

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»  
(НГТУ)**

**Образовательно-научный институт ядерной энергетики и технической физики  
им. академика Ф.М. Митенкова**

Выпускающая кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки»



**УТВЕРЖДАЮ:**

Директор института  
Хробостов А.Е.  
«01» июня 2020 г.

**Методические рекомендации по дисциплине  
«Принципы и средства обеспечения безопасности»**

**ОП ВО**

**по направлению: 14.04.02 Ядерные физика и технологии**

**Направленность (программы): Ядерные реакторы и энергетические установки**

**Квалификация выпускника: магистр**

**Очная форма обучения**

г. Нижний Новгород  
2020 г

Составитель Г.Н.Власичев

УДК 621.039

Анализ безопасности ЯЭУ: метод. указания по дисциплине «Критерии безопасности и оценка риска» (курсовая работа) для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 140800.68 «Ядерная физика и технологии», магистерской программе «Ядерные реакторы и энергетические установки» дневной формы обучения. Ч. 1. Расчетный анализ аварии с закупоркой отдельной ТВС быстрого реактора / НГТУ им. Р.Е.Алексеева; сост.: Г.Н.Власичев. Н.Новгород, 2012.- 20с.

Редактор Э.Б.Абросимова

Подписано в печать 31.10.2012. Формат 60 x 84<sup>1</sup>/16. Бумага газетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 717.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.  
Типография НГТУ. 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

© Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р.Е.Алексеева, 2012  
© Власичев Г.Н., 2012

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 4  |
| 1. Цель работы.....  | 4  |
| 2. Описание основных процессов при аварии с закупоркой отдельной ТВС.. | 4  |
| 3. Описание расчетной методики.....                                    | 5  |
| 4. Порядок выполнения работы.....                                      | 9  |
| 5. Указания к составлению отчета.....                                  | 12 |
| Список литературы.....   | 12 |
| Приложение 1. Правила записи в файл входных данных.....                | 13 |
| Приложение 2. Правила задания входных данных программы.....            | 14 |
| Приложение 3. Входные данные программы.....                            | 15 |



## Введение

Существующая концепция безопасности включает рассмотрение в проекте ЯЭУ проектных и запроектных аварий. Необходимость их рассмотрения устанавливается в правилах ядерной безопасности реакторных установок ПБЯ РУ АС-89 [1], конкретизирующих требования ОПБ-88 в части обеспечения ядерной безопасности. В разделе технического проекта «Техническое обоснование безопасности РУ» должны быть приведены: перечень исходных событий и анализ нарушений нормальной эксплуатации, анализ проектных и запроектных аварий, а также классификация проектных и запроектных аварий по вероятности возникновения и по тяжести последствий. В числе запроектных аварий необходимо рассмотреть аварии с тяжелыми повреждениями или расплавлением активной зоны.

В число проектных аварий реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем входят аварии с локальным нарушением расхода. Уменьшение или прекращение расхода теплоносителя в отдельной ТВС возможно в результате частичного или полного перекрытия сечения для прохода теплоносителя. Авария с закупоркой ТВС может произойти при попадании посторонних предметов в хвостовик кассеты или в нижнюю решетку пучка твэлов. Чтобы такое перекрытие могло оказать существенное влияние на расход теплоносителя, оно должно быть достаточно большим. В результате снижения расхода произойдет выход из строя твэлов и попадание продуктов деления в контур. Значительное разрушение оболочек может быть обнаружено по аномальному росту активности теплоносителя. Максимальный проектный предел повреждения твэлов для быстрых натриевых реакторов состоит в разрушении всех твэлов семи ТВС в локальном объеме активной зоны с непревышением пределов безопасной эксплуатации по повреждению твэлов во всем остальном объеме активной зоны. Для предотвращения развития проектной аварии за пределы семи ТВС активной зоны и соответственно перехода аварии в разряд запроектных необходима своевременная остановка реактора средствами воздействия на реактивность (аварийной защитой). Для формулирования требования к быстродействию средств обнаружения аварий и аварийной защиты необходим детальный анализ аварии, в результате которого должны быть определены временные параметры ее развития.

### 1. Цель работы

Практическое освоение методов расчетного анализа проектных и запроектных аварий, сопровождающихся плавлением материалов в активной зоне ядерного реактора.

### 2. Описание основных процессов при аварии с закупоркой отдельной ТВС

К настоящему времени имеются данные по различным аспектам аварии с полной блокировкой отдельной ТВС быстрого реактора, сопровождающейся в случае ее возникновения плавлением в активной зоне. Результаты выполненных экспериментальных работ (во Франции, по программе SCARABEE) и со-

провождающих расчетных исследований позволяют достаточно хорошо представлять сценарий развития такой аварии. В результате значительного снижения или прекращения расхода в ТВС происходят выкипание натрия, сопровождающееся осцилляциями его расхода, осушение и плавление оболочек твэлов с образованием стальных блокировок каналов для теплоносителя в области нижней зоны воспроизводства. После стальных оболочек плавятся таблетки топлива, образуя расплавленный и затем кипящий бассейн из топлива и стали. Взаимодействия возвращающегося натрия с расплавом вызывают выбросы расплавленных материалов и образование блокировок в верхней части активной зоны. Высокие тепловые потоки от кипящего бассейна к чехлу приводят к плавлению и разрушению чехлов аварийной и соседних ТВС и проникновению расплава в межчехловые зазоры и, по-видимому, в окружающие ТВС. При проплавлении чехла имеет место полная блокировка сталью радиального зазора между ТВС на ранней стадии процесса, которая предотвращает дальнейшее перемещение топлива в зазор. При своевременной остановке реактора и соответствующем снижении тепловыделения в топливе до остаточного радиального распространения аварии прекращается. Возможность обнаружения аварии детектированием запаздывающих нейтронов подтверждается экспериментами программы SCARABEE. При свежем топливе достаточно сильный сигнал может быть получен после повреждения чехла и выхода источников запаздывающих нейтронов в межчехловой зазор с потоком натрия, а также при проникновении расплава в окружающие ТВС с номинальным натриевым потоком. При облученном топливе, как показал эксперимент ВТИ-Cabri, источники запаздывающих нейтронов выносятся к выходу из аварийной ТВС непосредственно после разрыва оболочек твэлов. Для срабатывания аварийной защиты за счет такого сигнала в конкретном реакторе требуется время от 10 до 30 с, необходимое преимущественно для переноса источников запаздывающих нейтронов до детектора. Проникновение расплава в окружающие ТВС с образованием полной блокировки происходит очень быстро – за 1-2 с. Чтобы избежать распространения аварии за пределы семи ТВС, реактор должен быть остановлен до достижения кипящего бассейна в этих сборках.

### 3. Описание расчетной методики

Расчетная модель динамики разогрева и плавления твэла описывает стационарный теплообмен в отдельном цилиндрическом твэле с учетом плавления оболочки и топлива при аварии с прекращением расхода.

В данной модели расчетная схема твэла составляется из двух областей (рис.1). Одна расчетная область включает топливный сердечник, вторая – оболочку. В случае рассмотрения выпаривания натрия вокруг твэлов добавляются еще одна либо две (в зависимости от разновидности модели) расчетные области, включающие кольцевую ячейку теплоносителя. Две дополнительные расчетные области используются для учета выталкивания части жидкого теплоносителя из рассчитываемого поперечного сечения пузыря паров натрия из соседних по высоте канала более нагретых участков.



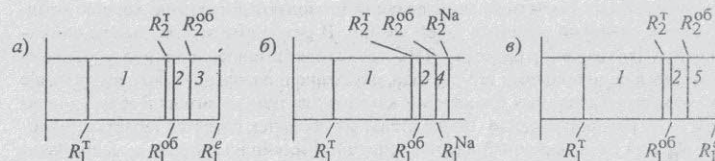


Рис.1. Расчетные схемы радиального теплообмена в твэле на характерных высотных участках в аварийном процессе после прекращения расхода: до закипания натрия (а), после закипания натрия (б), после высыхания пленки жидкого натрия (в); 1 – топливный сердечник; 2 – оболочка; 3 – жидкий натрий; 4 – пленка жидкого натрия; 5 – пары натрия (не является расчетной областью)

Нестационарное поле температуры в топливном сердечнике и оболочке твэла математически описывается уравнением теплопроводности:

$$c\rho(r, z, T) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda(r, z, T) r \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(r, z, T) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] + q_v(r, z, t), \quad (1)$$

где  $r$  – радиальная координата с центром на оси твэла;  $z$  – высотная координата;  $t$  – время;  $T$  – температура;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c\rho$  – объемная теплоемкость;  $q_v$  – удельное тепловыделение (единицы объема).

Передачей тепла вдоль оси твэла можно пренебречь, поскольку большая часть тепла от топлива отводится в радиальном направлении к теплоносителю. В связи с этим используемая версия расчетной модели основывается на одномерном варианте уравнения (1) – без учета второго слагаемого в правой части. В данной версии модели расчеты напряженно-деформированных состояний твэла не производятся, расчет теплообмена продолжается до полного расплавления оболочки и топлива в рассматриваемом сечении. Такая модель может быть применена для условий аварий с прекращением расхода без повышения мощности реактора при невысоком выгорании топлива. В соответствии с экспериментальными данными механизм разрушения оболочки твэла (и его разгерметизации) со свежим топливом и облученного твэла, не имеющего значимого перепада давлений на оболочке, является плавление оболочки. Доля расплавленного объема в поперечном сечении перед разрушением сердечника твэла из свежего топлива может составлять до 90 %. Разрушение облученного топлива при быстром подъеме мощности и соответственно высокой скорости нагрева начинается, когда эта доля намного меньше, и даже при твердом топливе.

