40+i)=saxdel(12),

если (T(40+i) >Tsol) и (T(45+i) >2023.) и (T(45+i) <2072.), i=1/5

sahktolov(45+i)=saxdel(13),

если (T(40+i) >Tsol) и (T(45+i) >2023.) и (T(45+i) <2072.), i=1/5

sahktolov(40+i)=saxdel(14), если (T(40+i) >Tsol) и (T(45+i) > 2072.), i=1/5

sahktolov(45+i)=saxdel(14)/2., если (T(40+i) >Tsol) и (T(45+i) > 2072.), i=1/5

Здесь 2023 °К и 2072 °К – температуры начала и завершения деструкции и расплавления засыпки ПОЖА двойного стального корпуса.

Массы расплава, накапливаемые в УЛР по мере заполнения свободных пространств в слоях жертвенных материалов, начиная с нижних слоев обозначаются samcorlev(1/5). Заполнение вышележащего слоя начинается только после заполнения нижележащего слоя. Массы четырех компонентов (UO₂, Zr, ZrO₂, сталь) в каждом слое обозначаются как samjct(1/4), теплоемкости компонентов в функции от температуры - sakc2jc(1/4). Суммарная масса компонентов в каждом из пяти слоев определяется, как sami(i)= \sum samjct(1/4), а теплоемкость эвтектики расплава в слое определяется как

 $sacplov(11+i)=saci(i) = \sum(samjct(j)*sakc2jc(j)) / sami(i)$

По мере взаимного растворения расплава и жертвенного материала уменьшается плотность окисного слоя, в который первоначально входит двуокись урана с высокой плотностью, а затем постепенно подмешивается жертвенный материал с низкой плоностью. В то же время плотность металлического слоя остается практически постоянной. При сочетании фактора полного взаимного растворения расплава и жертвенного материала и фактора снижения плотности окисного слоя ниже плотности слоя металлов происходит инверсия расплава с перемещением окисного слоя в верхние слои расчетной схемы. Соответственно изменяется и распределение остаточного энерговыделения в расплаве.

11.5 Теплообмен между структурами УЛР

Моделируются тепловые потоки:

- к воде в кольцевом теплообменнике,
- к воде в слое воды на поверхности расплава,
- между слоями расплава и жертвенного материала внутри себя и между собой;
- между конструкционными элементами плиты нижней, бетонной консоли, корзины, стенок теплообменника и бетонной стенкой;
- тепловое излучение с поверхности расплава (в случае отсутствия воды).

Теплообмен между твердыми слоями осуществляется за счет теплопроводности, теплоотвод к воде и воздуху рассматривается как конвективный (естественная конвекция), с

учетом режима теплообмена. Теплоотвод с поверхности расплава (при отсутствии на нем воды) осуществляется за счет теплового излучения.

Теплообмен между смежными структурами і и ј определяется как

saqlov(ij) = saalov(ij)*sahktolov(ij)*(satlov(i)-satlov(j))

Учитываются внутренние источники тепла – остаточное тепловыделение (суммарное – sahdecayh, по слоям sahdeci(1/5)) и тепловой эффект паро-циркониевой реакции. При этом предполагается 25%-ное уменьшение остаточного тепловыделения за счет выхода радиоактивных продуктов на внутриреакторной стадии аварии с долей мощности, выделяемой в расплаве оксидов – 90%, а в расплаве металлов – 10%.

11.6 Балансные температуры

Балансные температуры рассчитываются по уравнениям теплового баланса:

$satlovef(i) = satlovef(i) + \sum saqlov(ij) * satdt/samlov(i)/sacplov(i)$

где ∑saqlov(ij) – сумма тепловых потоков, подводимых к структуре і от смежных структур

Физические температуры твердых структур определяются через балансные температуры следующим образом:

 $T_{\Phi} = T_{E}$, если $T_{E} < T_{solidus}$ $T_{\Phi} = T_{melt}$, если ($T_{solidus} < T_{E}$) и ($T_{E} < T_{liqidus}$) $T_{\Phi} = T_{E}$ - q_{melt} / с_{melt}, если ($T_{E} > T_{liqidus}$)

 T_{melt} , q_{melt} , $c_{melt}-$ температура плавления, удельная теплота плавления и теплоемкость при температуре плавления.

Объем между днищем корпуса реактора и поверхностью расплава в УЛР моделируется в системе теплогидравлики защитных помещений (система CH). В рамках управления тяжелой аварией в этот объем на поверхность расплава может подаваться вода по специальным трубопроводам из шахты ревизии, бассейна выдержки или передвижных резервуаров с водой. По существующим положениям начало подачи воды на поверхность расплава должно быть позже момента завершения полного вытекания расплава из реактора.

Тепловые потоки в подреакторный объем передаются от системы СН в рамках интерфейса: chpheat6_1(N_{heat}^{up},1) = sapheat6up (тепло от днища реактора в верхнюю часть объема chpheat6_1(N_{heat}^{dn},1) = sapheat6dn (тепло от расплава в УЛР в нижнюю часть объема

N_{heat}^{up} и N_{heat}^{dn} – номера соответствующих нагревателей в системе CH.

sapheat6up = 0.0,

j.

если нет теплоотвода от расплава на днище реактора к днищу (sa:failcore = .false.)

sapheat6up = saqsn,

если расплав лежит на днище реактора и разрушения корпуса не произошло,

saqsn = saqwat1 + saq(41,2) + saq(54,2) + saq(67,2) + saq(80,2) + saq(93,2) + saq(106,2) + saq

saq(119,2)+saq(132,2)+saq(145,2saq(158,2)+saq(171,2)+saq(184,2)+saq(197,2)+

saq(207,2)+saq(217,2)+saq(227,2), saqwat1 – тепловой поток от днища реактора,

```
sapheat6up = saglov(12)-saglov(15)-saglov(40)-saglov(10)-saglov(35),
                                                                                   если
       разрушение корпуса произошло.
       sapheat6dn = saqdown
       salvolch = chlvolne 1(nvolch)
      saqdown = saqlov(11),
                                                                     если salvolch > 0.01
       saqdown = saqlov(11)*(salvolch/0.01) + saqlov(12)*(0.01-salvolch)/0.01
                                                                     если 0.0 < salvolch < 0.01
      saqdown = saqlov(12),
                                                                     если salvolch = 0.0
       saqlov(11) = saalov(11)*sahktolov(11)*(satlov(12)-satlov(11)), если samlov(11) > 280.0
      saglov(11) = 0.0,
                                                                     если samlov(11) < 280.0
      saqlov(12) = 0.0,
                           если samlov(11) > 280.0
       saqlov(12)=saalov(12)*sahktolov(12)/31.*(satlov(16)-satlov(10)),
                            если (samlov(11) < 280.0) и (sa:levfull(5)=.true.) и (sa:levfull(4)=.false.)
      saqlov(12)=saalov(12)*sahktolov(12)/31.*(satlov(15)-satlov(10)),
                            если (samlov(11) < 280.0) и (sa:levfull(4)=.true.) и (sa:levfull(3)=.false.)
      saqlov(12)=saalov(12)*sahktolov(12)/31.*(satlov(14)-satlov(10)),
                            если (samlov(11) < 280.0) и (sa:levfull(3)=.true.) и (sa:levfull(2)=.false.)
      saqlov(12)=saalov(12)*sahktolov(12)/10.*(satlov(13)-satlov(10)),
                           если (samlov(11) < 280.0) и (sa:levfull(2)=.true.) и (sa:levfull(1)=.false.)
      saqlov(12)=saalov(12)*sahktolov(12)/6.*(satlov(12)-satlov(10)),
                           если (samlov(11) < 280.0) и (sa:levfull(1)=.true.)
       Здесь предполагается, что если уровень воды в объеме chlvolne_1(nvolch) меньше 0,01 м
(что соответствует массе воды 280 кг), то тепло от расплава в УЛР передается в системе СН к
```

паровоздушному объему (nvolch), а, если больше 0,01 м – то тепло передается к массе воды под уровнем в объеме nvolch - chmlvolne_1(nvolch). При этом предполагается линейный переход от saqlov(11) к saqlov(12) по мере изменения chlvolne 1(nvolch) от 0,01 м до 0.

