

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЛАВЛЕНИЯ ТВЭЛА С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОЙ ОБОЛОЧКИ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА БН ПРИ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ

**Г.Н. Власичев, Г.Б. Усынин**

*Нижегородский государственный технический университет, г. Н.Новгород*



Разработана методика расчета аварийного процесса разогрева и плавления твэлов с учетом перемещения расплавленной оболочки при прекращении расхода теплоносителя в ТВС быстрого реактора с натриевым теплоносителем. Выполнен расчетный анализ процесса расплавления отдельного твэла в активной зоне при запроектной аварии.

В случае запроектной аварии с потерей энергопитания без срабатывания всех средств воздействия на реактивность в быстром реакторе с натриевым теплоносителем не будет происходить расплавления активной зоны, т.к. отрицательные обратные связи по реактивности даже в условиях кипения натрия приводят к снижению мощности [1]. Однако полностью исключить вероятность плавления части активной зоны пока не возможно [2]. При изучении развития аварии на стадии кипения натрия имеются неопределенности, обусловленные сложностью учета влияния на реактивность изменения конфигурации активной зоны и недостаточной изученностью процессов при кипении жидкометаллических теплоносителей, что допускает возможность развития аварии, сопровождающегося осушением отдельных участков твэлов. На этих участках будет расти температура оболочек и топлива с последующим их плавлением, поэтому необходимо исследование начальной и переходной стадий аварии при консервативной предпосылке относительно кипения натрия учета положительных эффектов реактивности в результате перемещения конструкционного материала (оболочек твэлов) и топлива [3] и получения исходных данных для рассмотрения последующих стадий аварии.

В данной работе выполнен расчетный анализ процесса расплавления отдельного наиболее теплонапряженного твэла центральной ТВС в активной зоне реактора БН с учетом перемещения расплавленной оболочки при аварии с потерей энергопитания без срабатывания всех средств воздействия на реактивность. Описание разработанной модели приводится в [4, 5]. В методике данной работы дополнительно учитывается выпаривание натрия по простой модели.

© Г.Н. Власичев, Г.Б. Усынин, 2002

\* Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Конкурсного центра грантов по фундаментальным исследованиям в области технических наук (Грант Т00-1.3-1017).

Нагрев и выпаривание натрия приближенно рассчитываются при нулевом его расходе в эффективной 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 либо после закипания теплоносителя, вызванного снижением расхода через всю активную зону. Во втором случае требуемые для расчетов начальные значения температуры могут быть получены из теплогидравлического расчета ТВС. В расчетную схему включается кольцевая ячейка (канал) неподвижного теплоносителя (рис. 1а). Профиль поперечного сечения канала для прохода теплоносителя, приходящегося на один твэл, представляется в виде кольца вокруг твэла, эквивалентного по величине гидравлическому диаметру 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, заданный в исходных данных с учетом 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 [6]) пленка жидкости заданной толщины (рис. 1б). Данное условие может отсутствовать и тогда рассчитывается выпаривание всего натрия на каждом высотном участке канала. 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). 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 [7]. 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, используемый в модели. Рассчитываемое в модели перемещение границы раздела паровой и жидкой фаз по нормали от стенки является условным, количественно выражающим баланс тепла в рассматриваемом процессе.

Задача перемещения рассматривается с учетом динамики границ области расплавления оболочки вдоль твэла, полученной из рассмотрения в первом приближении задачи плавления оболочки. Предполагается, что движение паров натрия и расплава оболочки - одномерное, а движущиеся среды - несжимаемые. Первоначально направленное вверх перемещение расплавленного материала оболочки (рис. 2а) происходит под действием силы трения от восходящего потока паров натрия, противодействующих сил тяжести и трения расплава о поверхности сердечника и нерасплавленных участков оболочки. Принимается, что расплав перемещается в виде сплошной неразрывной пленки, толщина которой одинакова по всей длине. Считается, что перемещение пленки за высотные границы области полного (по всему сечению) расплавления оболочки начинается, когда скорость течения пленки становится выше скорости распространения плавления оболочки вдоль твэла на соответствующей границе. Считается, что после смены направления перемещения (реверса) пленки и последующего оттока расплава вниз (обратно к верхней границе области расплавления оболочки) происходит отрыв пленки от вышенаходящейся еще твердой оболочки (рис. 2б). Последующее плавление оболочки на указанном верхнем участке (рис. 1д) не учитывается в балансе массы.