Передача тепла между сердечником и оболочкой математически описывается граничными условиями третьего рода. Расчет теплопередачи в радиальном зазоре производится по стационарной модели – с учетом газовой и лучистой составляющих. Доля лучистой составляющей теплообмена в зазоре сильно возрастает при подъеме температуры до точки плавления. Величина коэффициента

теплопередачи в зазоре между топливом и оболочкой вычисляется по следующим формулам:

$$\alpha_2^T = \alpha_r + \alpha_l; \quad \alpha_r = \frac{\lambda_r}{R_2^T \ln(R_1^{OB}/R_2^T)}; \quad \alpha_l = \frac{q_{sl}}{T(R_2^T, t) - T(R_1^{OB}, t)}; \quad (2)$$

где  $\alpha_r$  – коэффициент теплоотдачи единицы внутренней поверхности кольцевого зазора за счет теплопроводности газа;  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности газа в зазоре;  $R_2^T$  и  $R_1^{OB}$  – радиус внешней поверхности топливного сердечника и внутренней поверхности оболочки соответственно;  $\alpha_l$ ,  $q_{sl}$  – коэффициент теплоотдачи и плотность теплового потока за счет лучистого теплообмена. Величина плотности теплового потока лучеиспусканием рассчитывается по закону Стефана-Больцмана:

$$q_{sl} = \sigma \epsilon_{пр} \left\{ \left[ T(R_2^T, t) \right]^4 - \left[ T(R_1^{OB}, t) \right]^4 \right\}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_{пр} = \frac{1}{1/\epsilon_r + (R_2^T/R_1^{OB})^2(1/\epsilon_{об} - 1)}$  – приведенная степень черноты;  $\epsilon_r$  и  $\epsilon_{об}$  – степени черноты поверхностей сердечника и оболочки соответственно;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Нагрев и выпаривание натрия приближенно рассчитываются при нулевом его расходе в эквивалентной кольцевой ячейке вокруг твэла. При этом за начальное принимается состояние в момент прекращения расхода в ТВС. Принято, что прекращение расхода наступает мгновенно после блокировки проходного сечения ТВС. В расчетную схему включается кольцевая ячейка (канал) неподвижного теплоносителя (рис.1, а). Профиль поперечного сечения канала для прохода теплоносителя, приходящегося на один твэл, представляется в виде кольца вокруг твэла, эквивалентного по величине гидравлического диаметра и площади. Момент закипания определяется по достижению температуры насыщения в теплоносителе у стенки. В настоящем приближении принимается, что в этот или в более ранний момент (при учете расширения пузыря паров натрия из областей с более нагретым теплоносителем) объемная доля жидкого теплоносителя в ячейке мгновенно уменьшается за счет вытеснения остальной части парами, на поверхности остается (в соответствии с [2]) пленка жидкости заданной толщины (рис.1, б). В таком случае из схемы в соответствии с принятой физической моделью исключается в некоторый момент внешняя расчетная область. Данное условие может отсутствовать, тогда рассчитывается выпаривание всего натрия на каждом высотном участке канала.

Для математического описания радиального переноса тепла в ячейке с жидким теплоносителем также используется одномерное уравнение теплопроводности, в котором отсутствует источниковый член (удельное тепловыделение). На границе между оболочкой и теплоносителем, температура которого ниже температуры кипения, используется граничное условие четвертого рода. Для приближенного математического описания теплообмена после закипания натрия принята модель выпаривания натрия на так называемом внешнем фазовом



фронте (геометрически условно располагаемом на стороне, обращенной к оболочке). При этом на наружной поверхности оболочки используется граничное условие третьего рода. Величина коэффициента теплоотдачи к кипящему жидкометаллическому теплоносителю рассчитывается по формуле из [3]

$$\alpha_{\text{кип}} = 7,32 q_s^{0,7}, \quad (4)$$

где  $q_s$  – плотность теплового потока с поверхности твэла.

Высыхание пленки натрия в дисперсно-кольцевом режиме течения теплоносителя в канале осуществляется за счет нескольких механизмов: испарение пленки с внешней поверхности, механический унос капель жидкости, пузырьковый унос [4]. Физическая интерпретация используемой простой модели заключается в парообразовании в пристенном подслое жидкой пленки натрия за счет подвода тепла от стенки и последующем поперечном уносе паров через внешнюю поверхность в паровое ядро. При этом внутренняя граница пленки снова контактирует со стенкой, а вслед за ней смещается и внешняя граница. За счет этого поддерживается неизменный термический контакт стенки с пленкой, предполагаемый в модели.

На осушенных от теплоносителя участках внешней поверхности оболочки твэла используется граничное условие третьего рода. Такое условие используется также на поверхности оголенного сердечника после расплавления оболочки и стекания расплава. В величине коэффициента теплоотдачи с поверхности твэла в общем случае учитываются конвективная и лучистая составляющие:

$$\alpha_2^{\text{об}} = \alpha_k + \alpha_l. \quad (5)$$

Значения коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha_k$  с поверхности твэла потоком паров теплоносителя после осушения оболочки могут быть рассчитаны по известным формулам. Величина плотности потока лучеиспусканием рассчитывается по формуле

$$q_{sl} = \sigma \epsilon_{\text{пр}} k_{\text{rad}} \{ [T(R, t)]^4 - T_e^4 \}, \quad (6)$$

где  $R$  – радиус твэла ( $R = R_2^{\text{об}}$ , при отсутствии оболочки –  $R = R_2^{\text{т}}$ );  $T_e$  – температура среды, к которой отводится тепло;  $k_{\text{rad}}$  – коэффициент излучения, учитывающий ослабление излучения с поверхности отдельного твэла окружающими твэлами в пучке.

Для описания объемного плавления в топливном сердечнике используется приближение двухфазной зоны, в котором скрытая теплота плавления учитывается в объемной теплоемкости топлива по формуле

$$c_{pSL} = R_{\text{пл}} / \Delta T_{\text{пл}} + [c_{pS}(T_{\text{пл}}) + c_{pL}(T_{\text{пл}} + \Delta T_{\text{пл}})] / 2, \quad (7)$$

где  $T_{\text{пл}}$  – температура начала плавления;  $R_{\text{пл}}$  – скрытая теплота плавления единицы объема;  $\Delta T_{\text{пл}}$  – перепад температуры в двухфазной зоне (разница между температурами ликвидуса и солидуса);  $L$ ,  $S$ ,  $SL$  – индексы жидкой фазы, твердой фазы и двухфазной зоны соответственно. Для описания плавления оболочки используется приближение фазового фронта, в котором часть передаваемого от топлива тепла расходуется на расплавление материала. Для математического

описания такого фазового перехода обычно используются условия Стефана. В данной расчетной модели используется введение дельта-функции Дирака в левую часть уравнения теплопроводности. В таком уравнении слагаемое с дельта-функцией не равно нулю на границе раздела твердой и жидкой фаз внутри оболочки при ее плавлении. Конвективной передачей тепла в расплавленных слоях материалов пренебрегают, что справедливо при малой толщине расплава.

Система дифференциальных уравнений, описывающих теплообмен в элементах твэла и на их границах с учетом плавления, решена численно методом конечных разностей и реализована в компьютерной программе TRAMS-TWEL.

Времена плавления оболочки и сердечника по всей высоте нагреваемой части определяются расчетами по программе поочередно нескольких вариантов задания для ряда поперечных сечений, расположенных на разных высотных уровнях. Во входных данных задаются таблично высотные зависимости начальных значений температуры оболочки и линейной мощности, по которым определяются начальная температура оболочки и линейная мощность для каждого конкретного варианта. Расчет каждого варианта задания прекращается при расплавлении и оболочки и сердечника. При этом расчет по программе возобновляется с начального момента с входными данными нового варианта.

Выходные данные выводятся в файлы данных. Ряд выходных параметров программы выводится дополнительно в табличной форме в отдельные файлы для использования графическим редактором либо в качестве входных данных другой программы. В частности, выводятся рассчитанные времена выпаривания натрия и расплавления элементов твэла по высоте активной зоны.

#### 4. Порядок выполнения работы

##### 1. Подготовка входных данных

Каждый студент перед началом работы получает у преподавателя задание на выполнение расчетной работы с основными параметрами – геометрическими и режимными параметрами твэла и ТВС (диаметр оболочки твэла, толщина оболочки твэла, высота активной зоны, число твэлов в ТВС, размер ТВС "под ключ", толщина стенки чехла ТВС, мощность ТВС, максимальный коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны, температура натрия на входе в активную зону). Затем самостоятельно подбираются по справочнику теплофизические свойства топлива и оболочки твэла [5], теплоносителя [3] (теплопроводность, теплоемкость, плотность, температура и скрытая теплота плавления/парообразования, степень черноты поверхности), рассчитывается распределение энерговыделения (линейной мощности твэла) по высоте активной зоны, вычисляются геометрические параметры твэла и эффективного кольцевого канала, рассчитываются начальные (до аварии) распределения температуры натрия и температуры оболочки твэла по высоте активной зоны в ячейке ТВС (выполняется стационарный теплогидравлический расчет).

Распределение линейной мощности твэла по высоте активной зоны рассчитывается по формуле

$$q_l(z) = \eta(z) q_l^{\text{max}},$$



где  $\eta(z) = \cos \left[ b \left( \frac{z}{H} - \frac{1}{2} \right) \right]$ ;  $b = 2,18$ ;  $H$  – высота активной зоны;  $q_l^{\max}$  – максимальная линейная мощность твэла;  $q_l^{\max} = q_l^{\text{ср}} k_z^{\max}$ ;  $k_z^{\max}$  – максимальный коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны;  $q_l^{\text{ср}}$  – средняя линейная мощность твэла;  $q_l^{\text{ср}} = N_{\text{TBC}} / n / H$ ;  $N_{\text{TBC}}$  – мощность ТВС;  $n$  – число твэлов в ТВС.

Наружный радиус эквивалентной ячейки теплоносителя (рис.2,в) рассчитывается по формуле

$$R_{\text{н}}^{\text{яч}} = \sqrt{\frac{S_{\text{прох}}^{\text{яч}}}{\pi} + (R_{\text{вн}}^{\text{яч}})^2},$$

где  $R_{\text{вн}}^{\text{яч}} = d/2$ ;  $d$  – наружный диаметр оболочки твэла;  $S_{\text{прох}}^{\text{яч}}$  – площадь поперечного сечения ячейки теплоносителя, приходящейся на один твэл;

$S_{\text{прох}}^{\text{яч}} = \frac{S_{\text{TBC}}}{n}$ ;  $S_{\text{TBC}} = \frac{\sqrt{3}}{2} L_{\text{вн}}^2 - \frac{\pi d^2}{4} n - \frac{\pi \delta_{\text{пр}}^2}{4} n$ ;  $L_{\text{вн}} = L - 2\delta_{\text{чехла}}$  (рис.2,а);  $L$  – размер ТВС "под ключ";  $\delta_{\text{чехла}}$  – толщина стенки чехла ТВС;  $\delta_{\text{пр}}$  – диаметр проволоочной навивки;  $\delta_{\text{пр}} = 1,15$  мм.  $S_{\text{прох}}^{\text{яч}}$  можно рассчитать иначе (рис.2,б) –

$S_{\text{прох}}^{\text{яч}} = \frac{\sqrt{3}}{2} l^2 - \frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi \delta_{\text{пр}}^2}{4}$ ; где  $l$  – шаг размещения твэлов в ТВС;  $l = 1,17$  д.

