

УДК 621.039.586:536.42

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ РАСЧЕТА АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ С ПЛАВЛЕНИЕМ ВНУТРИКОРПУСНЫХ МАТЕРИАЛОВ БЫСТРОГО РЕАКТОРА

Власицев Г.Н. (НГТУ)

В последние годы большое внимание уделяется обеспечению безопасности атомных станций. Современные нормативные документы требуют в числе прочих мер при проектировании АС рассмотрение запроектных аварий.

Для рассмотрения развития аварии, определения временных и количественных характеристик, требуемых для разработки защитных мер в целях ограничения ее последствий, необходимо изучение отдельных стадий аварии и сопутствующих ей процессов. Общей методологии анализа различных физических явлений при авариях быстрых реакторов посвящены некоторые главы книги [1]. Результаты исследований показывают, что во всех типах запроектных аварий происходят одни и те же физические процессы в материалах активной зоны — на начальной стадии закипание теплоносителя, плавление стали и топлива, перемещение расплавленных материалов, тепловое взаимодействие расплавленного топлива с теплоносителем. Основное различие запроектных аварий состоит в инициирующих их событиях и последовательности протекания физических процессов на начальной стадии. При аварии с прекращением расхода ULOF первоочередным из перечисленных процессов является закипание теплоносителя, после которого следует плавление стали и топлива. Авария с неконтролируемым увеличением мощности UTOP характерна началом плавления топлива при еще сохраняющемся расходе теплоносителя через активную зону. Закипание теплоносителя, перемещение расплавленного топливного и конструкционного материалов при ULOF могут вызвать повышение реактивности. После этого авария, начавшаяся как ULOF, будет протекать, как UTOP. Все упомянутые физические процессы, только в меньшем масштабе, характерны и для аварии с полной блокировкой отдельной ТВС. Не исключено распространение такой аварии на всю активную зону. В этом случае она войдет в разряд запроектных. Факторами распространения разрушений на соседние ТВС могут быть проплавление стенок чехлов расплавленным топливом и повышение давления, что может произойти в результате взаимодействия топлива с теплоносителем. Различные аспекты аварии с перекрытием проходного сечения в отдельной ТВС с распространением повреждений на один ряд окружающих ТВС для БН-600 рассмотрены в работе [2].

Рассмотрение физических процессов, протекающих на начальной и последующих стадиях запроектной аварии, требует в первую очередь анализа температурного и фазового состояний материалов внутри реакторного корпуса: теплоносителя, оболочек твэлов и топлива, стенок чехлов ТВС на начальной стадии, фрагментов разрушенной активной зоны в объеме теплоносителя на стадии послеаварийного отвода тепла. Такой анализ необходим также при анализе продвижения расплавленного топлива активной зоны через нижележащие конструкционные материалы, в результате которого могут быть оценены распределение топлива внутри корпуса и зависимое от времени остаточное тепловыделение. При рассмотрении взаимодействия топлива и теплоносителя расчетный анализ динамики изменения температуры поверхности затвердевающих топливных частиц позволит определить время задержки парового взрыва.

В настоящей работе описываются методика и комплекс программ расчета одномерного нестационарного распределения температуры в системе физически связанных

материалов с учетом их плавления, затвердевания и в некоторых случаях испарения. Разработаны следующие программы комплекса для расчета аварийных процессов с плавлением материалов активной зоны в быстром реакторе: TRAMS-TWEL — плавление твэлов с учетом испарения натрия, TRAMS-W — плавление имитатора твэлов, TRAMS-DUCT — проплавление чехлов ТВС, TRAMS-BALL — затвердевание топливной частицы в теплоносителе, TRAMS-FDOWN — перемещение расплава топлива к поддону, STVO-BED — асимптотическое состояние тепловыделяющего насыпного слоя в теплоносителе. За исключением последней они построены на основе общей для них расчетной программы TRAMS. Эта программа позволяет рассчитывать гетерогенные системы из материалов с произвольными, но постоянными составом и условиями теплообмена на границах материалов. Специфические условия теплообмена между материалами, изменение этих условий и конфигурации материалов в результате закипания теплоносителя, расплавления и перемещения топлива и конструкционных материалов, температурные зависимости теплофизических свойств материалов, тепловыделение в топливе и т.п. реализованы в дополнительных модулях, в совокупности с общей программой составляющих программы комплекса TRAMS. Одна из перечисленных программ, предназначенная для расчета температурного и фазового состояния насыпного тепловыделяющего слоя из фрагментов разрушенной активной зоны в объеме теплоносителя, к настоящему времени реализована в частном стационарном варианте положенной в основу программы TRAMS расчетной методики.