Процесс расплавления твэла в активной зоне с учетом перемещения материала оболочки, затвердевания расплава на твердых участках оболочки и повторного плавления рассчитывается по программам TRAMS-TWEL и MOTE с обменом данными через файлы на диске в соответствующих последовательности и формате. В результате расчетов определяются времена плавления элементов по всей длине активной части твэла.

На первом шаге по программе TRAMS-TWEL определяются времена выпаривания натрия и в первом приближении времена расплавления оболочки твэла в нескольких сечениях по высоте активной зоны. На данном шаге определяются также положения фронтов затвердевания материала оболочки за пределами активной зоны на уровнях ее верхней и нижней плоскостей в зависимости от времени. По программе MOTE с учетом полученных по TRAMS-TWEL временных зависимостей высотных координат верхней и нижней границ области полного расплавления оболочки и толщины блокировок проходного сечения канала в верхней и нижней зонах воспроизводства проводятся вычисления параметров движения жидкой стальной пленки. На втором шаге вычислений по программе TRAMS-TWEL с учетом полученных по MOTE временных зависимостей скорости и высотных координат границ жидкой пленки и высоты расплава над нижней блокировкой определяются уточненные времена расплавления оболочки и топливного сердечника, времена и толщины частичной или полной блокировки межтвэльного пространства затвердевающим материалом (в том числе в активной зоне) и времена расплавления натвердевших слоев в активной зоне. При этом указанные временные зависимости используются для определения времен попадания расплавленного материала оболочки в рассчитываемые по TRAMS-TWEL, расположенные на разных высотных уровнях поперечные сечения с еще твердой оболочкой, времен оттока жидкой стальной пленки из рассчитываемых поперечных сечений в верхней части активной зоны, времени начала вытекания расплава оболочки из зазора между топливом и оболочкой после отрыва верхней границы пленки от вышенаходящегося участка с еще твердой оболочкой, времен удаления расплавленной оболочки из рассчитываемых поперечных сечений в верхней и средней частях активной зоны, времен заполнения всего поперечного сечения канала в нижней части активной зоны расплавом оболочки, переместившимся из вышенаходящихся участков. В указанные моменты производятся соответствующие изменения конфигурации и граничных условий в рассчитываемой системе.

В работе [5] выполнено тестирование разработанных программ расчета плавления твэла и перемещения расплавленной оболочки TRAMS-TWEL и MOTE соответственно на численных результатах методик, аналогичных используемым в данных программах. Результаты расчетов плавления оболочки твэла, перемещения и затвердевания ее материала в целом качественно и количественно удовлетворительно согласуются с данными эксперимента R-5 на реакторе TREAT [5].

В данной работе выполнены расчеты выпаривания натрия в эффективном кольцевом канале вокруг твэла, плавления оболочки твэла, перемещения ее расплавленного материала, обратного затвердевания ее расплавленного материала на более холодных участках твэла в верхней части и выше активной зоны, в нижней части активной зоны и в торцевой зоне воспроизводства под активной зоной, повторного плавления затвердевшего материала в активной зоне, плавления топливного сердечника, в том числе с учетом нагрева жидкой стали в бассейне вокруг пенька твэла в нижней части активной зоны. Распределения температуры натрия и температуры оболочки по высоте активной зоны в момент 17 с после начала аварии, когда достигается температура насыщения натрия на верхнем расчетном участке наиболее теплонапряженной ячейки, показаны на рис. 3. В соответствии с приведенной в [8] эк-

спериментальной картограммой режима кипения натрия переход в устойчивое дисперсно-кольцевое течение при массовой скорости  $1800 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$  должен осуществляться при весовом паросодержании  $< 0,02$ . Принятая в настоящей модели величина  $x = 0$  (при  $T_{Na} = T_{\text{кип}}^{Na}$  в наиболее горячем высотном участке) в качестве количественного критерия прекращения расхода в ТВС идет в запас расчета и необходима, поскольку теплогидравлика процесса кипения натрия в ячейке не рассматривается.