КТО к воде - sahktolov(11), КТО к пару-воздушной смеси - sahktolov(12).

При появлении воды на поверхности расплава начинается снижение температур сначала в верхнем слое расплава, а затем и в остальных слоях. Суммарная мощность, отводимая от расплава в корпусе УЛР, приходит в соответствие с мощностью остаточного тепловыделения.

11.7 Выделение водорода из УЛР

В состав компонентов нижнего (5-го) слоя жертвенного материала дополнительно входит бетон. Его масса в проекте АЭС Руппур составляет 8485 кг. Среднее процентное содержание механически и химически связанной воды в бетоне составляет 8%, что соответствует 0.08*8485=675 кг.

При взаимодействии жертвенного материала с расплавом в УЛР происходит разогрев жертвенного материала (всех его компонентов, в том числе и бетона). При достижении в зоне контакта температур механического и химического связывания воды в бетоне происходит ее высвобождение. По мере прогрева жертвенного материала зона контакта продвигается вглубь слоя жертвенного материала и происходит постепенный выход связанной в бетоне воды в виде пара. После разрушения всей массы бетона, находящегося в слое жертвенного материала, выход воды и, соответственно, пара прекращается. Водяной пар, проходя через металлические слои расплава, может вступать в паро-циркониевую реакцию с выделением определенного количества тепла и водорода.

Максимально при вступлении 675 кг водяного пара в паро-циркониевую реакцию

$Zr + 2H_2O = ZrO_2 + 2H_2 + Q\uparrow$

может выделиться (4/36)*675 = 75 кг водорода.

Учитывая сложный характер процесса заполнения УЛР расплавом (сначала в УЛР поступает сталь, затем начинается поступление остальных компонентов, затем после растворения жертвенного материала в расплаве происходит стратификация и инверсия расплава), необходимо вводить некий коэффициент неполноты реакции. Предполагается, что в реакцию вступает 60% высвобождаемой из бетона воды. В этом случае максимальный выход водорода составит 45 кг.

При учете расхода образующегося водорода **safh2lov** использовалась аппроксимация расхода водорода в соответствии с данными отчета по обоснованию безопасности:

 τ = satcurr – текущее время (с момента срабатывания АЗ)

 τ_{fail} = sataufail – время проплавления корпуса реактора

safh2lov =kf0, если ($\tau < (\tau_{fail} + sacdtimefull*sacdtimeksum(4))$ или ($\tau > (\tau_{fail} + 108000)$)

safh2lov =0.0075, если (τ_{fail} + sacdtimefull*sacdtimeksum(4)) < τ < (τ_{fail} + sacdtimefull) safh2lov =0.000315, если (τ_{fail} + sacdtimefull)< τ <(τ_{fail} + 108000)

Значения sacdtimefull, sacdtimeksum(4) приведены в разделе 12.1.

Интегральный выход водорода из УЛР составляет

samh2lov = samh2lov + safh2lov*satdt

В итоге samh2lov = 45 кг водорода

12 Модель взаимодействия расплава с бетоном (модуль s.ssagoco)

После разрушения корпуса реактора начинается внекорпусная стадия тяжелой аварии. Для анализа этой стадии разработаны две модели: модель взаимодействия расплава с бетоном – для старых энергоблоков и модель теплообмена в устройстве локализации расплава (УЛР) – для энергоблоков нового поколения.

В первом случае расплав попадает на основание цилиндрической бетонной шахты, в которой расположен реактор. Расчетная схема этой модели приведена на Рисунок 7 –.

Вытекание расплава из корпуса реактора происходит в течение некоторого времени (по умолчанию предполагается - в течение 30 минут). На этой стадии (Рисунок 7 –а) выделяются три расчетных слоя (2, 7, 8):

- слой 7 это первая порция расплава, попавшая на бетонное основание в момент разгерметизации корпуса. Толщина этого слоя остается постоянной;
- слой 2 это накапливающийся расплав, вытекающий из корпуса. Масса компонентов в этом слое и его толщина постоянно возрастают;
- слой 8 верхний тонкий слой бетона;
- между слоями 7 и 8 расположен нерасчетный слой металлической облицовки. Он не входит в расчетную схему для определения температур, но его термическое сопротивление учитывается при расчете теплообмена между расплавом (слой 7) и бетоном (слой 8). Этот слой допускает тепловое взаимодействие между расплавом и бетоном, но непосредственного контакта, деструкции бетона и химических реакций на этом этапе нет. Предполагается, что за время вытекания расплава произойдет проплавление металлической облицовки.

После полного вытекания расплава постулируется его стратификация на два слоя, (Рисунок 7 –б). Внизу располагается слой тяжелых окислов (UO₂), вверху располагается слой металлов и легких окислов. Нижний слой (UO₂) имеет низкую теплопроводность и внутренний источник тепла – остаточное энерговыделение. Верхний слои (металлы) имеет высокую теплопроводность, внутренние источники тепла отсутствуют, но учитывается поверхностное тепловыделение за счет теплового эффекта химических реакций. В каждом из этих слоев выделяется по три расчетных слоя (5-7 и 2-4). При этом на центральные слои – ядро – отводится большая часть слоя (90% по умолчанию), а граничные слои делаются тонкими. Это делается для того, чтобы более точно смоделировать теплообмен между верхним и нижним слоями расплава и теплообмен на нижней и верхней границах расплава, что позволяет моделировать образование твердых корок на границах.

Для моделирования всего процесса внекорпусной стадии тяжелой аварии, связанной со взаимодействием расплава с бетоном, кроме слоев расплава (2-7), в расчетной схеме выделяются еще два слоя: слой бетона в зоне абляции (8) и слой воды, в случае ее подачи на поверхность расплава (1) (Рисунок 7 –в). При этом моделируются аспекты аварии, наиболее важные для этой стадии.

Также как в случае расплава в нижней камере реактора, расплав представляется как эвтектика из всех, входящих в него компонентов (с учетом стратификации). Свойства каждого компонента определяются как функция температуры по таблицам свойств.