В принятом для TRAMS физическом приближении тепло внутри материалов, связанных на границах заданными условиями теплообмена, передается лишь теплопроводностью. При этом пренебрегается конвективной передачей тепла в расплавленных слоях материалов, что справедливо при малой толщине расплава [3]. Используются две расчетные модели фазового превращения: с классической границей раздела двух фаз (внутренним либо внешним фронтом) и в объеме вещества (с образованием двухфазной зоны, например в тепловыделяющем топливе активной зоны). Число фронтов в каждом из материалов не ограничено.

Математически задача решена в общей для декартовой, цилиндрической и сферической систем координат формулировке. Число расчетных областей произвольное с любыми типами граничных условий, с использованием нескольких расчетных моделей для каждого из четырех родов граничных условий.

Передача тепла внутри расчетных областей описывается уравнением теплопроводности с введением, подобно [4], δ -функции Дирака:

$$\left[c(r, T) \pm \sum_{p=1}^n R_{m_p} \delta(T - T_{m_p}) \right] \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \lambda(r, T) r^k \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} + q_v(r, t), \quad (1)$$

где c — коэффициент теплоемкости; r — координата; T — температура; p — номер фронта в расчетной области; t — время; λ — коэффициент теплопроводности; q_v — удельное тепловыделение; T_m , R_m — температура и скрытая теплота плавления соответственно; k равно 0, 1, 2 в декартовой, цилиндрической и сферической системе координат соответственно. В левой части уравнения (1) записывается знак плюс при $\partial T(r, t)/\partial r < 0$, в противном случае знак минус. При этом слагаемые с δ -функцией относятся к классическим границам раздела фаз и равны нулю при несовпадении координаты r с координатой одного из фронтов. δ -Функция Дирака в уравнение теплопроводности введена для описания передачи тепла внутри сплошной среды и движения подвижных границ одним общим уравнением. Это дает возможность рассчитывать динамику движения одновременно более одного фронта в пределах расчетной области, что требуется в некоторых задачах, в частности, при рассмотрении проплавления тепловыделяющей массой нижней зоны воспроизводства (пример расчета см. в работе [5]) и внутриреакторных конструкций под ней.

Для приближенного описания передачи тепла в расчетной области с двухфазной зоной использовано обычное введение сильно разрывной на границах двухфазной зоны зависимости теплоемкости. Коэффициентом теплоемкости внутри этой зоны учиты-

вается скрытая теплота такого фазового превращения. На подвижных границах двухфазной зоны члены уравнения (1) с δ -функцией равны нулю.

Методика численного решения задачи приводится в работе [5]. Особенностью решения является так называемое явное выделение подвижных границ путем применения неравномерной пространственной сетки с плавающими узлами и метода встречных прогонок.

В программах комплекса TRAMS развиты используемые в ранее созданных программах физические модели: процессов плавления твэлов — DYMELT [6, 7], имитатора твэлов — MW [7], проплавления стенок чехлов — MDUCT2 [8]. Более общая формулировка позволила значительно расширить возможности рассмотрения этих процессов. В настоящей статье указанные возможности описаны наиболее полно.

Перегрев и плавление оболочки и топливного сердечника твэла при авариях с прекращением расхода рассчитываются по программе TRAMS-TWEL. По этой же программе можно приближенно рассчитывать нагрев и испарение натрия при нулевом расходе в ячейке вокруг твэла. При этом за начальное принимается состояние в момент прекращения расхода в ТВС: после блокировки ее проходного сечения либо после закипания теплоносителя, вызванного снижением расхода через активную зону. Во втором случае требуемая для расчетов начальная температура, относящаяся к началу закипания натрия, может быть получена из теплогидравлического расчета ТВС при указанном нарушении условий теплосъема. В процессе расчета по программе определяются на каждом шаге по времени осесимметричное распределение температуры в радиальном направлении (в цилиндрической системе координат) и координаты фазовых границ для выбранного поперечного сечения. В результате расчетов нескольких поперечных сечений с разными высотными координатами определяется время испарения натрия и плавления элементов по всей длине активной части твэла.