В результате расчетов получено, что кипение натрия, начавшееся в момент времени  $t = 0$  в верхней части активной зоны, распространяется до ее низа за 3,2 с. В соответствии с самой простой модификацией модели кипения, в которой удаление всего натрия из всех участков по высоте канала в условиях наступившего нулевого расхода осуществляется путем его выпаривания, установлено, что осушение твэла наступает первоначально на участке, находящемся на расстоянии около 50-70 см от нижней плоскости активной зоны, в момент  $\sim 1,9$  с. Полное осушение оболочки твэла в активной зоне происходит за 8,1 с. В каждом поперечном сечении прежде топливного сердечника плавится оболочка. Плавление оболочки твэла начинается немного выше центральной плоскости активной зоны через 3,2 с после начала кипения натрия и заканчивается на этом наиболее горячем по высоте участке в момент 4,0 с. В результате расчетов по программе TRAMS-TWEL на первом шаге получено, что область расплавления оболочки расширяется вверх в течение 5,1 с и вниз в течение 11,1 с.

Восходящее движение увлекаемого парами натрия, испаряющегося в нижней части активной зоны, жидкого материала оболочки, скорость которого рассчитывается по программе MOTE, начинается с момента ее расплавления на наиболее горячем участке. В качестве исходной для расчета использована высотная зависимость времен расплавления оболочки, полученная по программе TRAMS-TWEL. Из-за высокой скорости жидкой стальной пленки (рис. 4а) происходит ее натекание на еще нерасплавленный участок оболочки в верхней части активной зоны. Из-за быстрого нарастания массы расплавленного материала скорость пленки начинает падать. Скорость паров в канале для прохода теплоносителя тоже быстро снижается (рис. 4б) при уве-

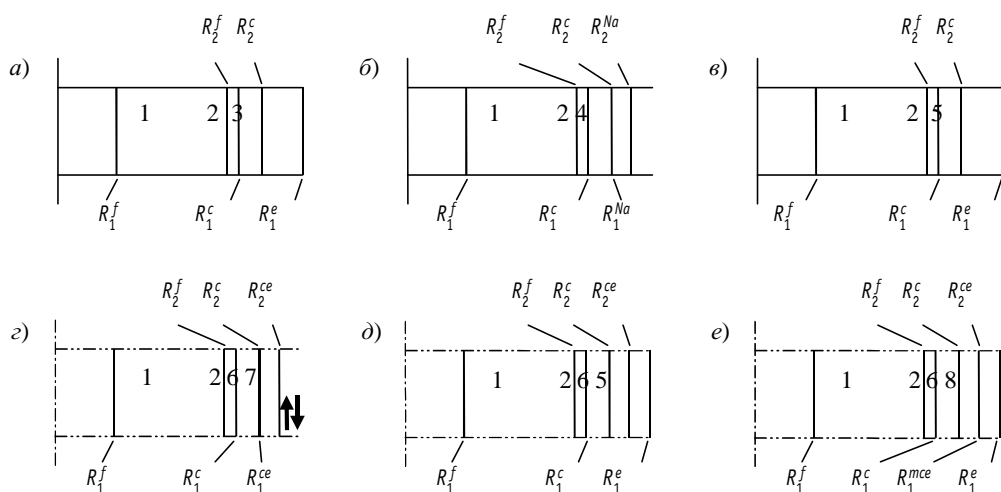


Рис. 1. Расчетные схемы радиального теплообмена в твэле на характерных высотных участках в аварийном процессе после прекращения расхода: до закипания натрия (а), после закипания натрия (б), после высыхания пленки жидкого натрия (в), на участках с расплавленным материалом оболочки, перемещающимся поверх твердой оболочки (г), в верхней части после оттока жидкой стальной пленки (д), в нижней части с материалом оболочки, заполнившим все поперечное сечение канала (е); 1 - топливный сердечник; 2 - оболочка; 3 - жидкий натрий; 4 - пленка жидкого натрия; 5 - пары натрия (не является расчетной областью); 6 - корка затвердевшей стали; 7 - перемещающаяся жидкая сталь (не является расчетной областью); 8 - неподвижная жидкая сталь