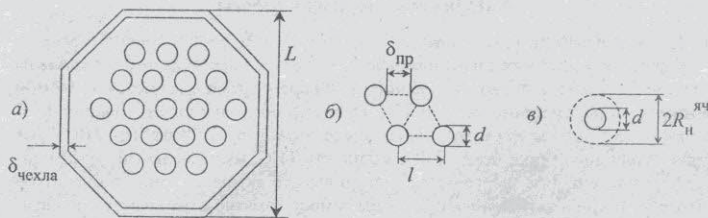


Рис.2. Схемы ТВС (а), ромбической ячейки (б) и эквивалентной ячейки (в)

В качестве начального термического состояния твэла и ячейки теплоносителя в данных расчетах принимается стационарное состояние перед прекращением расхода теплоносителя. Стационарное распределение температуры натрия по высоте активной зоны в рассматриваемой ячейке зависит от распределения линейной мощности твэла и от расхода натрия в ячейке и математически определяется зависимостью  $G_{\text{Na}}^{\text{яч}} c_p^{\text{Na}} dT_{\text{Na}} = q_l dz$ , откуда получаем формулу для расчета температуры натрия

$$T_{\text{Na}}(z) = \int_0^z \frac{q_l(z)}{G_{\text{Na}}^{\text{яч}} c_p^{\text{Na}}} dz + T_{\text{Na}}(0),$$

где  $z$  – высотная координата ( $z = 0$  на входе в активную зону);  $T_{\text{Na}}$  – температура натрия;  $q_l$  – линейная мощность;  $c_p^{\text{Na}}$  – удельная теплоемкость натрия;  $G_{\text{Na}}^{\text{яч}}$  – расход натрия в ячейке;  $G_{\text{Na}}^{\text{яч}} = G_{\text{Na}}^{\text{TBC}} / n$ ;  $G_{\text{Na}}^{\text{TBC}}$  – расход натрия в ТВС.

Температура оболочки твэла по высоте активной зоны рассчитывается по формуле

$$T_{\text{об}}(z) = T_{\text{Na}}(z) + \frac{q_l(z)}{\Pi \alpha_{\text{Na}}},$$

где  $\Pi$  – внешний периметр оболочки твэла;  $\Pi = \pi d$ ;  $\alpha_{\text{Na}}$  – коэффициент теплоотдачи от оболочки твэла к теплоносителю. При нормальной работе реактора  $\alpha_{\text{Na}} \approx 10$  Вт/(см<sup>2</sup> · град).

## 2. Подготовка файла входных данных компьютерной программы

Для выполнения расчетов по компьютерной программе необходимо в индивидуальной директории студента сформировать файл с входными данными – Twel.dat. Исходный вариант файла с входными данными переписывается в директорию студента из указанной преподавателем директории. На основе исходного варианта файла входных данных студент формирует свой вариант в соответствии с данными, подготовленными в соответствии с предшествующим пунктом работы. В исходном варианте записаны все имена списков Namelist, имена всех переменных – входных данных и частично их численные значения в соответствии с правилами записи. В число приведенных численных значений входят рекомендуемые значения шагов пространственной сетки, шага по времени и др. Список входных данных и правила записи в файл входных данных приведены в приложениях. Для выполнения расчетов на всех высотных уровнях в одном запуске программы в файле входных данных рекомендуется задавать несколько вариантов задания – в первом варианте вводятся все данные для первого высотного уровня, данные для последующих высотных уровней вводятся ниже и неполностью – только изменяемые. Именно так записан исходный вариант файла с входными данными.

## 3. Выполнение расчетов рассматриваемых процессов при аварии с помощью компьютерной программы по подготовленным входным данным

Выполнение расчетов по компьютерной программе инициируется файлом Twel.bat, содержащим путь к исполняемому файлу программы и имена файла с входными данными и одного из файлов с выходными данными. Файл Twel.bat переписывается из указанной преподавателем директории в индивидуальную директорию студента.

## 4. Обработка результатов расчетов компьютерной программы

Выходные данные компьютерной программы записываются в файлы с именами: Twel.res, Ztna.dat, Ztcl.dat, Ztf.dat. Эти файлы размещаются в той же индивидуальной директории автоматически – при выполнении программы. Файл



Twel.res содержит полную распечатку входных данных и распечатку выходных данных (рассчитываемых значений температуры в узлах пространственной сетки, положений координат границ раздела фаз) для первого варианта задания, частичную распечатку входных данных и распечатку выходных данных для последующих вариантов. Этот файл может потребоваться для контроля полученных результатов. Файлы Ztna.dat, Ztcl.dat, Ztf.dat содержат требующиеся при составлении отчета распечатки рассчитываемых времен начала и окончания выпаривания натрия, расплавления оболочки и топливного сердечника твэла соответственно для каждого из вариантов.

#### 5. Указания к составлению отчета

Отчетные материалы должны содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- расчетную схему твэла;
- исходные параметры для расчетов, выданные преподавателем;
- описание и результаты вычислений параметров – входных данных программы (результаты стационарного теплогидравлического расчета);
- график распределения линейной мощности твэла по высоте активной зоны;
- графики начальных (до аварии) распределений температуры натрия и температуры оболочки твэла по высоте активной зоны в ячейке ТВС;
- распечатку файла входных данных программы (Twel.dat);
- распечатки файлов выходных данных программы (Ztna.dat, Ztcl.dat, Ztf.dat);
- график начального распределения температуры по радиусу твэла в центральной плоскости активной зоны (из файла Twel.res);
- график высотных зависимостей времен начала и окончания выпаривания натрия, расплавления оболочки и топливного сердечника твэла (из файлов Ztna.dat, Ztcl.dat, Ztf.dat);
- заключение;

#### Список литературы

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89 // Атомная энергия. – 1990. – т. 69. – вып. 6. – с.409-422.
2. Уолтер, А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах: [пер. с англ.] / А. Уолтер, А. Рейнольдс – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 624 с.
3. Кириллов, П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы); под общей ред. П.Л. Кириллова / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
4. Галин, Н.М. Тепломассообмен (в ядерной энергетике): учеб. пособие для вузов / Н.М. Галин, П.Л. Кириллов – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 376 с.
5. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

##### Правила записи в файл входных данных

Данные в файле входных данных должны быть записаны в специальном виде (в соответствии с правилами Фортрана, на котором написана компьютерная программа).

Первым символом каждой записи (строки) должен быть пробел, вторым символом первой записи каждого списка Namelist – символ &, за которым следует имя списка с последующим пробелом, далее размещаются данные, разделенные запятыми, концы данных списка Namelist заканчиваются символом / с предшествующим пробелом (лучше символ / располагать в отдельной записи).

Каждое данное готовится в одной из следующей форм:

имя переменной = константа; имя элемента массива = константа; имя массива = список констант, где константа – целая, вещественная или логическая константа (логическая константа не допускается при задании значения элемента массива).

Индексы, используемые для обозначения элемента массива, могут быть только целыми константами.

При подготовке входных данных необходимо соблюдать также следующие правила:

а) имена переменных и массивов, содержащиеся в записях данных, должны быть указаны в соответствующем списке Namelist. Порядок следования переменных и массивов в данных и в списке Namelist может быть различным;

б) если данные размещаются в нескольких записях, то каждое имя и каждая константа должны полностью содержаться в одной записи;

в) пробелы в имени списка Namelist, в именах переменных и массивов, а также в константах не допускаются. Пробелы в конце числа интерпретируются как нули. Данные отделяются друг от друга запятыми либо пробелами (при задании значений массива только пробелами). В вещественных числах целая часть от дробной отделяется точкой.

г) значения логических констант могут приниматься равными .FALSE. либо .TRUE., допускается задавать их в виде, соответственно, F либо T (задание в виде .FALSE. либо .TRUE. не допускается при задании значений массива).



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Правила задания входных данных программы

Порядок следования списков входных данных Namelist: DAT, COM, BC, GM, NE, HPR, DWRT, SP, FBC. В случае отсутствия надобности ввода данных каких-либо списков Namelist имена таких списков с конечным символом все равно должны быть записаны (без данных).

В алгоритме программы за каждой расчетной областью рассчитываемой системы закреплен свой номер:

L = 2 – топливный сердечник;

L = 3 – оболочка;

L = 6 – внутренняя часть кольцевой эквивалентной ячейки теплоносителя (по размеру равная толщине пленки жидкого натрия, остающейся после закипания натрия, либо толщине всей эквивалентной ячейки);

L = 7 – внешняя часть кольцевой эквивалентной ячейки теплоносителя (в модели выпаривания всего натрия данная область отсутствует);

L = 9 – внешняя по отношению к рассчитываемому твэлу расчетная область (соседние твэлы либо чехол ТВС).

При задании числовых и логических значений массивам входных данных в файле Twel.dat порядковые номера элементов массивов (индексы) должны соответствовать указанным номерам расчетных областей. У двумерных массивов номерам расчетных областей должны соответствовать вторые индексы (первые индексы – номерам фазовых границ). Следует учитывать, что по правилам Фортрана сначала изменяются первые индексы массивов. Размерности входных данных должны строго соответствовать их размерностям, указанным в приложении 3. В том случае, если во входных данных не введены значения переменных либо элементов массивов, программой будут использоваться их инициализированные значения, равные значениям по умолчанию, указанным в приложении 3.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Входные данные программы

Таблица 1 П.3

Данные списка NAMELIST с именем DAT

| Идентификатор | Массив или переменная         | Пояснение  | Значение по умолчанию, размерность |
|---------------|-------------------------------|--|------------------------------------|
| 1             | 2                             | 3  | 4                                  |
| KG            | переменная целого типа        | признак геометрии: 0 – линейная, 1 – цилиндрическая (для твэла), 2 – сферическая   | 0                                  |
| L1            | переменная целого типа        | номер крайней слева расчетной области  | 1                                  |
| L2            | переменная целого типа        | номер крайней справа расчетной области   | 10                                 |
| KMAX          | переменная целого типа        | максимальное число итераций по расчету распределения температуры в узлах пространственной сетки и новых координат фазовых границ | 10                                 |
| DELTO         | переменная вещественного типа | начальное значение шага по времени   | 0.1 с                              |
| TMAX          | переменная вещественного типа | момент времени прекращения расчета   | 0. с                               |
| NVAR          | переменная целого типа        | число вариантов задания  | 1                                  |

Таблица 2 П.3

Данные списка NAMELIST с именем COM

| Идентификатор | Массив или переменная                           | Пояснение   | Значение по умолчанию, размерность |
|---------------|---|---|------------------------------------|
| 1             | 2   | 3   | 4                                  |
| EX            | одномерный логический массив размерностью = 10  | признаки существования областей (=T – при существовании)  | F                                  |
| EXA           | одномерный логический массив размерностью = 10  | признаки расчета распределения температуры (=T – по уравнению теплопроводности, при этом должно быть задано EX(L)=T)      | F                                  |
| FRRM          | одномерный логический массив размерностью = 10  | признаки характера фазового перехода: =T – фазовый фронт (в оболочке твэла); =F – двухфазная область (в топливе)          | T                                  |
| FRN1          | двумерный логический массив размерностью = 2*10 | признаки расчета положения левой границы области: =T – при совпадении с фазовым фронтом; =F – при неизменном расположении | F                                  |