Температуры в слоях расплава *Т*_i определяются из уравнений теплового баланса:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \left(\sum Q_{ij} + Q_{source} + Q_{chem}\right) \Delta \tau / (CM)_i$$

где

Q_{ij} – тепловые потоки через границы слоя расплава за счет теплопроводности, с учетом фазового состояния слоя (жидкое или твердое);

Q_{source} – внутренние источники (остаточное тепловыделение);

Q_{chem} – тепловой эффект химических реакций;

(CM)_і сумма массовых теплоемкостей компонентов, входящих в состав слоя.

Рассматриваются несколько составов бетонов, используемых при строительстве АЭС: базальтовый, строительный, известковый, серпентинитовый, силикатный.

Для каждого из бетонов задается химический состав – процентное содержание компонентов: SiO₂, TiO₂, MgO, MnO, CaO, Na₂O, K₂O, Fe₂O₃, Al₂O₃, Cr₂O₃, CO₂, H₂O_{evap}, H₂O_{chem}. Задаются также теплофизические свойства бетонов:

- энтальпии и теплоемкости, как функции температуры;
- температуры солидус и ликвидус,
- температура разложения бетона;
- энтальпии разложения бетона, отражающие суммарные затраты энергии на нагрев, разложение и плавление бетона.

При термическом воздействии на бетон учитываются наиболее важные процессы:

- испарение физически связанной воды при температуре 380-420 К;
- дегидратация соединений кальция: Ca(OH)₂=CaO+H₂O, при температуре 700-800 К;
- разложение карбонатов кальция: CaCO₃=CaO+CO₂, при температуре 1100-1200 К.
- плавление при температуре 1500-1700 К.

Для каждого из этих процессов определены необходимые затраты энергии.

Моделируется образование и рост размеров каверны (продвижение фронта абляции) в бетоне за счет постепенного разрушения слоев бетона соприкасающихся с поверхностью расплава (зона абляции). Выделяется узкий слой бетона, непосредственно контактирующий с расплавом. При этом для этого слоя рассматриваются три участка: 8, 8а, 8б (Рисунок 7 –в), контактирующие с расплавом по нижней горизонтальной поверхности и по боковой вертикальной поверхности с верхним слоем расплава (металлы) и нижним слоем расплава (тяжелые окислы).

Предполагается, что все тепло от расплава передается этому выделенному слою, а потери тепла в остальной бетон за счет теплопроводности пренебрежимо малы. По мере прогрева бетона происходит выход механически и химически связанной воды. Выделенный слой разрушается, затем расплавляется и его компоненты переходят в состав расплава. Это учитывается в расчетной схеме смещением слоев 8, 8а, и 8б в глубину бетонной стенки в аксиальном и радиальном направлениях на толщину этого слоя и повторением цикла прогрева и разрушения нового слоя абляции. Так моделируется продвижение фронта абляции, что приводит к образованию и расширению каверны в форме, представленной на Рисунок 7 –в.

Водяной пар и двуокись углерода, проходя через слои расплава, вступает в химические реакции. В модели рассматриваются химические реакции, дающие основной вклад в тепловое поведение расплава;

 $Zr + 2H_2O = ZrO_2 + 2H_2 + 7760 + 1.15(T-2000) \ \text{Дж/zZr}$ $Zr + 2CO_2 = ZrO_2 + 2CO + 5900 \ \text{Дж/zZr}$ $2Cr + 3H_2O = Cr_2O_3 + 3H_2 + 3504 + 2.79(T-2000) \ \text{Дж/zZr}$ $2Cr + 3CO_2 = Cr_2O_3 + 3CO + 2800 \ \text{Дж/zCr}$ $Fe + H_2O = FeO + H_2 + 56.7 + 2.24(T-2000)$ Дж/гFe $Fe + CO_2 = FeO + CO + 377 + 0.0271(T-2000)$ Дж/гFe $Zr + SiO_2 = ZrO_2 + Si + 2100$ Дж/гZr $Si + 2H_2O = SiO_2 + 2H_2 + 17300 + 1.15(T-2000)$ Дж/гSi $Si + 2CO_2 = SiO_2 + 2CO + 12300$ Дж/гSi

В модели осуществляется определение расходов и температур газов, выделяющихся в результате химических реакций в объем контайнмента, а также теплового эффекта от этих реакций (рассматриваются H₂, H₂O, CO, CO₂).

Рассчитываются, тепловые потоки с поверхности расплава к атмосфере подреакторного объема и к корпусу реактора. В случае подачи воды на поверхность расплава определяются расход и температура генерируемого пара.



Рисунок 7 – Расчетная схема модели взаимодействия расплава с бетоном

13 База данных

Для каждого проекта необходимо определить или уточнить представленные ниже данные. Приведенные здесь данные, актуальные для проекта с реактором BBЭP-1200 и с моделированием всех кассет активной зоны с разбиением каждой кассеты на 15 аксиальных ячеек.

13.1 Константы

sakpi	/3.14159/ - число π
saksigma	/5.67е-8/- постоянная Стефана-Больцмана
satdt	/0.05/ - шаг расчета

13.2 Количественные параметры

saknr	/163/ - число параллельных каналов (ТВС) в активной зоне
saknz	/15/ - число аксиальных расчетных ячеек в ТВС
sakntvel	/50856/ - общее число твэл
sanhead	/10/ - число расчетных слоев по толщине стенки корпуса реактора
sakncomp	/10/ - максимальное число компонентов расплава

13.3 Параметры для твэл и активной зоны

salcore	/3.73/ - высота тепловыделяющей части активной зоны
saduo2in	/0.0012/ - внутренний диаметр топливной таблетки
saduo2out	/0.0076/ - наружный диаметр топливной таблетки
sadzrin	/0.00773/ - внутренний диаметр оболочки твэл
saaclad/0.007	109/ = 0.0091*3.14159*3.73/15 – боковая поверхность одного твэла одной

ячейки

salradmax /0.006375/ = .01275/2 – половина шага между твэлами (максимально возможный радиус твэла)

saarmax2 /4.0640625e-5/ = (.01275/2)**2 - квадрат максимально возможного радиуса твэла

/4.15/ - свободное проходное сечение активной зоны saacore /7.457/ = 4.15+163*312*3.14159*0.0091**2/4 – полное поперечное сечение saafullcore активной зоны (проходное сечение + сечение всех твэл) samuo2core /87065./ - масса UO₂ в активной зоне /0.458981/ = 87065./(3.73*312*163) - масса UO₂ на одном метре одного твэла samuo2 /8.39079755/ =50856*3.73*3.14159/4*(0.0076**2-0.0012**2) - объем UO2 savfuel samzrcore /22500./ - масса Zr в активной зоне samzr /0.118614/ = 22500./(3.73*312*163) масса Zr на одном метре одного твэла /3.3513e-04/ - масса пленки ZrO₂ на одном метре одного твэла (зона 6) samzro2 1 samzro2_2 /3.35278e-04/ - масса пленки ZrO₂ на одном метре одного твэла (зона 7) /0.001/ масса расплавленного материала, перемещаемого из зоны релокации samreloc одного твэла одной ячейки на одном шаге расчета (для регулирования скорости сползания