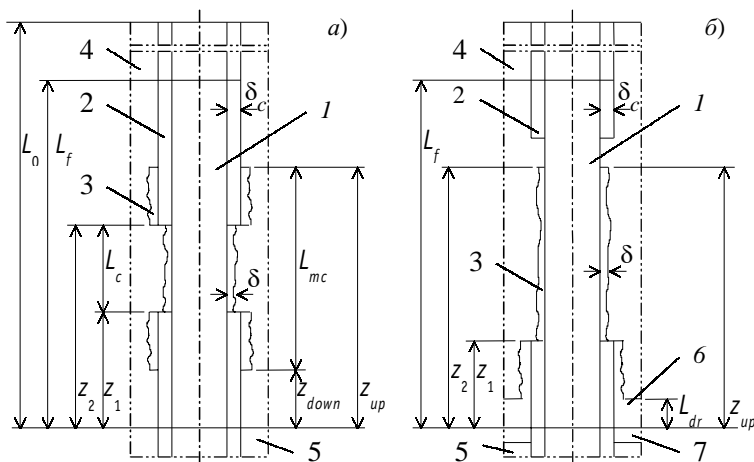


Рис. 2. Расчетные схемы перемещения расплавленной оболочки до (а) и после (б) блокировки в нижней зоне воспроизводства: 1 - топливный сердечник; 2 - оболочка; 3 - перемещающаяся пленка; 4 - пары натрия в канале; 5 - жидкий натрий; 6 - неподвижный расплав оболочки; 7 - блокировка

личении со временем протяженности расплавленного участка оболочки и соответствующем возрастании трения на поверхности раздела паров с пленкой. Тем не менее, в момент 4,9 с расплавленный материал достигает верха активной зоны (рис. 5), и начинается его застывание на ненагреваемом участке выше активной части твэла. Сужение проходного сечения в результате затвердевания приводит к резкому замедлению потока паров. При этом наступает изменение направления движения жидкой стальной пленки на нисходящее (рис. 4а) в момент ~5,0 с. До этого момента пленка успевает продвинуться на высоту 6,6 мм от верха активной зоны. Рассчитанная по программе TRAMS-TWEL толщина твердой корки из материала оболочки (рис. 4в) за то время, в течение которого жидкая сталь находилась выше активной зоны, достигает 0,71 мм. При этом закупоривается большая часть проходного сечения канала (ширина эффективного кольцевого канала равна 0,73 мм). Перемещающаяся после этого под действием практически только сил тяжести и противодействующего трения жидкая пленка натекает на еще твердую оболочку в нижней части активной зоны, начиная с высоты  $z \approx 34$  см, и в момент ~5,9 с достигает торцевой зоны воспроизводства, где затвердевает. При этом за ~0,08 с образуется полная закупорка проходного сечения (рис. 4г) на глубину 4,2 см, которая препятствует дальнейшему продвижению стали в зоне воспроизводства и перекрывает поток паров натрия в активную зону. Продолжающееся опускное движение расплавленного материала в активной зоне приводит ко времени 6,5 с после закипания натрия к заливу сталью канала над нижней блокировкой на высоту 24,5 см (рис. 5).

Перемещение оболочки учитывается на втором шаге расчетов расплавления твэла по программе TRAMS-TWEL, на котором результаты предыдущего шага вычислений по TRAMS-TWEL и результаты расчета по MOTE используются в качестве входных данных. На данном шаге характерные времена и прочие параметры теплообмена до начала движения расплавленного материала одинаковы с полученными на предыдущем шаге. С началом течения жидкой стальной пленки по-

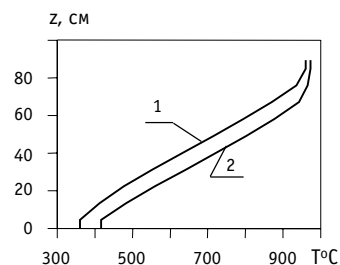


Рис. 3. Температура натрия (1) и оболочки твэла (2) по высоте канала в момент начала кипения теплоносителя при запроектной аварии с прекращением расхода через реактор