Таблица 3 П.3

Данные списка NAMELIST с именем BC

| Идентификатор | Массив или переменная                           | Пояснение  | Значение по умолчанию, размерность |
|---------------|---|--|------------------------------------|
| 1             | 2   | 3  | 4                                  |
| KB2B          | одномерный массив целых чисел размерностью = 10 | признаки рода граничного условия (ГУ) на правых границах областей в начальный момент времени: 2 – ГУ II рода; 3 – ГУ III рода; 4 – ГУ IV рода  | 2                                  |
| KB2           | одномерный массив целых чисел размерностью = 10 | признаки рода граничного условия (ГУ) на правых границах областей: 1 – ГУ I рода; 2 – ГУ II рода; 3 – ГУ III рода; 4 – ГУ IV рода  | 2                                  |
| KA2           | одномерный массив целых чисел размерностью = 10 | признаки расчета коэффициентов теплоотдачи на правых границах областей при ГУ III рода: 1 – постоянный, равный заданному (A20 (здесь и далее индекс элемента массива опускается)); 2 – рассчитывается интерполяцией по временной зависимости, задаваемой таблично; 3 – по заданной теплопроводности вещества в зазоре на правой границе (QG2); 4 – сумма постоянной (A20) и лучистой составляющих; 5 – сумма значения, вычисленного по заданной теплопроводности вещества в зазоре (QG2), и лучистой составляющей; 6 – специфический случай (в зазоре между топливом и оболочкой – по модели контактной проводимости; от оболочки к кипящему ж/м теплоносителю – по формуле (4)) | 1                                  |
| KQS2          | одномерный массив целых чисел размерностью = 10 | признаки расчета тепловых потоков на правых границах областей при ГУ II рода: 1 – постоянный, равный заданному (QS20); 2 – рассчитывается интерполяцией по временной зависимости, задаваемой таблично; 3 – лучистый перенос тепла к соседней области; 4 – сумма постоянной (QS20) и лучистой составляющих  | 1                                  |

Окончание таблицы 3 П.3

| 1    | 2  | 3  | 4                   |
|------|--|--|---------------------|
| KRAD | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10 | коэффициенты излучения на правых границах областей   | 1.                  |
| A20  | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10 | коэффициенты теплоотдачи на правых границах областей (при KA2=1)   | 0.<br>Вт/см**2/град |
| T0   | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10 | значения температуры на правых границах областей в начальный момент времени (для областей с KB2B=2 при NT0ZI<=1) | 0. град С           |

Таблица 4 П.3

Данные списка NAMELIST с именем GM

| Идентификатор | Массив или переменная                                  | Пояснение                                    | Значение по умолчанию, размерность |
|---------------|--|--|------------------------------------|
| 1             | 2  | 3  | 4                                  |
| R1            | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10 | радиусы внутренних границ расчетных областей | 0. см                              |
| R2            | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10 | радиусы внешних границ расчетных областей    | 0. см                              |

Таблица 5 П.3

Данные списка NAMELIST с именем NE

| Идентификатор | Массив или переменная                                  | Пояснение   | Значение по умолчанию, размерность |
|---------------|--|---|------------------------------------|
| 1             | 2  | 3   | 4                                  |
| N             | одномерный массив целых чисел размерностью = 10        | число узлов пространственных сеток областей   | 1                                  |
| H1            | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10 | уменьшенные сеточные интервалы между парами крайних узлов обеих границ областей (H1=0 – сгущение сетки на границах отсутствует) | 0. см                              |
| EPS           | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10 | допустимые значения относительной погрешности в расчетах распределений температуры в узлах пространственной сетки (>=0,000001)  | 0.000001                           |



Таблица 6 П.3

Данные списка NAMELIST с именем HPR

| Идентификатор | Массив или переменная                                   | Пояснение  | Значение по умолчанию, размерность |
|---------------|---|--|------------------------------------|
| 1             | 2   | 3  | 4                                  |
| KPRS          | одномерный массив целых чисел размерностью = 10         | признаки расчета коэффициентов теплопроводности и теплоемкости твердых фаз (=1 – постоянные коэффициенты, равные QS и CS)  | 1                                  |
| KPRL          | одномерный массив целых чисел размерностью = 10         | признаки расчета коэффициентов теплопроводности и теплоемкости жидких фаз (=1 – постоянные коэффициенты, равные QL и CL)   | 1                                  |
| QS            | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10  | коэффициенты теплопроводности твердых фаз материалов топливного сердечника и оболочки и жидкой фазы теплоносителя  | 0. Вт/см/град                      |
| QL            | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10  | коэффициенты теплопроводности жидких фаз материалов топливного сердечника и оболочки   | 0. Вт/см/град                      |
| CS            | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10  | коэффициенты теплоемкости твердых фаз (при KPRS=1) материалов топливного сердечника и оболочки и жидкой фазы теплоносителя                                       | 0. Дж/г/град                       |
| CL            | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10  | коэффициенты теплоемкости жидких фаз материалов топливного сердечника и оболочки   | 0. Дж/г/град                       |
| DS            | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10  | плотности твердых фаз материалов топливного сердечника и оболочки и жидкой фазы теплоносителя  | 0. г/см**3                         |
| DL            | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10  | плотности жидких фаз материалов топливного сердечника и оболочки   | 0. г/см**3                         |
| E             | одномерный массив вещественных чисел размерностью = 10  | значения степени черноты поверхности материалов топливного сердечника и оболочки   | 1.                                 |
| TM            | двумерный массив вещественных чисел размерностью = 2*10 | температуры <=2 точек фазовых превращений на фазовых фронтах (при FRRM=T), либо нижняя и верхняя границы интервала температуры в двухфазной области (при FRRM=F) | 10000. град С                      |
| RM            | двумерный массив вещественных чисел размерностью = 2*10 | скрытая теплота фазовых превращений (для областей с FRRM=F используются элементы с первым индексом =1)   | 0. Дж/см**3                        |

Таблица 7 П.3

Данные списка NAMELIST с именем DWRIT

| Идентификатор | Массив или переменная                       | Пояснение  | Значение по умолчанию, размерность |
|---------------|---|--|------------------------------------|
| 1             | 2   | 3  | 4                                  |
| WR0           | переменная логического типа                 | признак печати начальных значений координат и температуры в узлах пространственной сетки                               | F                                  |
| NWR           | переменная вещественного типа               | кратность печати выходных значений (очередная печать через NWR шагов по времени от момента предыдущей печати)          | 1.E10                              |
| TWR           | массив вещественных чисел размерностью = 20 | моменты времени, для которых требуется печать выходных данных  | 1.E+10 сек                         |
| RSP           | переменная логического типа                 | признак ввода данных дополнительного алгоритма (списка NAMELIST с именем SP) в следующем варианте задания (при NVAR>1) | F                                  |

Таблица 8 П.3

Данные списка NAMELIST с именем SP

| Идентификатор | Массив или переменная         | Пояснение  | Значение по умолчанию, размерность |
|---------------|-------------------------------|--|------------------------------------|
| 1             | 2                             | 3  | 4                                  |
| QLB           | переменная вещественного типа | линейная мощность твэл в плоскости Z до блокировки TBC (не вводить, если заданы NQVZI>1, ZQVZI, QVZI)  | 0. Вт/см                           |
| QL            | переменная вещественного типа | линейная мощность твэл в плоскости Z после блокировки TBC (не вводить, если заданы NQVZI>1, ZQVZI, QVZI)   | 0. Вт/см                           |
| Z             | переменная вещественного типа | высотная координата от нижней плоскости активной зоны  | 0. см                              |
| HAZ           | переменная вещественного типа | высота активной зоны   | 0. см                              |
| QLBM          | переменная вещественного типа | максимальная линейная мощность твэл до блокировки TBC (для расчета программой QLB в плоскости Z – в соответствии со значениями QVZI при NQVZI>1) | 0. Вт/см                           |



## Введение

Тепло- и массоперенос в пористом тепловыделяющем слое имеет важное значение в рассмотрении запроектных аварий ядерных реакторов. Анализ аварии на АЭС "Три-Майл-Айленд" показал, что из обломков разрушенной активной зоны последовательно образовались две пористые области — в объеме активной зоны и на дне реакторного корпуса.

Необходимыми предпосылками для реализации требований, которые сформулированы для реакторов нового поколения, обладают натриевые реакторы на быстрых нейтронах. Проект реактора БН-800 за счет введения пассивных средств воздействия на реактивность, системы аварийного расхолаживания через воздушные теплообменники, поддона для расплавленной массы топлива выведен на уровень, соответствующий таким требованиям. Главным решением, обеспечившим качественно новый уровень безопасности, явилось исключение положительного натриевого пустотного эффекта реактивности. В техническом обосновании безопасности реактора БН-800 показано, что при запроектной аварии с потерей энергопитания без срабатывания всех средств воздействия на реактивность не происходит расплавления активной зоны, так как отрицательные обратные связи по реактивности даже в условиях кипения натрия приводят к снижению мощности. Тем не менее, несмотря на такие качества реактора БН-800, в проекте предусмотрен специальный поддон внутри корпуса реактора для удержания и охлаждения расплавленных компонентов активной зоны. Для обоснования работоспособности поддона требуется анализ теплоотвода от лежащего на нем тепловыделяющего слоя из фрагментов разрушенной активной зоны.

### 1. Цель работы

Практическое освоение методов расчетного анализа проектных и запроектных аварий, сопровождающихся плавлением материалов в активной зоне ядерного реактора.

### 2. Описание основных процессов при запроектной аварии

Первоначально в исследованиях процессов, сопровождающихся тяжелыми повреждениями активной зоны, основное внимание уделялось реакторам на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. После аварии на АЭС "Три-Майл-Айленд" такие исследования стали интенсивно проводиться и для водоохлаждаемых реакторов. После указанной аварии и аварии на Чернобыльской АЭС особую актуальность приобрели маловероятные запроектные аварии. Анализ результатов исследований применительно к любому типу ядерных реакторов также важен для понимания аварийных процессов, протекающих в реакторах иного типа, поскольку дает дополнительную информацию.

В быстром реакторе с натриевым теплоносителем к запроектным авариям принято относить следующие типы аварий (все без срабатывания аварийной защиты): неконтролируемое увеличение мощности (UTOP), прекращение расхода теплоносителя через реактор (ULOF), прекращение теплоотвода (ULOHs),



распространение аварии в отдельных ТВС на всю активную зону. Возможны другие аварии или их комбинации, но названные включают в себя весь спектр физических явлений процесса развития аварии. Основное различие типов запроектных аварий состоит в инициирующих их событиях и последовательности протекания физических процессов на начальной стадии. Общей методологии анализа различных физических явлений при авариях быстрых реакторов были посвящены некоторые главы книг [1-4].

В водоохлаждаемых реакторах основными запроектными авариями считаются: аварии с потерей теплоносителя и аварии с возрастанием мощности. Методология анализа аварийных процессов в тепловых водоохлаждаемых реакторах рассматривается в книгах [5, 6].

Многие физические процессы характерны как для тяжелой аварии в быстром реакторе, так будут иметь место (со специфическими особенностями) и при тяжелых авариях в водоохлаждаемых реакторах. Для водоохлаждаемых реакторов специфичны механизмы разрушения твэлов, такие как эвтектическое (контактное) плавление и охрупчивание оболочки вследствие окисления.