В случае включения в расчетную схему круговой ячейки неподвижного теплоносителя принимаются условия идеального контакта между оболочкой и теплоносителем, на наружной границе ячейки теплоносителя — адиабатическое условие. Момент закипания определяется по достижении температуры насыщения. В настоящем приближении принимается, что в этот или более ранний момент, заданный в исходных данных с учетом расширения пузыря пара натрия из областей с более нагретым теплоносителем, объемная доля жидкого теплоносителя в ячейке мгновенно уменьшается за счет вытеснения остальной части паром, на поверхности остается (в соответствии с данными [1]) пленка жидкости заданной толщины. На ее внешней границе задается адиабатическое условие. С момента закипания принимается условие конвективной теплоотдачи от оболочки к пленке. Особенностью такой простой модели закипания является включение ячейки натрия в общую схему расчета радиального переноса тепла с помощью одномерного уравнения теплопроводности, при этом закипание натрия рассчитывается по методике, разработанной для плавления. Это продиктовано главным назначением TRAMS-TWEL, а также ее одномерностью. После испарения пленки натрия на поверхности твэла принимается условие лучистого теплообмена.

Принято, что материал оболочки мгновенно удаляется из рассчитываемого сечения в момент расплавления либо в заданный более поздний момент, полученный из расчета аксиального перемещения жидкой пленки из материала оболочки. В процессе расчета плавления твэла может учитываться затвердевание на наружной поверхности расплавленных конструкционного либо топливного материалов, перемещающихся из более разогретых участков. Если прилегающий расплав неподвижен, распределение температуры рассчитывается и в нем. Такая конфигурация характерна для низа активной зоны с еще твердыми остатками твэлов, находящимися в жидком бассейне, наполняющемся за счет плавящегося вышележащего материала твэлов. Для случая движения жидкого материала вдоль твэла выше бассейна температура перемещающейся жидкой массы задается в исходных данных, а на ее границе с образующимся на поверхности твэла затвердевшим расплавом принимается конвективное условие. Подобным же образом может быть учтено перемещение жидкого топлива в центральном отверстии.

Наружные твердые слои сердечника и оболочки считаются механически прочными по отношению к давлению внутренних расплавленных слоев до задаваемой в исходных данных доли расплавления в сечении. По достижении этой доли в топливе расчет прекращается. В соответствии с приведенными в работе [9] экспериментальными результатами доля расплавленного объема в поперечном сечении перед разрушением сердечника твэла из свежего топлива может составлять до 90%. Разрушение облученного топлива, особенно при большом повышении мощности и соответственно высокой скорости нагрева, начинается, когда эта доля намного меньше, и даже может случиться при еще твердом топливе, например, в экспериментах при 16-кратном резком увеличении мощности [9]. В таких условиях причиной разрушения является не плавление. Теплофизические расчеты по программе TRAMS-TWEL для условий аварии, сопровождающейся повышением мощности, должны проводиться в совокупности с оценками механического состояния элементов твэла по модели, учитывающей термическое расширение, нестационарную реакцию газообразных продуктов деления и т.д.

Последняя версия программы TRAMS-TWEL позволяет рассчитывать те же процессы и в гетерогенной ТВС. При этом способом итераций учитывается обмен тепла между твэлами с топливным и воспроизводящим материалами, имеющими разное тепловыделение. Для учета такой теплопередачи через жидкий теплоноситель на внешних границах круговых ячеек натрия вокруг твэлов с большим и меньшим тепловыделением принимаются граничные условия второго и первого рода соответственно. Причем используются временные зависимости плотности теплового потока или температуры на границе ячейки натрия противоположного твэла, полученные на предыдущей итерации. С момента закипания натрия рассчитываются по отдельности испарение пленки в ячейках вокруг твэлов с большим тепловыделением и разогрев (с того же момента) до температуры кипения, а затем испарение пленки натрия вокруг твэлов с меньшим тепловыделением. Теплообмен излучением с осушенной оболочки каждого из таких твэлов учитывается полученной из расчета другого твэла временной зависимостью температуры его поверхности. Обычно достаточно двух-четырех итераций с использованием выходных данных расчета рассматриваемых процессов в одном твэле для расчета в другом. Строго говоря, полученные путем сопряжения круговых ячеек в рамках одномерной модели численные результаты будут иметь в значительной степени качественный характер и могут рассматриваться как первое приближение.