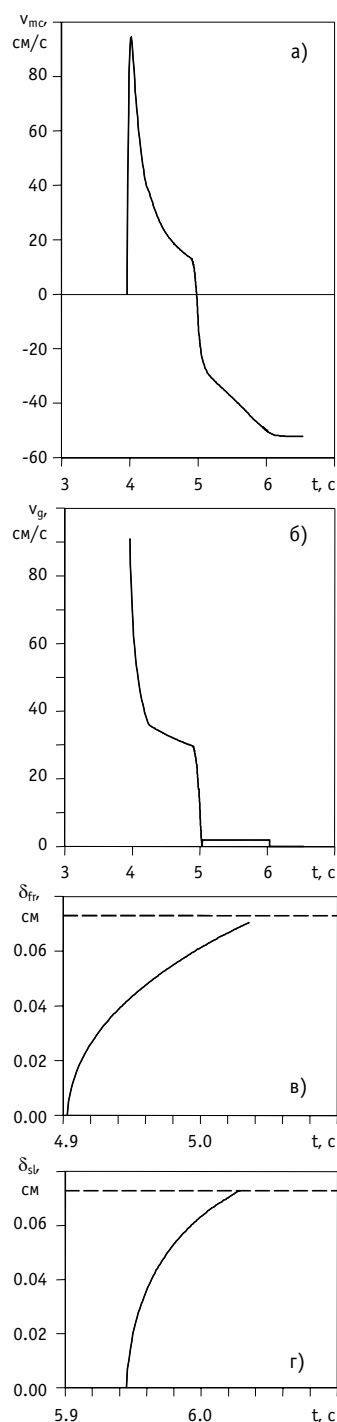


Рис. 4. Скорости перемещения расплавленной оболочки твэла (а) и течения паров натрия в канале (б), толщина слоев из затвердевшего материала оболочки над активной зоной (в) и в нижней зоне воспроизводства (г) (--- ширина эффективного кольцевого канала) при запроектной аварии

верх твердой (по всей толщине) оболочки в верхней части активной зоны ( $z > 80$  см) в расчетной схеме теплообмена на таких участках появляется твердая корка из переместившегося с нижележащих участков расплавленного материала оболочки (рис. 12). Рост толщины твердой корки будет продолжаться до тех пор, пока температура оболочки под ней не повысится до точки плавления. Максимальная толщина твердого слоя в верхней части активной зоны достигает 0,22 мм на уровне верхней плоскости. Разрыв в величинах толщины твердых корок на границе активной зоны и верхнего концевика твэла обусловлен отсутствием учета аксиальных перетечек тепла в используемой расчетной методике. Выделение скрытой теплоты затвердевания ускоряет нагрев оболочки до точки плавления. Твердая корка при температуре перемещающейся жидкой стальной пленки, равной температуре плавления, будет сохраняться до тех пор, пока не наступит расплавление самой оболочки. После реверса и последующего отступления пленки из рассматриваемых верхних участков обратно к верхней границе области расплавления оболочки открывается путь для стекания расплавленного материала оболочки. Удаление расплавленного материала, которое замедляет теплопередачу между топливным сердечником и остающимся твердым слоем оболочки, учитывается в граничных условиях теплообмена. В результате времена плавления оболочки в верхней части активной зоны превосходят соответствующие времена, полученные в тех же поперечных сечениях на предыдущем шаге вычислений по TRAMS-TWEL. В нижней части активной зоны образование корки поверх твердой оболочки начинается с высоты  $z \approx 20$  см. Твердая стальная корка максимальной толщины 0,66 мм поверх оболочки образуется на уровне нижней плоскости активной зоны. Времена расплавления оболочки на нижнем участке меньше времен, полученных на предыдущем шаге по TRAMS-TWEL в тех же поперечных сечениях, (рис. 5) из-за дополнительного количества тепла, выделяющегося при затвердевании переместившейся стали. На уровне нижней плоскости разница во времени расплавления достигает 5,2 с.

На рис. 5 показаны также времена расплавления топливного сердечника, которые вычислены тоже с учетом перемещения расплавленной оболочки. Время начала плавления топлива на наиболее теплонапряженном участке равно 9,9 с, что на 0,8 с меньше соответствующего времени, полученного на пре-