В начале аварии с прекращением расхода теплоносителя в быстром реакторе активная зона сохраняет свою конфигурацию. На начальной стадии начинается кипение натрия в отдельных тепловыделяющих сборках, в это время может произойти разгерметизация твэлов и деформация их оболочек под действием газовых продуктов деления и паров натрия. Если не произойдет достаточного уменьшения мощности за счет отрицательной обратной связи, сохраняющееся несоответствие между энерговыделением и теплоотводом приведет к полному испарению натрия, начнется расплавление активной зоны, а затем — кипение расплавленной смеси топлива и металла оболочек. Этот этап аварии называется переходным, поскольку конфигурация активной зоны полностью нарушена, однако разрушения ее пока не произошло.

Разработка новой конструкции активной зоны реактора БН-800 с отрицательным или близким к нулю натриевым пустотным эффектом реактивности исключает быстрый рост реактивности с началом кипения теплоносителя. В анализе аварии с прекращением расхода теплоносителя через реактор, вызванным потерей энергопитания, без срабатывания всех средств воздействия на реактивность показано, что первоначальное вскипание натрия происходит на выходе из зоны среднего обогащения топлива (ЗСО). Паронатриевая смесь распространяется в натриевую полость и верхний торцевой экран, вызывая отрицательные эффекты реактивности, падение мощности и прекращение кипения. Мощность при этом опять увеличивается и натрий снова вскипает, теперь уже на выходе ЗСО и центральной части ЗМО. И вновь перемещение пара приводит к отрицательным эффектам реактивности, падению мощности и прекращению кипения. В реакторе устанавливаются автоколебания мощности с периодическими вскипаниями теплоносителя. Мощность при этом колеблется на 10-12 % и постепенно снижается. Температура топлива в центре твэлов падает во всех подзонах с самого начала процесса. Таким образом, плавления стали и топлива в активной зоне не происходит. Топливные элементы теряют герметичность. Теплоотвод от активной зоны осуществляется кипящим натрием. Через некото-



рое время после снижения мощности остаточного энерговыделения кипение натрия прекратится. Однако оно может быть прекращено еще раньше за счет управления аварийей.

Однако полностью исключить вероятность плавления части активной зоны пока невозможно. В рассмотрении развития аварии на стадии кипения натрия имеется неопределенность, обусловленная недостаточной изученностью процессов при кипении жидкометаллических теплоносителей, что допускает возможность развития аварии, сопровождающегося осушением отдельных участков твэлов от жидкого теплоносителя. На этих участках будет расти температура оболочек и топлива с последующим их плавлением. Это делает необходимым рассмотрение последующих стадий аварии. Такое рассмотрение требуется для выработки и обоснования требуемых нормативными документами организационных и технических мер по управлению аварией и, в конечном итоге, локализации фрагментов разрушенной активной зоны при самом неблагоприятном развитии аварии. Для получения исходных данных для рассмотрения последних стадий аварии необходим анализ начальной и переходной стадий при консервативной предпосылке относительно кипения натрия. Важное значение при этом в оценках масштабов повреждений в активной зоне на переходной стадии аварии приобретает корректный учет положительных эффектов реактивности в результате перемещения конструкционного материала (оболочек твэлов) и топлива.

Последующее развитие аварии с расплавлением активной зоны связывают с перемещением расплавленной тепловыделяющей массы к днищу реакторного корпуса. В водоохлаждаемых реакторах при запроектной аварии с потерей теплоносителя расплавленная тепловыделяющая масса (кориум) способна изливаться на днище корпуса большой жидкой струей, как это и произошло в аварии на станции ТМІ-2. Проникновение расплава в количестве почти 20 т в нижнюю часть корпуса в данной аварии произошло двумя путями в течение 1-2 мин. В конструкции быстрого реактора с жидкометаллическим теплоносителем при вышеопределенных типах запроектных аварий отсутствуют условия для подобного быстрого проникновения тепловыделяющей массы из активной зоны на поддон, поскольку жидкий теплоноситель сохраняется внутри реакторного корпуса. Поэтому в случае попадания расплава в возможный канал (например, в гильзы чехлов СУЗ) только ограниченное его количество в виде твердых фрагментов может проникать через такой канал. Основанием для данного вывода могут служить результаты экспериментов TERMOS на установке FARO, в которых 100 кг расплава диоксида урана было вылито со скоростью 10 м/с в 130 кг натрия, содержащегося в трубе диаметром 28 см и длиной 2,5 м. Длина проникновения расплава в натрий в данных экспериментах не превысила 1 м.

Образующиеся в результате перемещения и затвердевания расплавленного материала оболочек твэлов первоначальные стальные блокировки каналов для прохода теплоносителя под активной зоной некоторое время препятствуют течению жидкого топлива вниз и образуют твердое основание для тепловыделяющего бассейна. Такие же блокировки образуются и в зазорах между чехла-



ми ТВС. Для перемещения жидкого топлива в узких каналах требуется сначала расплавление материалов в области нижних блокировок. После остановки реактора это возможно в случае недостаточного теплоотвода к окружающим ТВС от вышележащей тепловыделяющей массы. При проплавлении блокировки расплав будет затекать под действием силы тяжести в каналы между еще твердыми частями твэлов на некоторую длину, затвердевая там и снова образуя слой блокировок. В результате, процесс продвижения расплавленной тепловыделяющей массы вниз будет иметь, как представляется, не плавный, а прерывистый характер и будет состоять из ряда повторяющихся этапов: проплавление заблокированного слоя, затекание расплава на некоторую длину и затвердевание, проплавление следующего заблокированного слоя и т.д. При этом основное время будет затрачиваться на проплавление материалов конструкций под опускающейся тепловыделяющей массой. Глубина проникновения расплава в каналы составляет не более нескольких десятков см, а временной масштаб процессов течения и затвердевания — менее 1 с, что крайне мало по сравнению со временем, требующимся для расплавления очередного заблокированного слоя. Значительно сокращает длину проникновения возможное наличие твердых частиц в расплаве. Время движения расплавленной массы из активной зоны до поддона определяет уровень остаточного тепловыделения в топливе на поддоне.

Температурное поле и фазовое состояние компонентов внутри слоя фрагментов на поддоне представляют интерес в плане оценок степени повышения температуры поддона за счет теплового потока к его поверхности от слоя. Весьма высокие значения температуры могут вызвать высокие термические напряжения в конструкции сверх предельных значений, которые снижаются с ростом температуры, что может вызвать разрушение поддона. В случае расплавления части топлива в слое появится опасность проникновения расплава топлива непосредственно на поддон.

### 3. Описание расчетной методики

Рассмотрим насыпной тепловыделяющий слой из равномерно распределенных частиц топлива разрушенной активной зоны, лежащий на горизонтальной плите (поддоне) и находящийся в объеме жидкого теплоносителя. Теплоноситель находится и внутри слоя, заполняя промежутки между частицами, а также под плитой. Высота слоя намного меньше горизонтальных размеров, что позволяет в данном рассмотрении пренебречь теплоотводом в горизонтальном направлении, т.е. считать его одномерным. Примем, что слой по своим нейтронно-физическим характеристикам образует подкритическую конфигурацию и поэтому плотность тепловыделения в нем соответствует уровню остаточного тепловыделения. Мощность остаточных тепловыделений в топливных частицах зависит от времени, прошедшего после потери критичности активной зоны.

Экспериментальные исследования показывают, что основной тепловой поток от насыпного тепловыделяющего слоя направлен вверх к теплоносителю, покрывающему осколки. В тонком слое тепло передается за счет теплопровод-



ности и конвекции. Если толщина и/или плотность тепловыделения достаточно велики, температура теплоносителя, находящегося в непосредственном контакте с топливными частицами, достигнет точки кипения в части слоя. При этом пузырьки паров будут выноситься из зоны кипения. При недостаточно эффективном охлаждении топливных фрагментов может наступить осушение части слоя. Осушение происходит по причине наступления кризиса теплоотдачи, когда скорость генерации паров теплоно-

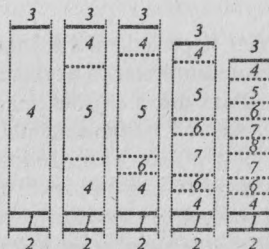


Рис.1. Характерные состояния пористого насыпного слоя: 1 – плита; 2, 3 – жидкий теплоноситель; 4 – зоны слоя с жидким теплоносителем; 5 – зона с кипящим теплоносителем; 6 – осушенная зона; 7 – зона расплава топлива; 8 – условная зона паров топлива

сителя становится выше, чем скорость притока жидкости в кипящий слой. Одним из важных результатов опытов, например, в D-серии реакторных экспериментов, проведенных в лаборатории Sandia (США), явилось то, что зона осушения от теплоносителя при отсутствии входящего снизу потока жидкости появляется в нижней части зоны с двухфазным (кипящим) теплоносителем. Может наступить расплавление части слоя в осушенной зоне, в которой температура топлива может, в свою очередь, достичь точки кипения. Из-за уплотнения топлива в зоне его плавления происходит оседание слоя за счет исчезновения исходной пористой структуры.

Расчетные схемы пористого насыпного слоя при разных характерных состояниях, отличающихся между собой агрегатным состоянием компонентов по его высоте и определяющихся плотностью тепловыделения в топливных частицах, толщиной слоя, температурой окружающего теплоносителя и рядом других факторов, показаны на рис. 1. При адиабатических условиях на нижней поверхности слоя зона с кипящим теплоносителем будет простираться до низа слоя. В случае расплавления части топлива в осушенной от теплоносителя зоне высота насыпного слоя уменьшается из-за оседания.

В последующем тексте приводится описание одномерной математической модели поля температуры в насыпном слое. Из дифференциального уравнения теплопроводности с системой граничных условий получены явные аналитические выражения для распределения температуры по высоте слоя и размеров характерных зон с однородным составом (размерами частиц, пористостью) при постоянной плотности тепловыделения в топливе и постоянных (усредненных по температуре каждой зоны) значениях коэффициентов теплопроводности компонентов слоя.

### 1. Поле температуры в слое с жидким теплоносителем

Поле температуры в тепловыделяющей пористой среде с жидким теплоносителем описывается в принятой одномерной формулировке следующим стационарным уравнением теплопроводности:



$$\frac{\partial}{\partial z} [\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T(z)}{\partial z}] + q_v = 0, \quad (1)$$

где  $z$  – координата (начало координаты – внизу слоя);  $T$  – температура;  $\lambda_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент теплопроводности среды;  $q_v$  – плотность тепловыделения единицы объема среды. В данном уравнении  $q_v = (1 - \epsilon) \eta \rho_T q_T$ , где  $\epsilon$  – пористость среды (объемная доля пространства между твердыми частицами);  $\eta$  – объемная доля топливных частиц;  $\rho_T$  – плотность топлива;  $q_T$  – плотность тепловыделения топлива (единицы массы).