расплавленного материала по поверхности твэла)

samzres /0.000354199/ - минимальная масса циркония в зонах 5 или 7, при которой возможна паро-циркониевая реакция

samzores /0.00032114/ - минимальная масса ZrO₂, которая должна оставаться в зоне релокации (зона 7) расчетной ячейки при соскальзывании из этой ячейки расплавленных компонентов

samcrit/0.002/ - минимальная масса расплава в зоне релокации (зона 7) на один твэл в одной ячейке для возможности соскальзывания при температуре плавления

satbreak /2100./ - температура выхода расплавленного циркония из оболочки (зона 5) в зону релокации (зона 7)

sannom /320000000./ - задаваемая номинальная мощность

sakgap /1.0/ - коэффициент для корректировки теплопроводности газового зазора в твэле

13.4 Параметры для корпуса реактора и внутрикорпусных устройств

salhead	/0.1975/ - толщина днища реактора
samgrid1	/3000./ - масса нижней опорной решетки активной зоны
samgrid2	/1000./ - масса перфорированного днища шахты реактора
saalp	/15.5/ - поверхность для расчета паро-циркониевой реакции в нижней камере
saafgr1	/15.5/ - поверхность контакта между расплавом и первым барьером
saawgr1	/16.0/ - поверхность контакта между теплоносителем и первым барьером
saafgr2	/22.0/ - поверхность контакта между расплавом и вторым барьером
saawgr2	/15.5/ - поверхность контакта между теплоносителем и вторым барьером
saafwgr2	/22./ - поверхность контакта между расплавом на втором барьере и
IOCUTATIAN	

теплоносителем

satheadcrit /1144./ - максимальная температура на поверхности корпуса реактора, при которой происходит разгерметизация корпуса

satfail /1700.0/ - температура разрушения (проплавления) первого и второго барьеров

saalfcriz /10.0/ - коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности корпуса реактора

sahfgr1 /200./ - коэффициент теплоотдачи от активной зоны к первому барьеру

sahfgr2 /800./ - коэффициент теплоотдачи от расплава ко второму барьеру

sareal8/10./ - коэффициент увеличения теплоотдачи от нижнего слоя расплава ко второму барьеру при переходе этого слоя в расплавленное состояние

savwgr1 /14.26/ - объем нижней камеры от нижней отметки внутренней поверхности днища реактора до уровня первого барьера (опорной плиты активной зоны)

savwgr2 /8.5/ - объем нижней камеры от нижней отметки внутренней поверхности днища реактора до уровня середины второго барьера (перфорированного днища шахты реактора)

sahwgr11 /10000./ - коэффициент теплоотдачи от первого барьера к воде

sahwgr21 /10000./ - коэффициент теплоотдачи от второго барьера к воде

sahwgr1vg /10./ - коэффициент теплоотдачи от первого барьера к пару

sahwgr2vg /10./ - коэффициент теплоотдачи от второго барьера к пару

sakoefh2 /1.0/ - коэффициент для корректировки расхода водорода из активной зоны

saafg2wup /15./ - поверхность теплообмена между верхним слоем кориума на втором барьере и теплоносителем

saafg2wback /1./ - боковая поверхность теплообмена между кориумом на втором барьере и теплоносителем

АО ИТЦ «ДЖЭТ»	Программное обеспечение ММ ВВЭР -1000 Руководство пользователя	Номер редакции 1.0
sahfwgr21	/10000./ - коэффициент теплоотдачи от кориума на втором (барьере к воде

 sahfwgr2vg
 /1./ - коэффициент теплоотдачи от кориума на втором барьере к пару

 sahfwhel
 /5000./ коэффициент теплоотдачи от кориума на днище к воде

 sahfwhevg
 /10./ - коэффициент теплоотдачи от кориума на днище к пару

 saafwhe
 /30./ - поверхность контакта кориума на днище с теплоносителем

 sahfhe /500./
 - коэффициент теплопередачи от кориума на днище к днищу

savdcmin /0.1/ - минимальный объем воды в реакторе, при котором осуществляется переход к двумерной осесимметричной задаче теплопроводности в нижней камере реактора

saktomelt /10./ - коэффициент увеличения теплообмена между смежными расчетными слоями в двумерной осесимметричной задаче теплопроводности при переходе их в расплавленное состояние

sambetzhm /8485./ - масса бетона в жертвенном материале УЛР

sacporist /200.0/ - коэффициент увеличения поверхности контакта расплава с жертвенным материалом в УЛР за счет внутренних проходок и каналов

14 База данных s.bdsa

cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	200000000000000000000000000000000000000
C Specific heat of solidus	С
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	200000000000000000000000000000000000000
data sacspheat / 481.0,372.0,600.0,5	58.1 /
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	200000000000000000000000000000000000000
C Liquid density	С
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	***************************************
data saddensl / 8200.0,6185.0,5990).0,6940.8 /
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	***************************************
C Solid density	C
000000000000000000000000000000000000000	***************************************
data saddenss / 10376.0,6550.0,580	50.0,7191.0 /
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	***************************************
C Temperature delta of melting (tfusj-tme	eltj) C
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	***************************************
data sahmeltjc / 50.0,5.0,10.0,38.0 /	
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	***************************************
C Liquid condactivity	С
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	***************************************
data sakcondl / 8.577,35.8,1.2,20.0)/
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	***************************************
C solidus condactivity	С
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	***************************************
data sakconds / 3.5,20.1,1.2,38.7 /	
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	
C temperature for fission product release	table C
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	
data sat_fp /1973.0,2073.0,2173.0,2	2273.0,2373.0,2473.0,2573.0,
& 2673.0,2773.0,2873.0,297	3.0,3073.0/
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	
C boiling temperature of components	С
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	
data satboilj / 3973.0,2920.0,3930.0),2700.0 /
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	
C boiling temperature of components	С
data sathoilic / 3973 0 2920 0 3930	xccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
	.0,2700.07
C liquidus temperature of components	C
data satlj / 3123.0,2138.0,2250.	0,1781.0 /
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccc	200000000000000000000000000000000000000

C component's temperature of melting С data satmeltjc /3073.0,2133.0,2953.0,1741.0/ surface for ssatemp model с sas(230,1) с & 23.24,22.78,22.32,21.86,21.40,20.94,20.48,20.02,19.56,19.10,!1-10 & 18.00,17.00,16.00,11.90,12.00,12.10,12.20,12.20,12.20,12.20,12.20,11-20 & 12.20,12.20,12.20,12.20,12.20,12.20,12.20,12.20,0.628,0.628,!21-30 & 0.628, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 131-40 & 0.248, 0.628, 0.628, 0.628, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 141-50 & 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.628, 0.628, 0.628, 0.628, 0.248, 0.248, 0.248, 151-60 & 0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.628,0.628,0.628,161-70 & 0.248, 0.2 & 0.628, 0.628, 0.628, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 1.90 & 0.248, 0.248, 0.248, 0.628, 0.628, 0.628, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 191-100 & 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.628, 0.628, 0.628, 0.628, 0.248, 101-110 & 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.628, !111-120 0.628, 0.628, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 121-130 & & 0.248, 0.248, 0.628, 0.628, 0.628, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 131-140 & 0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.628,0.628,0.628,0.628,0.248,0.248,!141-150 & 0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.628,0.628,151-160 & 0.628, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 161-170 & 0.248,0.628,0.628,0.628,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,171-180 & 0.628, 0.248, 0.248, 0.248, 0.628, 0.628, 0.628, 0.248, 0.248, 0.248, 1181-190 & 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 191-200 & 0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,0.248,1201-210 & 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 1211-220 & 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, 0.248, !221-227 sas(227,2) С c-