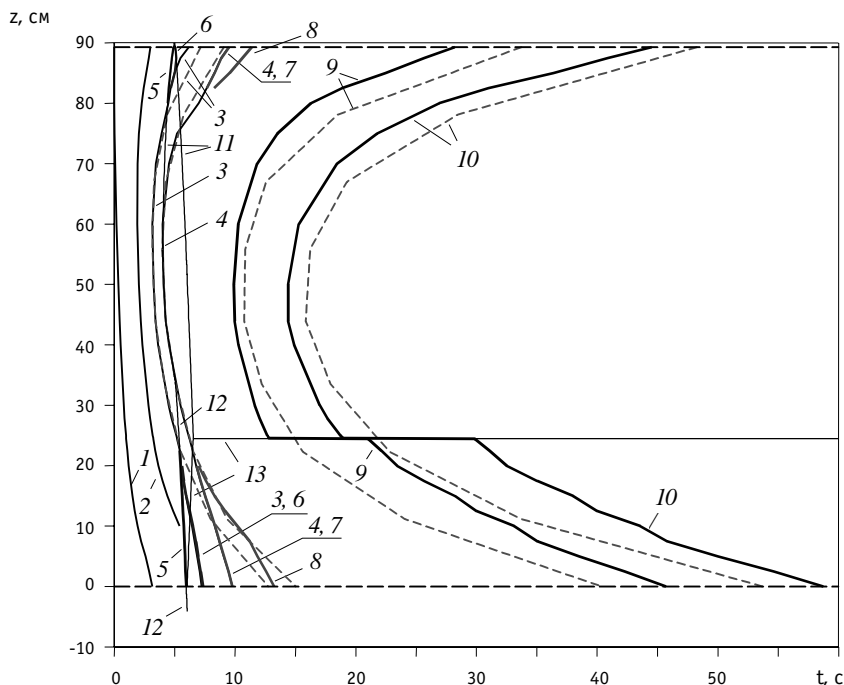


Рис. 5. Характерные времена в процессе расплавления оболочки по высоте твэла при запроектной аварии: начала (1) и окончания (2) выпаривания натрия, начала (3) и окончания (4) плавления оболочки (--- без учета перемещения расплава оболочки), начала (5) и окончания (6) затвердевания расплава оболочки в активной зоне, начала (7) и окончания (8) плавления твердых коронок, начала (9) и окончания (10) плавления топлива (11, 12 — верхняя и нижняя границы перемещающейся жидкой пленки из материала оболочки соответственно; 13 — высота бассейна из расплава оболочки над нижней закупоркой канала; — — — границы секций по высоте твэла)

дыдущем шаге вычислений по TRAMS-TWEL. Это обусловлено учитываемым на данном шаге отсутствием затрат тепла на нагрев расплавленной оболочки после ее стекания в нижнюю часть активной зоны. По той же причине времена плавления топливного сердечника на верхних участках получены меньшими, чем на предыдущем шаге. В нижней части активной зоны — в области бассейна из материала расплавленной оболочки вокруг твердого пенька твэла, уровень которого находится на высоте  $z = 24,5$  см, времена плавления топливного сердечника превосходят соответствующие времена, полученные на предыдущем шаге в тех же поперечных сечениях. Это обусловлено дополнительными затратами тепла на нагрев окружающей жидкой стали. На уровне нижней плоскости активной зоны разница во времени расплавления достигает 5,0 с, на уровне верха бассейна из жидкой стали — 7,1 с.

На рис. 5 видно, что ко времени начала плавления топлива в области стального бассейна (21,0 с) вышенаходящийся топливный сердечник расплавляется полностью на длине около 50 см. Ко времени расплавления топлива в области стального бассейна только на уровне верха бассейна (29,9 с) практически все вышенаходящееся топливо будет расплавлено. Следовательно, расплавленное топливо средней и верхней частей активной зоны будет собираться над стальным бассейном при еще твердых пеньках топливных сердечников в бассейне. Температура расплавленной стали на уровне верха бассейна ко времени начала плавления топлива на данной высоте достигает  $2650^{\circ}\text{C}$ , на уровне нижней плоскости активной зоны температура расплавленной стали к этому времени равна  $1950^{\circ}\text{C}$ . Сохраняющиеся в течение десятков секунд твердые пеньки топлива в бассейне из жидкой стали, температура которой

намного ниже точки ее кипения, будут, по-видимому, в какой-то мере препятствовать перемешиванию стали и вышенаходящегося расплавленного топлива. Приведенный в статье [9] анализ экспериментов серии BE+ программы SCARABEE, выполненный с помощью компьютерных кодов PHYSURA-GRAPPE и SIMMER-II с учетом данных измерений (после расплавления оболочек твэлов и разрушения термопар имеются данные только по боковым тепловым потокам от экспериментальной сборки), также показал, что в процессе расплавления твэлов топливо начинает плавиться после перемещения расплавленной стали и расплавленный бассейн из топлива формируется выше уже существующего стального бассейна. При этом два бассейна разделяются твердой коркой из топлива. Такая корка в течение времени своего существования будет предотвращать смешивание топлива с нижележащей жидкой сталью. Следовательно, конфигурация в одной из наиболее теплонапряженных ячеек активной зоны реактора БН, при которой около двух третей топлива собирается в компактную массу в центральной части по высоте активной зоны, вносящую наибольший вклад в реактивность, будет какое-то время сохраняться в первоначально сложившемся виде.