Для вычисления эффективных коэффициентов теплопроводности среды из твердых частиц и жидкого теплоносителя существует ряд формул: для параллельной и последовательной проводимости, формула Maxwell'a, формула Lichtenecker'a. Наилучшее соответствие экспериментальным данным дает использование формулы Kampf'a и Karsten'a:

$$\lambda_{\text{эф0}} = \lambda_c \left\{ 1 - \epsilon_d^{2/3} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \epsilon_d^{1/3} (\lambda_c / \lambda_d - 1)} \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности сплошной среды;  $\lambda_d$  – коэффициент теплопроводности несплошной среды;  $\epsilon_d$  – объемная доля несплошной среды.

Для зон с жидким теплоносителем  $\lambda_c = \lambda_{Na}$ ,  $\lambda_d = \lambda_T$ ,  $\epsilon_d = 1 - \epsilon$ , где  $\lambda_{Na}$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя;  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности топлива. Поскольку  $\lambda_T$  и  $\lambda_{Na}$  зависят от температуры, их значения принимаются при температуре, равной средней температуре в слое:

$$\bar{T} = (T^{\min} + T^{\max}) / 2 \quad \text{при } T^{\max} < T_s;$$

$$\bar{T} = (T^{\min} + T_s) / 2 \quad \text{при } T^{\max} > T_s,$$

где  $T_s$  – температура насыщения теплоносителя.

Вклад естественной конвекции в теплообмен в насыпном слое учитывается в величине эффективного коэффициента теплопроводности. Соответствующая поправка, выражаемая числом Нуссельта ( $Nu$ ), на которое умножается  $\lambda_{\text{эф0}}$ , связывается с внутренним числом Рэлея ( $Ra$ ) эмпирической формулой, соответствующей данным экспериментов D2 и D3 с натриевым теплоносителем:

$$Nu = (Ra / 0,76)^{0,34}, \quad (3)$$

$$\text{где } Ra = \frac{\lambda_{Na} g \rho_{Na} \beta_{Na} P q_v H_b^3}{2 \lambda_{\text{эф0}}^2 \alpha_{Na} \mu_{Na}}; \quad P = \frac{d_T^2}{150} \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2};$$

$g$  – гравитационное ускорение;  $\rho_{Na}$  – плотность жидкого теплоносителя;  $\beta_{Na}$  – термический коэффициент объемного расширения теплоносителя;  $P$  – проницаемость пористой среды;  $H_b$  – толщина насыпного слоя;  $\alpha_{Na}$  – коэффициент температуропроводности теплоносителя;  $\mu_{Na}$  – коэффициент динамической



вязкости теплоносителя;  $d_T$  – диаметр частиц топлива. Термический коэффициент объемного расширения теплоносителя можно рассчитать по данным зависимости плотности от температуры ( $\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t}$ ). Критическое число Рэлея, определяемое как число, с которого начинается конвекция ( $Nu > 1$ ), равно 0,76.

Эффективный коэффициент теплопроводности с учетом конвекции  $\lambda_{эф} = \lambda_{эф0} Nu$ . (4)

Уравнение (1) дополняется системой граничных условий (ГУ).

На нижней и верхней границах слоя принимаются ГУ третьего рода:

$$-\lambda_{эф} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=0+} = -\alpha_{1эф} (T_{b1} - T_1); \quad (5)$$

$$-\lambda_{эф} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=H_b-} = \alpha_2 (T_{b2} - T_2), \quad (6)$$

где  $\alpha_{1эф} = (1/\alpha_1 + \delta_{п}/\lambda_{п} + \delta_{об}/\lambda_{об})^{-1}$ ;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи к теплоносителю под поддоном;  $\delta_{п}$  – толщина плиты поддона;  $\lambda_{п}$  – коэффициент теплопроводности материала плиты;  $\delta_{об}$  – толщина тугоплавкой обечайки на плите;  $\lambda_{об}$  – коэффициент теплопроводности материала обечайки;  $T_{b1}$  – температура низа слоя;  $T_1$  – температура теплоносителя под поддоном;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи к теплоносителю над слоем;  $T_{b2}$  – температура верха слоя;  $T_2$  – температура теплоносителя над слоем.

Теплоотдача от нижней поверхности поддона к нижележащему объему теплоносителя (натрия) определяется соотношением

$$Nu_1 = f(Pr) Ra_1^{0,25}, \quad (7)$$

$$\text{где } Ra_1 = \frac{c_{Na} g \rho_{Na}^2 \beta_{Na} (D_b/2)^3 \Delta T_1}{\lambda_{Na} \mu_{Na}}; \Delta T_1 = T_{п1} - T_1; Nu_1 = \alpha_1 (D_b/2) / \lambda_{Na};$$

$c_{Na}$  – удельная теплоемкость теплоносителя;  $D_b$  – диаметр поддона;  $T_{п1}$  – температура нижней поверхности поддона;  $f(Pr)$  – коэффициент;  $Pr$  – число Прандтля;  $f(Pr) = 0,1847; 0,2917; 0,449; 0,581; 0,597; 0,645; 0,651; 0,651$  при  $Pr = 0,001; 0,01; 0,1; 0,7; 1; 10; 100; 1000$  соответственно.

$$\text{Теплоотдача от верха слоя к вышележащему объему теплоносителя (натрия)} \\ Nu_2 = 0,0785 Ra_2^{0,32}, \quad (8)$$

$$\text{где } Ra_2 = \frac{c_{Na} g \rho_{Na}^2 \beta_{Na} D_b^3 \Delta T_2}{\lambda_{Na} \mu_{Na}}; \Delta T_2 = T_{b2} - T_2; Nu_2 = \alpha_2 D_b / \lambda_{Na}.$$

Решение уравнения (1) при постоянном  $\lambda_{эф}$  с условиями (5) и (6) дает следующие формулы для расчета распределения температуры по высоте слоя:

— в нижней части ( $0 \leq z \leq z^*$ )

$$T(z) = T_{b1} + \frac{\alpha_{1\text{эф}}(T_{b1} - T_1)}{\lambda_{\text{эф}}}z - \frac{q_v}{2\lambda_{\text{эф}}}z^2; \quad (9)$$

— в верхней части ( $z^* \leq z \leq H_b$ )

$$T(z) = T_{b2} + \frac{\alpha_2(T_{b2} - T_2)}{\lambda_{\text{эф}}}(H_b - z) - \frac{q_v}{2\lambda_{\text{эф}}}(H_b - z)^2, \quad (10)$$

где  $z^*$  — координата максимума температуры в слое.

Для стационарной задачи справедливы следующие соотношения баланса на границах слоя:

$$q_v z^* = \alpha_{1\text{эф}}(T_{b1} - T_1); \quad q_v(H_b - z^*) = \alpha_2(T_{b2} - T_2), \quad (11)$$

из которых получим формулы для температуры на границах слоя:

$$T_{b1} = T_1 + \frac{q_v z^*}{\alpha_{1\text{эф}}}; \quad T_{b2} = T_2 + \frac{q_v(H_b - z^*)}{\alpha_2}, \quad (12)$$

а из соотношения баланса

$$q_v z^* = \alpha_1(T_{\text{пл}} - T_1) \quad (13)$$

получим формулу для температуры на нижней поверхности поддона

$$T_{\text{пл}} = T_1 + \frac{q_v z^*}{\alpha_1}. \quad (14)$$

Формулы для расчета распределения температуры по высоте поддона:

— в плите ( $-(\delta_{\text{об}} + \delta_{\text{п}}) \leq z \leq -\delta_{\text{об}}$ )

$$T(z) = T_{\text{пл}} + \frac{q_{s1}}{\lambda_{\text{п}}}(\delta_{\text{об}} + \delta_{\text{п}} + z); \quad (15)$$

— в туполавкой обечайке ( $-\delta_{\text{об}} \leq z \leq 0$ )

$$T(z) = T_{\text{об1}} + \frac{q_{s1}}{\lambda_{\text{об}}}(\delta_{\text{об}} + z), \quad (16)$$

где  $q_{s1}$  — плотность потока от низа слоя;  $q_{s1} = q_v z^*$ ;  $T_{\text{об1}} = T_{\text{пл}} + q_{s1}\delta_{\text{п}}/\lambda_{\text{п}}$ .

На основании выражений (9) и (10) с учетом (12) получим формулу для определения координаты максимума температуры:

$$z^* = \frac{T_2 - T_1 + q_v(1/\alpha_2 + H_b/2\lambda_{\text{эф}})H_b}{q_v(1/\alpha_{1\text{эф}} + 1/\alpha_2 + H_b/\lambda_{\text{эф}})}. \quad (17)$$

Поскольку  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  зависят от температуры (определяются зависимостями (7) и (8) соответственно) и  $\lambda_{\text{эф}}$  зависит от температуры, координата  $z^*$  находится в результате нескольких итераций. На первой итерации принимаются начальные значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , равные  $\lambda_{\text{Na}}/\delta_{\text{Na}}$ , где  $\delta_{\text{Na}}$  — толщина подслоя теплоносителя, задаваемая из физических соображений. При вычислении начального значения  $\lambda_{\text{эф}}$  значение  $T^{\text{min}}$  рассчитывается по формуле (12) при  $z^* = H_b/2$ , а  $T^{\text{max}}$  принимается равным  $T^{\text{min}}$ . В каждой из последующих итераций рассчиты-



ваются уточненные значения  $T^{\min}$  по формулам (12) и  $T^{\max}$  по формуле (9).

После определения  $z^*$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_{1\text{эф}}$ ,  $\alpha_2$  и  $\lambda_{\text{эф}}$  находится распределение температуры по высоте слоя по формулам (9) и (10) с учетом (12), по высоте поддона по формулам (15) и (16) с учетом (14).

## 2. Поле температуры в слое с жидким и кипящим теплоносителем

Если значения температуры в слое превышают температуру кипения теплоносителя  $T_s$ , выполняется следующий этап расчетов: определяются координаты зоны с двухфазным (кипящим) теплоносителем и уточняется распределение температуры.

Для описания поля температуры в нижней и верхней зонах с жидким теплоносителем используется уравнение (1). В зоне с кипящим теплоносителем расчет значений температуры не производится, она просто принимается равной температуре насыщения во всей данной зоне.