0.248, 0.2 & & 0.628, 0.628, 0.628, 13.20, 1.230, 1.230, 1.230, 1.440, 1.440, 1.440, 1.1-20 & 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 0.660, 0.660, 121-30 & 0.660,0.660,0.660,0.660,0.660,0.660,0.660,0.660,0.660,0.660,!31-40 & 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.41-50 & 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 151-60 & 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 0.660, 1.440, 1.440, 1.440, 1.61-70 & 1.440, 1.4 & 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.81-90 & 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.91-100 & 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.4101-110 & 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.11-120

& 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.121-130 & 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.410, 1.440, 1.4 & 1.440,& 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.451-160 & 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.410, 1.440, 1.4 & 1.440, 1.4 & 1.440, 1.4 & 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.440, 1.380, 1.380, 1.380, 1.91-200 & 1.440,1.440,1.440,1.440,1.440,1.440,1.440,2.760,2.760,2.760,1201-210 & 2.760,2.760,2.760,2.760,2.760,2.760,2.760,5.910,5.910,5.910,!211-220 & 5.910, 5.910, 5.910, 5.910, 5.910, 5.910, 5.910/ !211-227

data sadlt /

c-----

& .0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,!1-10 .0500,.0500,.0500,.5400,.0500,.0500,.0500,.1100,.1100,.1100,!11-20 & & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.0500,.0500,!21-30 & .0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,!31-40 & .0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,!41-50 & .0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,!51-60 & .0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.0500,.1100,.1100,!61-70 & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,!71-80 & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,!81-90 & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.191-100 & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.101-110 & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,!111-120 & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,!121-130 & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.131-140 & .1100,. & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.151-160 & .1100,. & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,!171-180 & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,!181-190 .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.191-200 & & .1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.1100,.2000,.2000,!201-210 & .2000,.2000,.2000,.2000,.2000,.2000,.2000,.2000,.5000,.5000,!211-220 & .5000,.5000,.5000,.5000,.5000,.5000,.5000, !221-227 sadlt(230,2)

с

& .5000,.5000,.5000,.5000,.5000,.5000,.5000,.5000,.5000,.1-10

 $\& \qquad .5000, .5000, .5000, .5000, .5000, .5000, .5000, .5000, .5000, .5000, !11-20$

&	.5000,.5000,.5000,.5000,.5000,.5000,.5000,.0500,.0500,.0500,!21-30
&	.0500, .0197,
&	.0197,.0500,.0500,.0500,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,!41-50
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0500,.0500,.0500,.0197,.0197,.0197,!51-60
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0500,.0500,.0500,!61-70
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,!71-80
&	.0500,.0500,.0500,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,!81-90
&	.0197,.0197,.0197,.0500,.0500,.0500,.0197,.0197,.0197,.0197,!91-100
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0500,.0500,.0500,.0197,!100-110
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,!110-120
&	.0500,.0500,.0500,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,!120-130
&	.0197,.0197,.0500,.0500,.0500,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,!130-140
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0500,.0500,.0500,.0197,.0197,!140-150
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0500,.0500,!150-160
&	.0500,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,!160-170
&	.0197,.0500,.0500,.0500,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,!170-180
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0500,.0500,.0500,.0197,.0197,.0197,!180-190
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,!190-200
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,!200-210
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.210-220
&	.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197,.0197/ !220-227
cccc	000000000000000000000000000000000000000

- & 373.0,473.0,573.0,673.0,773.0,873.0,973.0,1073.,1173.,1273.,
- & 1373.,1405.,1473.,1573.,1673.,1773.,1873.,1973.,2073.,2173.,
- & 2273.,2373.,2473.,2573.,2670.,2673.,2773.,2873.,2973.,3073.,
- & 3074.,3122.,3123.,3200.,3400. /

- & 260.0,279.0,290.,297.,303.,307.,311.,314.,317.,320.,
- & 323.0,324.0,326.,331.,337.,345.,355.,368.,385.,405.,
- & 430.0,458.0,490.,527.,566.,568.,612.,660.,711.,766.,
- & 4960.,4960.,792.,700.,700. /

- & 10376.,10376.,10376.,10376.,10376.,10376.,10376.,10376.,
- & 10376.,10376.,10376.,10376.,10376.,10376.,10376.,10376.,
- & 10376.,10376.,10280.,10230.,10170.,10110.,10050.,9982.0,

& 9912.0,9912.0,9839.0,9762.0,9681.0,9596.0,9596.0,9595.0,

& 9595.0,9500.0,9500.0 /

C Heat conductivity of UO2 in zone 1-3 C

- & 6.83, 5.98, 5.30, 4.74, 4.28, 3.89, 3.55, 3.26, 3.01, 2.79,
- & 2.61,2.55,2.45,2.32,2.22,2.14,2.09,2.06,2.06,2.08,
- & 2.12,2.18,2.26,2.35,2.45,2.45,2.56,2.68,2.80,2.93,
- & 2.93,2.99,2.99,3.00,3.00, /

& 300.0,400.0,500.0,600.0,700.0,800.0,900.0,1000.,1100.,1200.,

& 1300.,1400.,1500.,1600.,2100.,2133.,2138.,2140.,2200.,2300.,

- & 2400.,2500.,2600.,2700.,2800.,2900.,3000.,3100.,3200.,3300.,
- & 3400.,3500.,3600.,3700.,3800.,3900.,4000.,4100. /

data sakczr

& 286.,302.,318.,333.,349.,365.0,381.0,397.0,413.,360.,

& 367.,374.,380.,387.,420.,4220.,4220.,700.0,600.,600.,

- & 600.,600.,600.,600.,600.0,600.0,600.0,600.0,600.,600.,
- & 600.,600.,600.,600.,600.,600.0,600.0,600.

& 6550.,6550.,6550.,6550.,6550.,6550.,6550.,6350.,6321.,6293.,

- & 6264.,6236.,6207.,6178.,6035.,6110.,6110.,6035.,6035.,6035.,
- & 6035.,6035.,6035.,6035.,6035.,6035.,6035.,6035.,6035.,6035.,
- & 6035.,6035.,6035.,6035.,6035.,6035.,6035.,6035. /

data sakkzr /

- & 19.3,18.5,18.1,18.0,18.9,19.8,21.1,22.7,25.5,
- & 27.5,29.5,31.5,35.5,35.5,35.5,35.5,35.5,35.5,
- & 35.5,35.5,35.5,35.5,35.5,35.5,35.5 /

data saktst /

& 300.0,400.0,500.0,600.0,700.0,800.0,900.0,1000.,1100.,1200.,

& 1300.,1400.,1500.,1600.,1740.,1743.,1781.,1784.,2000. /

C Heat capacity of steel

data sakcst /

& 502.,516.,529.,542.,556.,569.0,583.0,596.,609.,623.,

& 636.,650.,663.,676.,690.,5526.,5526.,730.,730. /

C density of steel

С

С

data sakdst /

& 7954.,7909.,7864.,7817.,7770.,7722.,7674.,7624.,7574.,7523.,

& 7471.,7418.,7365.,7311.,7256.,7256.,7457.,7457.,7457.