Выполнены расчеты при модификации модели кипения натрия в ячейке, в которой рассматривается выпаривание только части натрия - пленки на поверхности оболочки твэла, остающейся после начала кипения в рассчитываемом поперечном сечении и вытеснения другой части натрия паром. Так же, как в предыдущем случае, аксиальное расширение пузыря паров натрия вдоль канала из точки первоначального закипания не учитывается. Толщина пленки жидкого натрия принята равной 0,15 мм, что соответствует объемной доле ~0,2, принятой в соответствии с [6]. В данном случае осушение и расплавление оболочки твэла наступают раньше, чем в предыдущем случае. Область расплавления оболочки расширяется вверх в течение 3,4 с и вниз в течение 8,6 с. Указанные времена меньше полученных в предшествующем расчете на 2,6 с и 2,5 с соответственно. Образование стального бассейна завершается ко времени 4,8 с - на 1,7 с раньше, чем в предыдущем случае. Раньше происходит расплавление топливного сердечника: в центральной плоскости активной зоны - на 2,1 с, в верхней части - на 6,2 с, в области стального бассейна - на 1,6-4,0 с.

Выполнены расчеты при третьей модификации модели кипения, в которой рассматривается нагрев и выпаривание пленки жидкого натрия, остающейся на поверхности оболочки в рассчитываемом поперечном сечении твэла и канала после начала кипения на наиболее горячем высотном участке и вытеснения части натрия паром из всех участков по высоте активной зоны. Иными словами, постулируется, что в момент закипания натрия на наиболее горячем участке паровой пузырь мгновенно расширяется на всю длину канала в активной зоне, и на поверхности твэла остается только жидкая пленка вышеуказанной толщины. В данном случае область расплавления оболочки расширяется вверх в течение 3,4 с и вниз в течение 8,1 с. Указанные времена меньше полученных в предыдущем расчете на 0,07 с и 0,5 с соответственно. Расплавление топливного сердечника в области стального бассейна происходит раньше на 0,7-2,2 с, чем в предыдущем случае.

В целом, качественного отличия в результатах рассмотрения процессов плавления, перемещения и затвердевания материалов твэла при использовании трех рассмотренных модификаций простой модели кипения в канале не получено.

Таким образом, в результате расчетов (по методике данной работы) аварийных процессов в наиболее теплонапряженной ячейке активной зоны реактора БН при запроектной аварии получены времена плавления оболочки и топливного сердечника твэла с учетом перемещения расплавленной оболочки, затвердевания ее материала на более холодных участках твэла и плавления твердых корок. Плавление топлива в средней и верхней частях по высоте активной зоны начинается и большей частью



заканчивается при еще твердых пеньках топливных сердечников в нижней ее части, окруженных бассейном из расплавленной стали в межтвэльном пространстве. Такая последовательность плавления топлива по высоте активной зоны, полученная в результате предшествующего перемещения оболочки в нижнюю часть активной зоны, приведет к возникновению и сохранению в течение какого-то времени конфигурации материалов твэлов в наиболее теплонапряженных ТВС, вносящей наибольший вклад в реактивность. Данный качественный результат проведенных расчетов обуславливает важность корректного описания процессов плавления и перемещения материалов активной зоны для учета обратных связей по реактивности в комплексном рассмотрении развития аварии. Совершенствование разработанной методики расчета развития расплавления твэла в активной зоне может быть осуществлено в направлении разработки модели, описывающей перемещение расплавленного топлива, модели последующего тепло- и массообмена между объемами расплавленных топлива и стали между собой, а также с твердыми фрагментами.

### Литература

1. Сценарий и последствия аварии LOFWS в реакторе БН-800 Южно-Уральской АЭС/И.А. Кузнецов, В.М. Поплавский, Ю.Е. Швецов и др. : Докл. на семинаре по безопасности реакторов на быстрых нейтронах. СНГ - Европейское сообщество. (г. Обнинск - г. Актау, 24 - 29 февраля 1992 г.). - 24 с.
2. Buksha Yu. On Approaches Applied Analysis of Melt-down Accident in BN-800 Type Reactor: Proc. IAEA/TWGFR Techn. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's (Oarai, Ibaraki, Japan, June 6-9, 1994). - O-arai Engineering Center, PNC, 1994. - P. 541-544.
3. Analysis of the Fast Reactor Core Recriticality at Beyond Design Basis Accidents/Yu.K. Buksha, A.V. Danilychev, E.E. Marinenko et al. - Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an Intern. Topical Meeting. (Obninsk, Russia, October 3-7, 1994). - Obninsk, 1994. - V. 2. - P. 2/24-2/35.
4. Власичев Г.Н. Расчетный анализ экспериментов по разрушению электрообогреваемых имитаторов твэлов ядерных реакторов//Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2000. - № 4. - С. 28-37.
5. Власичев Г.Н. Расчетная модель расплавления твэла с учетом перемещения расплавленной оболочки в активной зоне реактора БН при запроектной аварии//Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2001. - № 3. - С. 20-30.
6. Уолтер А., Рейнольдс А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 624 с.
7. Галин Н.М., Кириллов П.Л. Тепломассообмен (в ядерной энергетике). Учеб. пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 376 с.
8. Расчетно-экспериментальные исследования условий устойчивого теплообмена при возникновении кипения жидкого металла в режиме аварийного расхолаживания быстрого реактора/А.П. Сорокин, А.Д. Ефанов, Е.Ф. Иванов и др.//Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1999. - № 2. - С. 59-69.
9. The SCARABEE Total Blockages Test Series: Synthesis of the Interpretation/J. Papin, J. Mac dougall, R. Sesny et al.: Proc. of 1990 Int. Fast Reactor Safety Meet. (Snowbird, 12-16 August 1990). - ANS, 1990. - V. 1. - P. 367-376.