Система граничных условий (5) и (6) дополняется условиями на фазовых границах (стационарных) зон с жидким теплоносителем с кипящей зоной, на которых принимаются ГУ теплообмена второго рода. При этом на границе нижней зоны с кипящей зоной принимается нулевая плотность теплового потока, а на границе верхней жидкой зоны с кипящей — плотность теплового потока  $q_{\text{скип}}$ , равная суммарному тепловыделению зоны кипения теплоносителя в объеме столбика под единичной поверхностью данной границы. Соответственно ГУ записываются в виде:

— на границе нижней зоны с жидким теплоносителем с кипящей зоной

$$-\lambda_{\text{эф}} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=h_{\text{Na}1}} = 0; \quad (18)$$

$$T(z = h_{\text{Na}1}) = T_s; \quad (19)$$

— на границе верхней зоны с жидким теплоносителем с кипящей зоной

$$-\lambda_{\text{эф}} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=(H_b - h_{\text{Na}2})_+} = q_{\text{скип}}; \quad (20)$$

$$T(z = H_b - h_{\text{Na}2}) = T_s, \quad (21)$$

где  $h_{\text{Na}1}$  — толщина нижней зоны с жидким теплоносителем;  $h_{\text{Na}2}$  — толщина верхней зоны с жидким теплоносителем;  $q_{\text{скип}} = q_v h_{\text{кип}}$ ;  $h_{\text{кип}}$  — толщина зоны с кипящим теплоносителем.

С учетом условий (18) и (20) будут справедливы для стационарной задачи соотношения баланса на границах слоя:

$$q_v h_{\text{Na}1} = \alpha_{1\text{эф}} (T_{b1} - T_1); \quad q_v (H_b - h_{\text{Na}1}) = \alpha_2 (T_{b2} - T_2), \quad (22)$$

из которых получим формулы для температуры на границах слоя:

$$T_{b1} = T_1 + \frac{q_v h_{\text{Na}1}}{\alpha_{1\text{эф}}}; \quad T_{b2} = T_2 + \frac{q_v (H_b - h_{\text{Na}1})}{\alpha_2}, \quad (23)$$

а из соотношения баланса

$$q_v h_{Na1} = \alpha_1 (T_{n1} - T_1) \quad (24)$$

получим формулу для температуры на нижней поверхности поддона:

$$T_{n1} = T_1 + \frac{q_v h_{Na1}}{\alpha_1} \quad (25)$$

На основании выражений (9) и (10) с учетом (23), соотношений баланса (22) и условий (19) и (21) получены формулы для размеров зон с жидким теплоносителем:

— толщина нижней зоны

$$h_{Na1} = -\frac{\lambda_{эф}}{\alpha_{1эф}} + \left[ \left( \frac{\lambda_{эф}}{\alpha_{1эф}} \right)^2 + \frac{2\lambda_{эф}}{q_v} (T_s - T_1) \right]^{1/2}; \quad (26)$$

— толщина верхней зоны

$$h_{Na2} = \frac{q_{s2}}{q_v} - \left[ \left( \frac{q_{s2}}{q_v} \right)^2 - \frac{2\lambda_{эф}}{q_v} \left( T_s - T_2 - \frac{q_{s2}}{\alpha_2} \right) \right]^{1/2}, \quad (27)$$

где  $q_{s2} = q_v (H_b - h_{Na1})$  — плотность теплового потока к теплоносителю над слоем.

Если в верхней зоне  $Ra > 0,76$ , где  $Ra = \frac{\lambda_{Na} g \rho_{Na} \beta_{Na} P q_v h_{Na2}^3}{2\lambda_{эф0}^2 \alpha_{Na} \mu_{Na}}$ , то

$\lambda_{эф} = \lambda_{эф0} Nu$ , где значения  $Nu$  рассчитываются по формуле (3). При вычислении  $\lambda_{эф}$  в зонах с жидким теплоносителем значения  $\lambda_t$  и  $\lambda_{Na}$  принимаются при температуре, равной средней температуре в каждой зоне —  $\bar{T} = (T^{\min} + T_s)/2$ .

Толщина зоны с кипящим теплоносителем

$$h_{кип} = H_b - h_{Na1} - h_{Na2} \quad (28)$$

Размеры зон с жидким теплоносителем находятся в результате итераций, поскольку  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\lambda_{эф}$  зависят от температуры. На первой итерации принимаются начальные значения  $\alpha_1$ ,  $\alpha_{1эф}$ ,  $\alpha_2$  и  $\lambda_{эф}$ , рассчитанные на предыдущем этапе (до учета кипящей зоны).

После определения  $h_{Na1}$  и  $h_{Na2}$  находятся распределения температуры по высоте зон с жидким теплоносителем по формулам (9) и (10) с учетом (23), по высоте поддона по формулам (15) и (16), в которых  $q_{s1} = q_v h_{Na1}$ , с учетом (25).

### 3. Поле температуры в слое с осушенной зоной

Если плотность теплового потока от кипящей зоны превышает некоторую критическую величину, рассчитываемую по одной из известных формул, выполняется следующий этап расчетов: определяются координаты осушенной зоны и находится распределение температуры в осушенной зоне.

В используемой модели критическая плотность теплового потока при диа-



метре топливных частиц  $d_T < 1$  мм определяется по формуле

$$q_{кр} = q_0 (1 + L_c / H), \quad (29)$$

$$\text{где } q_0 = \frac{(\rho_{Na} - \rho_{vNa}) g P R_{кип}^{Na}}{\frac{v_{vNa}}{1 - 1,1s} - \frac{v_{Na}}{s^3}}; \quad L_c = \frac{\sigma_{Na} (\epsilon / P)^{1/2}}{\sqrt{5} (\rho_{Na} - \rho_{vNa}) g};$$

$$s = \left[ 0,833 \frac{v_{Na}}{v_{vNa}} + \left( 2,7 \frac{v_{Na}}{v_{vNa}} \right)^{1/2} \right]^{1/2} - \left( 0,833 \frac{v_{Na}}{v_{vNa}} \right)^{1/2};$$

$$P = \frac{d_T^2}{180} \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2}; \quad H = h_{кип};$$

$\rho_{vNa}$  – плотность паров теплоносителя;  $v_{Na}$  – коэффициент кинематической вязкости теплоносителя;  $v_{vNa}$  – коэффициент кинематической вязкости паров теплоносителя;  $R_{кип}^{Na}$  – скрытая теплота парообразования теплоносителя;  $\sigma_{Na}$  – поверхностное натяжение теплоносителя.

Толщина осушенной зоны  $h_{dr}$  в случае обнаружения критических условий рассчитывается (при использовании нуль-мерной модели осушения) из

$$h_{dr} = h_{кип0} - h_{кип}^{кр}, \quad (30)$$

где  $h_{кип0}$  – толщина зоны с кипящим теплоносителем, рассчитанная на предыдущем этапе (до учета осушенной зоны);  $h_{кип}^{кр}$  – критическая толщина зоны с кипящим теплоносителем, которая может приближенно определяться из следующего простого соотношения:

$$h_{кип}^{кр} = q_{кр} / q_v. \quad (31)$$

Уравнение (1) используется для описания поля температуры и в осушенной зоне.

Для расчета эффективного коэффициента теплопроводности в осушенной зоне  $\lambda_{эф0}^{dr}$  используется формула (2). В настоящей модели принимается  $\lambda_c = \lambda_T$ ,  $\lambda_d = \lambda_{vNa}$ ,  $\epsilon_d = \epsilon$ , где  $\lambda_{vNa}$  – коэффициент теплопроводности паров теплоносителя, что будет справедливо для условий, когда частицы топлива спекаются между собой при высокой температуре в зоне, теплопроводность такой среды выше. Поскольку  $\lambda_T$  и  $\lambda_{vNa}$  зависят от температуры (а  $\lambda_{vNa}$  и от давления), их значения принимаются при температуре, равной средней температуре в осушенной зоне:  $\bar{T}_{dr} = (T_s + T_{dr}^{max}) / 2$  при  $T_{dr}^{max} < T_{пл}$ ;  $\bar{T}_{dr} = (T_s + T_{пл}) / 2$  при  $T_{dr}^{max} > T_{пл}$ ;  $T_{пл}$  – температура плавления топлива.

Вклад лучистой составляющей в перенос тепла в сухой зоне учитывается за счёт добавки к величине эффективного коэффициента теплопроводности, рассчитываемой по формуле

$$\Delta\lambda_r = 4\sigma e(1/(1-\epsilon)-1) d_r (\bar{T}_{dr} + 273)^3, \quad (32)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $e$  – степень черноты поверхностей частиц.

Эффективный коэффициент теплопроводности с учетом излучения

$$\lambda_{эф}^{dr} = \lambda_{эф0}^{dr} + \Delta\lambda_r. \quad (33)$$

Система граничных условий, записанная на предыдущем этапе (до учета осушенной зоны), изменяется. При этом, вместо условий (18) и (19) (на границе нижней жидкой зоны с кипящей), записываются ГУ теплообмена четвертого рода на фазовой границе (стационарной) нижней жидкой зоны с осушенной зоной. Система дополняется ГУ первого рода на фазовой границе (стационарной) осушенной зоны с кипящей зоной. Соответственно ГУ записываются в виде:

– на границе нижней зоны с жидким теплоносителем с осушенной зоной

$$\lambda_{эф} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=h_{Na1}} = \lambda_{эф}^{dr} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=h_{Na1}+}; \quad (34)$$

$$T(z=h_{Na1})=T_s; \quad (35)$$

– на границе осушенной зоны с кипящей зоной

$$T(z=h_{Na1}+h_{dr})=T_s. \quad (36)$$

При физическом условии непрерывности теплового потока на верхней границе осушенной зоны величина плотности потока от нее к кипящей зоне

$$q_{sdr} = -\lambda_{эф}^{dr} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=(h_{Na1}+h_{dr})} \quad (37)$$

учитывается в величине плотности потока от кипящей зоны к верхней зоне с жидким теплоносителем, т.е. в условии (20):

$$q_{скип} = q_v h_{кип} + q_{sdr}, \quad (38)$$

где  $h_{кип}$  – толщина зоны с кипящим теплоносителем (пересчитанная с учетом осушенной зоны и равная  $h_{кип}^{кр}$ ).

Для стационарной задачи на нижней и верхней границах осушенной зоны будут справедливы соотношения баланса:

$$\lambda_{эф}^{dr} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=h_{Na1}+} = q_v (z_{dr}^* - h_{Na1}); \quad (39)$$

$$-\lambda_{эф}^{dr} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=(h_{Na1}+h_{dr})} = q_v (h_{Na1} + h_{dr} - z_{dr}^*), \quad (40)$$

где  $z_{dr}^*$  – координата максимума температуры в осушенной зоне.

Решение уравнения (1) при постоянном  $\lambda_{эф}^{dr}$  с условиями (35) и (39), (36) и (40) дает формулу для расчета координаты максимума температуры (находится на половине высоты зоны):



$$z_{dr}^* = h_{Na1} + h_{dr}/2 \quad (41)$$

и формулы для распределения температуры в осушенной зоне:

– в нижней части ( $h_{Na1} \leq z \leq z_{dr}^*$ )

$$T_{dr}(z) = T_s + \frac{q_v h_{dr}}{2\lambda_{эф}} (z - h_{Na1}) - \frac{q_v}{2\lambda_{эф}} (z - h_{Na1})^2; \quad (42)$$

– в верхней части ( $z_{dr}^* \leq z \leq (h_{Na1} + h_{dr})$ )

$$T_{dr}(z) = T_s + \frac{q_v h_{dr}}{2\lambda_{эф}} (h_{Na1} + h_{dr} - z) - \frac{q_v}{2\lambda_{эф}} (h_{Na1} + h_{dr} - z)^2. \quad (43)$$

Максимальная температура в осушенной зоне

$$T_{dr}^{\max} = T_s + \frac{q_v h_{dr}^2}{8\lambda_{эф}}. \quad (44)$$

Поскольку условия на фазовых границах нижней и верхней зон с жидким теплоносителем изменились, их размеры и распределения температуры в них пересчитываются.