C Heat conductivity of steel

С

C

С

ccc

data sakkst /

& 14.0,15.5,17.1,18.7,20.2,21.8,23.4,25.0,26.5,28.1,

& 29.7,31.2,32.8,34.4,35.9,35.9,37.3,40.7,40.7 /

C part of Zr in outside of debris

data sakdzr /1.,1.,10.,10.,2./

c Time when az

& 0.01,0.100,1.000,2.000,5.000,10.000,20.000,50.000,100.00,

& 200.,500.0,1000.,2000.,5000.,10000.,28800.,37800.,50000.,

& 100000.,129600.,172800.,259200.,500000.,1468800.,2160000. /

c Power when az

& 0.0680,0.0675,0.0635,0.0604,0.0548,0.0499,0.0449,0.0385,

& 0.0337,0.0295,0.0248,0.0212,0.0174,0.0131,0.0107,0.0082,

& 0.0076,0.0071,0.0059,0.0054,0.0050,0.0044,0.0034,0.0021,

& 0.0018 /

c KTO for needed situations

data saalfar /

& 1.0,1.0000,100.,2.0000,12.8,30.352 /

data saalf / 300.,1.0,1.0,1.0,0.5,0.5,1.0 /

Визуализация процесса тяжелой аварии

Для визуализации процесса тяжелой аварии разработана соответствующая симуляционная диаграмма, которая отражает динамику процессов, протекающих в реакторе и УЛР (или в бетонной шахте реактора) (Рисунок 8 –). На симуляционной диаграмме представлены температурные поля в нижней части реактора, активной зоне и УЛР. Визуализация температурных полей осуществляется с использованием цветовой шкалы, приведенной на симуляционной диаграмме.

Представлено также изменение полного проходного сечения активной зоны вследствие стекания расплавленных материалов активной зоны и образования блокад при затвердевании расплавленных масс.

Осуществлена также визуализация процесса перемещения расплавленных материалов на перфорированное днище шахты реактора и днище корпуса реактора, а также момент разрушения корпуса реактора и перемещение расплава из реактора в УЛР с постепенным ее заполнением.

Отображаются также процессы подачи воды и заполнение водой теплообменников УЛР и объема между УЛР и днищем корпуса реактора

Симуляционная диаграмма позволяет отследить:

- начало и интегральный выход из реактора водорода,
- начало разгерметизации твэл в TBC и число разгерметизированных TBC и, связанный с этим интегральный выход продуктов деления,
- максимальную температуру топлива,
- температуру внутри реактора на отметке нижней опорной решетки активной зоны,
- температуру внутри реактора на отметке перфорированного днища шахты реактора,
- температуру внутри реактора между днищем шахты и днищем корпуса реактора,

- максимальную температуру на поверхности корпуса реактора.

Для подготовки данных для симуляционной диаграммы используется модуль **s.ssapict**. В этом модуле для визуализации температурных полей образован ряд двумерных и одномерных массивов.

satt1_p(10,15) – массив температур [°C] в координатах, соответствующих координатам 10ти выбранных ТВС в 15 аксиальных ячейках для каждой ТВС. Для обозначения координатной сетки принято изменение индексов слева-направо, снизу-вверх.

При отборе ТВС выбраны ТВС из трех групп – с минимальным (№, 93, 69, 130), средним (№ 26, 163, 53) и максимальным (№124, 35, 88, 82) энерговыделением.

 $satt1_p(1, 1/15) = satreal(26, 1/15) - kf273$

 $satt1_p(2, 1/15) = satreal(163, 1/15) - kf273$

$satt1_p(3, 1/15) = satreal(88, 1/15) - kf273$
$satt1_p(4, 1/15) = satreal(35, 1/15) - kf273$
$satt1_p(5, 1/15) = satreal(130, 1/15) - kf273$
$satt1_p(6, 1/15) = satreal(124, 1/15) - kf273$
$satt1_p(7, 1/15) = satreal(93, 1/15) - kf273$
$satt1_p(8, 1/15) = satreal(53, 1/15) - kf273$
$satt1_p(9, 1/15) = satreal(69, 1/15) - kf273$
$satt1_p(10, 1/15) = satreal(82, 1/15) - kf273$

Для передачи в симуляционную диаграмму двумерный массив satt1_p(10, 15) преобразуется в одномерный массив satt11_p(150) в соответствии с принятым порядком индексации (слеванаправо, снизу-вверх).

До тех пор, пока нижняя опорная плита активной зоны существует (sa:grid1=.false.), эти массивы представляют поле температур ТВС в активной зоне. После разрушения нижней опорной плиты активной зоны (sa:grid1=.true.) и до разрушения днища шахты реактора (sa:grid2=.false.) происходит перемещение расплавленных материалов активной зоны на днище шахты реактора. При этом моделируется одномерное распределение температур по высоте в массе расплава (по 15-ти расчетным слоям).

Для массива satt1_р предполагается, что

satt1_p(1/10, 7/15)=0.0 (обесцвеченные слои) satt1_p(1/10, 1/6)=satfg2b(9+i) - kf273

После разрушения днища шахты реактора и перемещения расплава на днище реактора, при наличии остаточной воды на днище реактора (savdc > savdcmin) предполагается, что

satt1_p(1/10, 3/15) = 0.0 (обесцвеченные слои)

 $satt1_p(1/10, 1/2) = satfh - kf273$

После выкипания воды на днище (savdc < savdcmin) предполагается, что $actt = \frac{1}{10} \frac{1}{10} \frac{1}{10} \frac{1}{10} = 0.0$

satt1_p(1/10, 1/15) = 0.0 (обесцвеченные слои).

sat2_p(12) — массив температур [°C] находится в координатах, соответствующих координатам от нижней образующей внутренней поверхности днища реактора до нижней опорной плиты активной зоны (индексация снизу-вверх).

```
Если sa:grid1 = .false., то

sat2_p(1/3) = 0.0.

sat2_p(4) = satgr2 - kf273

sat2_p(5/12) = 0.0.

Если выполняется условие (sa:grid1 = .true. и sa:grid2 = .false.), то

sat2_p(1/3) = 0.0.

sat2_p(4) = satgr2 - kf273

sat2_p(5/12) = satfg2b(1/8) - kf273

Если выполняется условие (sa:grid2 = .true. и sa:failcore = .false.), то

sat2_p(1/12) = satfh - kf273

Если выполняется условие (sa:failcore = .true. и sa:fail = .false.), то

sat2_p(1/7) = sat1(11/17) - kf273

sat2_p(8) = sat1(18) - kf273
```

 $sat2_p(10) = sat1(22) - kf273$

 $sat2_p(11) = sat1(25) - kf273$ $sat2_p(12) = sat1(27) - kf273$

satgr1_p -температура [°C] нижней опорной плиты активной зоны (этот слой находится между верхним слоем массива sat2 р и нижним слоем массива satt1 p(10,15))

$satgr1_p = satgr1 - kf273,$	если	sa:grid1 = .false.
$satgr1_p = satfg2b(9) - kf273,$	если	(sa:grid1 = .true. и sa:grid2 = .false.)
satgr1_p = satfh - kf273, если	(sa:grid1=.tru	e. и sa:grid2=.true. и sa:failcore =.false.)
satgr1_p = 0.0,	если	(sa:failcore. = .true.)

sat3_p(5,16) – массив температур [°C] в координатах, соответствующих координатам 5-ти слоев в 16 аксиальных ячейках стенки корпуса и днища реактора. Для обозначения координатной сетки принято изменение индексов слева-направо, снизу-вверх. Для передачи в симуляционную диаграмму двумерный массив sat3_p(5, 16) преобразуется в одномерный массив sat31_p(80) в соответствии с принятым порядком индексации (слева-направо, снизу-вверх).