Поступила в редакцию 1.04.2002

assessment practice, but may be employed in research projects. A comparison of chemical and radioactivity data with generic guideline values or quality criteria derived from toxicity data. Bioassays with material from the contaminated site as a supplement to chemical and radioactivity analysis.

#### **УДК 621.039.586:536.42**

*Numerical Modelling of Pin Meltdown in View of Molten Cladding Relocation in BN Reactor Core under beyond Design Accident* \ G.N. Vlasichev, G.B. Usinin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 5 illustrations. - References, 9 titles.

The technique of account of emergency process of pin heating and melting is developed in view of molten cladding relocation at the termination of coolant flow in fuel assembly of the fast reactor with sodium coolant. The calculation analysis of meltdown process of separate most heat-stressed pin of central assembly in BN reactor core is executed in view of molten cladding relocation under beyond design accident with loss of power providing without operation of all means of effect on reactivity. In model of the given work evaporation of sodium in addition is taken into account. In result, the melting times of pin cladding and fuel are received in view of molten cladding relocation, freezing of its material on more cold pin sites and frozen crust melting. The fuel melting sequence on core height received as a result of previous cladding relocation to the bottom part of core, will result in occurrence and preservation during any of time of a configuration of pin materials in most heat-stressed assemblies, bringing in the greatest contribution in reactivity.

#### **УДК 621.039.5**

*Markov Chain with Rewards for Selection Most Significant Fission Products. General model* \ Yu.V. Volkov, O.B. Duginov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 8 pages, 1 illustration, 1 table. - References, 4 titles.

The Markov model with rewards for description of isotope transitions is developed. The iterative method for determination the most significant route (strategies) of isotope transitions according to given criterion which bring the largest effect has been proposed.

#### **УДК 621.039.7**

*Norms of Criticality Safety at Handling with Wastes, Containing Plutonium and Uranium of Low Enrichment* \ S.S. Krechetov, V.S. Vnukov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 5 pages, 7 tables. – References, 3 titles

Norms of criticality safety are determined at handling with the wastes containing plutonium and uranium of low enrichment. Calculations of the safe specific contents, the safe areal density are carried out at the analysis of nuclear safety of radioactive wastes. Various mixes of the radioactive wastes containing water, graphite, beryllium, dioxide silicon and others are considered. Recommended norms of criticality safety are given at handling with wastes.

#### **УДК 621.039.7:66.081.3**

*Experimental Investigation of Possibility of Concentrated Liquid Radwaste Disposal of  $^{137}\text{Cs}$  by Sorption Method with Following Immobilization of Sorbents into Geocement Rock* \ T.O. Mishevets, N.G. Bogdanovich, O.V. Starkov, E.E. Konovalov, D.L. Tyutyunnikov, V.P. Emelyanov, V.V. Molchanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 5 pages, 1 table. - References, 8 titles.

The preliminary examinations on a technological regime of the discharge by inorganic sorbents from  $^{137}\text{Cs}$  of model and actual solutions IPPE concentrated liquid radioactive wastes (CLRW) are held. Three are explored such as sorbents: natural silica-alumina sorbent clinoptilolite, modified ions of sodium (KLN-Na) or copper and ferri ferrocyanides (KLN-FC); synthetic ferrocyanide sorbents Thermoxide-35 and NGS.

In experiments with usage of model solutions CLRW the prospects of applying for discharging concentrated liquid radioactive wastes by synthetic ferrocyanide Thermoxide-35 and NGS is affirmed. The applying KLN for getter extraction of cesium is possible at the containment of salts