С учетом условий (34) и (20), соотношений (39), (38), (37), (40) и (41) будут справедливы для стационарной задачи соотношения баланса на границах слоя:

$$q_v \left( h_{Na1} + \frac{h_{dr}}{2} \right) = \alpha_{1эф} (T_{b1} - T_1); \quad q_v \left( H_b - h_{Na1} - \frac{h_{dr}}{2} \right) = \alpha_2 (T_{b2} - T_2), \quad (45)$$

из которых получим формулы для температуры на границах слоя:

$$T_{b1} = T_1 + \frac{q_v}{\alpha_{1эф}} \left( h_{Na1} + \frac{h_{dr}}{2} \right); \quad T_{b2} = T_2 + \frac{q_v}{\alpha_2} \left( H_b - h_{Na1} - \frac{h_{dr}}{2} \right), \quad (46)$$

а из соотношения баланса

$$q_v \left( h_{Na1} + \frac{h_{dr}}{2} \right) = \alpha_1 (T_{n1} - T_1) \quad (47)$$

получим формулу для температуры на нижней поверхности поддона

$$T_{n1} = T_1 + \frac{q_v}{\alpha_1} \left( h_{Na1} + \frac{h_{dr}}{2} \right). \quad (48)$$

На основании выражения (9) с учетом (46), соотношения баланса (45) и условия (35) получена формула для толщины нижней зоны с жидким теплоносителем при наличии осушенной зоны:

$$h_{Na1} = - \left( \frac{\lambda_{эф}}{\alpha_{1эф}} + \frac{h_{dr}}{2} \right) + \left[ \left( \frac{\lambda_{эф}}{\alpha_{1эф}} + \frac{h_{dr}}{2} \right)^2 + \frac{2\lambda_{эф}}{q_v} \left( \frac{q_v}{\alpha_{1эф}} \frac{h_{dr}}{2} + T_s - T_1 \right) \right]^{1/2}. \quad (49)$$

Для толщины верхней зоны с жидким теплоносителем справедлива формула (27), в которой

$$q_{s2}=q_v(H_b-h_{Na1}-h_{dr}/2). \quad (50)$$

Уточненные размеры зон с жидким теплоносителем находятся в результате итераций. На первой итерации принимаются начальные значения  $\alpha_1$ ,  $\alpha_{1\text{эф}}$ ,  $\alpha_2$  и  $\lambda_{\text{эф}}$ , рассчитанные на предыдущем этапе (до учета осушенной зоны). На каждой итерации сначала определяется  $h_{Na1}$  по формуле (49), затем уточняются  $h_{dr}$  и  $h_{\text{кип}}$  из условия  $h_{Na1}+h_{dr}=\text{const}$  (т.е. координата границы осушенной зоны с кипящей зоной принимается фиксированной), далее с учетом последних значений  $h_{dr}$  и  $h_{Na1}$  определяется  $h_{Na2}$  по формуле (27) с учетом (50). После определения  $h_{Na1}$  и  $h_{Na2}$  находятся распределения температуры по высоте зон с жидким теплоносителем по формулам (9) и (10) с учетом (46), по высоте поддона по формулам (15) и (16), в которых  $q_{s1}=q_v(h_{Na1}+h_{dr}/2)$ , с учетом (48).

Эффективный коэффициент теплопроводности в осушенной зоне  $\lambda_{\text{эф}}^{dr}$  находится в результате итераций, в которых  $T_{dr}^{\text{max}}$  рассчитывается по формуле (44). На первой итерации принимается начальное значение  $\lambda_{\text{эф}}^{dr}$ , равное  $\lambda_{\text{эф}}$  в зоне с жидким теплоносителем. После определения  $\lambda_{\text{эф}}^{dr}$  находится распределение температуры в осушенной зоне по формулам (42) и (43).

#### 4. Поле температуры в слое с зоной расплава

Если значения температуры в осушенной зоне превышают температуру плавления топлива  $T_{\text{пл}}$ , выполняется следующий этап расчетов: определяются координаты зоны расплавленного топлива, уточняются координаты выпележащих зон и находится распределение температуры в зоне расплава.

Уравнение (1) используется для описания поля температуры и в зоне расплавленного топлива. В уравнении (1) для зоны расплава  $q_v=\eta\rho_{\text{жт}}q_t$ ,  $\lambda_{\text{эф}}=\lambda_{\text{жт}}$ , где  $\rho_{\text{жт}}$  – плотность расплавленного топлива;  $\lambda_{\text{жт}}$  – коэффициент теплопроводности расплавленного топлива.

Толщина зоны расплавленного топлива определяется по формуле

$$h_{\text{жт0}} = h_{dr} - 2 \left[ \frac{2(T_{\text{пл}} - T_s)\lambda_{\text{эф}}^{dr}}{\eta\rho_{\text{жт}}q_t} \right]^{1/2}. \quad (51)$$

Поскольку при расплавлении топлива происходят исчезновение пустот и изменение плотности топлива, то истинный размер зоны расплавленного топлива будет меньше:

$$h_{\text{жт}} = h_{\text{жт0}} (1 - \varepsilon) \frac{\rho_t}{\rho_{\text{жт}}}. \quad (52)$$

С учетом этого соотношения пересчитывается координата верхней границы зоны расплава, на соответствующую высоту (равную  $h_{\text{жт0}}-h_{\text{жт}}$ ) уменьшается



толщина осушенной зоны —  $h_{dr} = h_{dr0} - (h_{жт0} - h_{жт})$ , где  $h_{dr0}$  — толщина осушенной зоны, рассчитанная на предыдущем этапе (до учета зоны расплава), и соответственно уменьшаются вышележащие координаты границ зон.

Координаты нижней и верхней границ зоны расплавленного топлива равны  $z_{жт1} = h_{Na1} + (h_{dr0} - h_{жт0})/2$ ;  $z_{жт2} = z_{жт1} + h_{жт}$ . (53)

Формулы для расчета распределения температуры в зоне расплавленного топлива:

— в нижней части ( $z_{жт1} \leq z \leq z_{жт}^*$ )

$$T_{жт}(z) = T_{пл} + \frac{\eta \rho_{жт} q_T h_{жт}}{2\lambda_{жт}} (z - z_{жт1}) - \frac{\eta \rho_{жт} q_T}{2\lambda_{жт}} (z - z_{жт1})^2; \quad (54)$$

— в верхней части ( $z_{жт}^* \leq z \leq z_{жт2}$ )

$$T_{жт}(z) = T_{пл} + \frac{\eta \rho_{жт} q_T h_{жт}}{2\lambda_{жт}} (z_{жт2} - z) - \frac{\eta \rho_{жт} q_T}{2\lambda_{жт}} (z_{жт2} - z)^2, \quad (55)$$

где  $z_{жт}^*$  — координата максимума температуры в зоне расплавленного топлива;

$$z_{жт}^* = z_{жт1} + h_{жт}/2.$$

Максимальная температура в зоне расплава топлива

$$T_{жт}^{\max} = T_{пл} + \frac{\eta \rho_{жт} q_T h_{жт}^2}{8\lambda_{жт}}. \quad (56)$$

#### 4. Порядок выполнения работы

Каждый студент перед началом работы получает у преподавателя задание на выполнение расчетной работы с основными параметрами — геометрическими и режимными параметрами насыпного слоя (толщина слоя, диаметр топливных частиц, пористость слоя, плотность тепловыделения в топливе, температура жидкометаллического теплоносителя над слоем и под поддоном, давление) и размерами поддона (толщина плиты, толщина тугоплавкой обечайки, диаметр поддона). Затем самостоятельно подбираются по справочникам теплофизические свойства: твердого топлива (теплопроводность, плотность, степень черноты поверхностей частиц), жидкого топлива (теплопроводность, плотность), температура плавления топлива, температура кипения топлива, материалов поддона (теплопроводность, температура плавления) [7], жидкого теплоносителя (теплопроводность, плотность, теплоемкость, температуропроводность, кинематическая и динамическая вязкость, поверхностное натяжение) [8], паров теплоносителя на линии насыщения (теплопроводность, плотность, кинематическая вязкость, теплота парообразования) [8], теплопроводность паров теплоносителя в зависимости от температуры и давления [9], температура насыщения теплоносителя в зависимости от давления [10]. С использованием этих данных вычисляются толщины характерных зон в слое, координаты их границ от низа слоя, распределения температуры по высоте слоя и поддона, максимальные значения температуры в слое и поддоне. Расчеты выполняются с помощью

явных математических выражений, приведенных в разделе 3. Максимальные значения температуры в слое сопоставляются с температурой кипения топлива, в поддоне – с температурами плавления материалов плиты и тугоплавкой обечайки. Формулируется заключение о безопасности реактора при запроектной аварии (сохранении целостности поддона и, следовательно, корпуса реактора).

### 5. Указания к составлению отчета

Отчетные материалы должны содержать:

- название и цель работы;
- расчетную схему насыпного слоя;
- исходные параметры для расчетов, выданные преподавателем;
- подробное описание и результаты вычислений с указанием размерностей величин в формулах;
- размеры характерных зон в слое;
- график распределения температуры по высоте слоя;
- максимальные значения температуры в слое и поддоне;
- заключение.

### Список литературы

1. Джадд, А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах: [пер. с англ.] / А. Джадд – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 136 с.
2. Уолтер, А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах: [пер. с англ.] / А. Уолтер, А. Рейнольдс – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 624 с.
3. Усынин, Г.Б. Реакторы на быстрых нейтронах: учеб. пособие для вузов; под ред. Ф.М. Митенкова / Г.Б. Усынин, Е.В. Кусмарцев – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.
4. Самойлов, О.Б. Безопасность ядерных энергетических установок: учеб. пособие для вузов / О.Б. Самойлов, Г.Б. Усынин, А.М. Бахметьев – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.
5. Букринский, А.М. Аварийные переходные процессы на АЭС с ВВЭР / А.М. Букринский – М.: Энергоиздат, 1982. – 142 с.
6. Кузнецов, Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов / Ю.Н. Кузнецов – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.
7. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
8. Кириллов, П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы); под общей ред. П.Л. Кириллова / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
9. Теплофизические свойства щелочных металлов. – М.: Изд-во стандартов, 1970.
10. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик – М., 1963.