1	1
sat3_p(1,1) = sat1(1) - kf273
sat3_p(2,1) = sat1(4) - kf273
sat3_p(3,1) = sat1(6) - kf273
sat3_p(4,1) = sat1(9) - kf273
sat3_p(5,1) = sat1(10)- kf273
sat3_p(1,2) = sat1(41) - kf273
sat3_p(2,2) = sat1(38) - kf273
sat3_p(3,2) = sat1(36) - kf273
sat3_p(4,2) = sat1(33) - kf273
sat3_p(5,2) = sat1(32) - kf273
sat3_p(1,3) = sat1(54) - kf273
sat3_p(2,3) = sat1(51) - kf273
sat3_p($(3,3) = \operatorname{sat1}(49) - \operatorname{kf273}$
sat3_p(4,3) = sat1(46) - kf273
sat3_p(5,3) = sat1(45) - kf273
sat3_p(1,4) = sat1(67) - kf273
sat3_p(2,4) = sat1(64) - kf273
sat3_p($(3,4) = \operatorname{sat1}(62) - \operatorname{kf273}$
sat3_p(4,4) = sat1(59) - kf273
sat3_p(5,4) = sat1(58) - kf273
sat3_p($1,5) = \operatorname{sat1}(80) - \operatorname{kf273}$
sat3_p(2,5) = sat1(77) - kf273
sat3_p(3,5) = sat1(75) - kf273
sat3_p(4,5) = sat1(72) - kf273
sat3_p(5,5) = sat1(71) - kf273

sat3_p(1,6) = sat1(93) - kf273	
sat3_p(2,6) = sat1(90) - kf273	
sat3_p(3,6) = sat1(88) - kf273	
sat3_p(4,6) = sat1(85) - kf273	
sat3_p(5,6) = sat1(84) - kf273	
-		
sat3_p(1,7) = sat1(106) - kf273	
sat3_p(2,7) = sat1(103) - kf273	
sat3_p((3,7) = sat1(101) - kf273	
sat3_p(4,7) = sat1(98) - kf273	
sat3_p(5,7) = sat1(97) - kf273	
1		
sat3_p(1,8) = sat1(119) - kf273	
sat3_p(2,8) = sat1(116) - kf273	
sat3_p(3,8) = sat1(114) - kf273	
sat3_p(4,8) = sat1(111) - kf273	
sat3_p(5,8) = sat1(110) - kf273	
sat3_p(1,9) = sat1(132) - kf273	
sat3_p(2,9) = sat1(129) - kf273	
sat3_p(3,9) = sat1(127) - kf273	
sat3_p(4,9) = sat1(124) - kf273	
sat3_p(5,9) = sat1(123) - kf273	
sat3_p(1,10) = sat1(145) - kf273	
sat3_p(2,10) = sat1(142) - kf273	
sat3_p(3,10) = sat1(140) - kf273	
sat3_p(4,10) = sat1(137) - kf273	
sat3_p(5,10) = sat1(136) - kf273	
sat3_p(1,11) = sat1(158) - kf273	
sat3_p(2,11) = sat1(155) - kf273	
sat3_p(3,11) = sat1(153) - kf273	
sat3_p(4,11) = sat1(150) - kf273	
sat3_p(5,11) = sat1(149) - kt273	
	1 10) (1/171) 1 (27)	
sat3_p(1,12) = sat1(1/1) - kf2/3	
sat3_p(2,12) = sat1(168) - kf2/3	
sat3_p(5,12) = sat1(166) - kf2/3	
sat3_p(4,12) = sat1(163) - kf273	
sat3_p(5,12) = sat1(162) - kf273	
ant? (1 12) and 1/107) 1 0072	
sat3_p(1,13 = sat1(197) - kt273 2,12) = sat1(104) = 1,0272	
sat3_p(2,13) = sat1(194) - KI2/3	

sat3_p(3,13) = sat1(192) - kf273
sat3_p(4,13) = sat1(189) - kf273
sat3_p(5,13) = sat1(188) - kf273
sat3_p(1,14) = sat1(207) - kf273
sat3_p(2,14) = sat1(204) - kf273
sat3_p(3,14) = sat1(202) - kf273
sat3_p(4,14) = sat1(199) - kf273
sat3_p(5,14) = sat1(198) - kf273
sat3_p(1,15) = sat1(217) - kf273
sat3_p(2,15) = sat1(214) - kf273
sat3_p(3,15) = sat1(212) - kf273
sat3_p(4,15) = sat1(209) - kf273
sat3_p(5,15) = sat1(208) - kf273
sat3_p(1,16) = sat1(227) - kf273
sat3_p(2,16) = sat1(224) - kf273
sat3_p(3,16) = sat1(222) - kf273
sat3_p(4,16) = sat1(219) - kf273
sat3_p(5,16) = sat1(218) - kf273

 $sat4_p(3,12)$ — массив температур [°C] в координатах, соответствующих координатам 3-х слоев в 12-ти аксиальных ячейках с координатами, соответствующими координатам 12-ти аксиальных ячеек массива $sat2_p(12)$. Для обозначения координатной сетки принято изменение индексов справа-налево, снизу-вверх. При этом слой 1 обозначает нижнюю часть стенки шахты реактора, а слои 2 и 3 относятся к нижней части опускного канала. Для передачи в симуляционную диаграмму двумерный массив $sat3_p(5, 16)$ преобразуется в одномерный массив $sat31_p(36)$ в соответствии с принятым порядком индексации (справа-налево, снизу-вверх).

При условии	sa:grid1 = .false.
	$sat4_p(2/3, 1/12) = 0.0$
	$sat4_p(1,1/12) = satwtr - kf273$
При условии	(sa:grid1 = .true. и sa:grid2 = .false.)
	$sat4_p(2/3, 1/12) = 0.0$
	$sat4_p(1,1/3) = 0.0$
	$sat4_p(1,4/12) = satwtr2 - kf273$
При условии	(sa:grid1 = .true. и sa:grid2 = .true. и sa:failcore =.false.)
	$sat4_p(1/3, 1/12) = 0.0$



Рисунок 8 – Видеокадр «Реактор и УЛР»

Если выполняется условие (sa:failcore = .true. и sa:fail = .false.), то

 $sat4_p(1/3,1) = sat1(28+i) - kf273$ $sat4_p(1/3,2) = sat1(41+i) - kf273$ $sat4_p(1/3,3) = sat1(54+i) - kf273$ $sat4_p(1/3,4) = sat1(67+i) - kf273$ $sat4_p(1/3,5) = sat1(80+i) - kf273$ $sat4_p(1/3,6) = sat1(93+i) - kf273$ $sat4_p(1/3,6) = sat1(106+i) - kf273$ $sat4_p(1/3,8) = sat1(119+i) - kf273$ $sat4_p(1/3,9) = sat1(119+i) - kf273$ $sat4_p(1/3,10) = sat1(145+i) - kf273$ $sat4_p(1/3,11) = sat1(158+i) - kf273$ $sat4_p(1/3,12) = sat1(184+i) - kf273$

Пока активная зона находится на своем месте (sa:grid1 = .false.) изменение проходного сечения активной зоны описывается массивом saalfar(1 / saknz).

saalfar(iz) = $\left[\sum (1.0 - \text{salradrod}(\text{irz})^{**2}./\text{saarmax2})\right]/\text{saknz}.$

где salradrod(irz) – радиус твэла в ячейке irz

irz = (ir-1)*saknz+iz, ir=1 / saknr, iz=1 / saknz, saknr=163, saknz=15

15 Условия выполнения программы

15.1 Нодализационная схема

Нодализационная схема активной зоны в модели SA должна соответствовать нодализационной схеме активной зоны в моделях TH и CR. Число параллельных каналов, имитирующих TBC (кассеты), saknr, и число аксиальных разбиений в каждом таком канале, saknz, в системах SA, TH и CR должны быть одинаковыми, в соответствии с разделом 4. Если это требование не соблюдается, то в модуле s.ssabef должны быть сделаны соответствующие изменения для переходов от массива энерговыделений, полученного от системы CR crxthqv(crknr, crknz), к массиву saqcr(saknr, saknz).

Нодализационная схема реактора в системе ТН представлена в описании в том виде, в котором она используется в последних проектах ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Если в проекте индексация нодализационной схемы реактора отличается от приведенной в описании, то в блокдате **s.bdsa** необходимо изменить значения, в соответствии с разделом 4.

sanvks1 - sanvks4, sannks1 - sannks4, sanok1 - sanok4, sanup, sandown, sanvksaccu1, sanvksaccu2, sannksaccu2.

15.2 База данных

Необходимо селект-файл sel dbm sa 1200, загрузить находящийся В папке ban1sim1(MOS)(sa):/home/ban/sa (машина 10.222.92.1). При этом, если рекомендации 16.1 были учтены, ничего в размерностях массивов (saknr =163, saknz =15, пункт 16.1) менять не надо. Если размерности были изменены – внести необходимые корректировки в селект-файл sel_dbm_sa_1200. В файле sel_dbm_sa_1200 проверить количественные, геометрические и критериальные параметры, приведенные в разделе 15. При необходимости сделать соответствующие корректировки. Массивы параметров, входящих в блок-дату s.bdsa, приведены в разделе 15. Блок-дату s.bdsa включить в директорию sa/bd

16 Выполнение программы

16.1 Инициализация расчета

Система SA не требует задания собственного исходного состояния. Вместе с тем должны быть заданы исходные состояния для систем TH (параметры в реакторе и активной зоне), CH (параметры в объеме между днищем реактора и УЛР) и CR (исходный массив распределения энерговыделений по кассетам и ячейкам активной зоны - crxthqv(saknr, saknz)). Инициализация системы SA происходит при первом ее запуске при условии, что значения .false. имеют следующие сигналы: sa:incon, sa:start, sa:flag4, sa:begin, sa:beton, sa:dummy.

Контрольным модулем для системы SA, который включается в загрузочный модуль является модуль s.ssabef: load ssabef,20,0.

В распределении памяти для системы SA выделяются global01sa и global02sa.

16.2 Возможности настройки системы SA

Система SA используется в рамках математической модели полномасштабных и аналитических тренажеров для проведения учебных занятий по сценариям запроектных аварий, переходящих в тяжелую стадию, и отработки мероприятий по управлению такими авариями. Для улучшения соответствия результатов расчетов тяжелых аварий с использованием тренажерной модели в режиме реального времени с результатами расчетов по механистическим тяжелоаварийным кодам, выполняемыми в течение длительного времени имеются определенные возможности.

Корректировка момента времени проплавления нижней опорной плиты активной зоны может быть выполнена изменением параметра **samgrid1** (по умолчанию **samgrid1**=3000.0).

Корректировка момента времени проплавления перфорированного днища шахты реактора и попадания всей массы расплава на днище корпуса реактора может быть выполнена изменением параметра samgrid2 (по умолчанию samgrid2=1000.0).

Корректировка скорости разогрева днища корпуса реактора до момента его проплавления может быть выполнена изменением параметров:

- saalf(21) корректировка скорости разогрева тяжелого слоя расплава (UO₂) на днище корпуса,
- saalf(22) корректировка скорости разогрева легкого слоя расплава (металлы) на днище,
- saalf(23) корректировка скорости разогрева днища корпуса реактора,
- saalf(24) корректировка скорости разогрева стенок корпуса реактора (ниже уровня расплава),
- saalf(25) корректировка скорости разогрева стенок корпуса (выше уровня расплава),
- saalf(26) корректировка скорости разогрева верхней половины реактора.

По умолчанию:

saalf(21)=1.0 saalf(22)=1.0 saalf(23)=1.0 saalf(24)=0.5 saalf(25)=0.5
saalf(26)=1.0

Корректировка времени поступления расплава из поврежденного реактора в УЛР может быть выполнена изменением sacdtimefull (по умолчанию sacdtimefull = 4200).

Корректировка скорости прогрева и растворения жертвенного материала в расплаве, поступившем в УЛР, может быть выполнена изменением параметра **sacporist** (по умолчанию **sacporist** = 200.).

Корректировка выхода водорода из активной зоны может быть выполнена изменением параметра sakdzr(6) (по умолчанию sakdzr(6) = 2.0).

Корректировка выхода водорода из активной зоны может быть выполнена изменением параметра sakdzr(6) (по умолчанию sakdzr(6) = 2.0).

Корректировка выхода водорода из реактора после обрушения активной зоны может быть выполнена изменением параметров sakdzr(4, 5) (по умолчанию sakdzr(4, 5) = 10.0).

Корректировка выхода водорода из УЛР может быть выполнена корректировкой параметра safh2lov.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1) ГОСТ 19.105–78 ЕСПД. Общие требования к программным документам (Раздел «Аннотация»).

Лист регистрации изменений

Mam.Mamber HBAXHOBBAXAntricos COMPOBAHLAXComposodur Crpannul b Ackyment TaComposodur Cokym. u dataIodan Ackyment TaIodan Dokym. u dataIodan Ackyment Ackym. u dataIodanI		Ном	ера листов	(страниц)	-	Всего	N⁰	Входящий №		
Image: series of the series	Изм.	изменен– ных	заменен– ных	новых	аннули– рованных	листов (страниц) в докум.	докумен– та	сопроводит. докум. и дата	Подп.	Дата
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: series of the series										
Image: selection of the										
Image: selection of the										
Image: state of the state										
Image: Sector										
Image: Second										
Image: Second										

|--|