Имеется модификация программы TRAMS-TWEL для расчета плавления имитатора твэлов посредством пропуска электрического тока через центральный нагреватель либо непосредственно через токопроводящий сердечник (программа TRAMS-W).

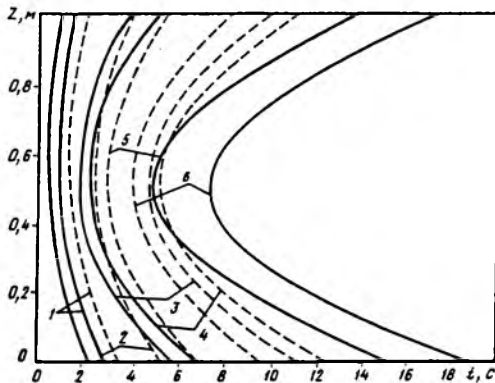
Для расчета плавления стенок чехлов аварийной и соседней ТВС расплавленным топливом предназначена программа TRAMS-DUCT. В физической модели принимается, что в начальный момент мгновенно наступает идеальный контакт между топливом и стенкой чехла, сохраняющийся в течение последующего времени. На каждом шаге по времени рассчитывается в плоской геометрии распределение температуры в направлении нормали к поверхностям в стенках чехлов, затвердевшем расплаве топлива, образующемся у стенки. В результате расчетов определяется время плавления стенок. Распределение температуры рассчитывается и в прилегающей жидкой топливной массе в приближении ее неподвижности. Это справедливо, если передача тепла конвекцией (по направлению к затвердевшему расплаву) незначительна по сравнению с передачей теплопроводностью. В таком расплаве кипение топлива учитывается приближенно в соответствии с двумя моделями: испарение поверхностное или в объеме вещества. При движении вдоль стенки температура топливной массы задается в исходных данных, на ее границе с затвердевшим расплавом принимается конвективное условие теплообмена. Затвердевший расплав топлива у стенки считается устойчивым по отношению к механическим воздействиям [10]. Принимается, что в момент закипания натрия в межпакетном зазоре жидкость мгновенно вытесняется паром, а в момент плавления первой стенки мгновенно наступает идеальный контакт между мате-

риалом и стенкой чехла соседней ТВС. На границе второй стенки с циркулирующим в соседней ТВС теплоносителем принимается условие конвективной теплоотдачи. Предполагается, что в случае достижения тепловым потоком на этой границе заданной в исходных данных критической плотности образуется устойчивая пленка пара, резко уменьшающая теплоотдачу.

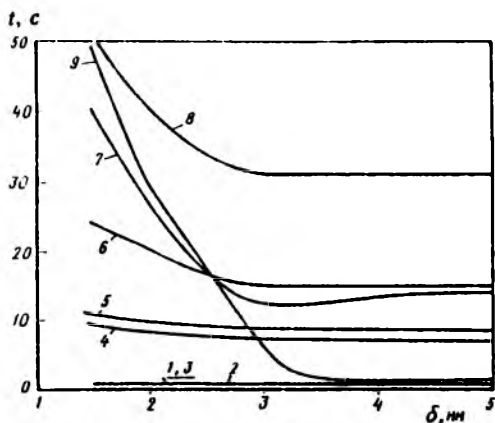
Для расчета затвердевания топливной частицы в объеме теплоносителя предназначена программа TRAMS-BALL. В процессе расчета в сферической системе координат на каждом шаге по времени определяются концентрическое распределение температуры по радиусу и координаты фазовых границ в частице и окружающем теплоносителе. Модель пленочного кипения принимается в момент закипания в том случае, если начальная температура поверхности частицы выше температуры стабильного кипения паровой пленки $T_{\min}$ [11]. Когда температура поверхности опускается ниже $T_{\min}$, принимается модель идеального контакта с жидкой фазой теплоносителя.

В настоящей статье приводятся результаты рассмотрения с помощью программ TRAMS-TWEL и TRAMS-DUCT аварии с полной блокировкой проходного сечения в отдельной ТВС с внутрикассетной гетерогенностью (при соотношении числа топливных и сырьевых твэлов два к одному). Расчеты проведены для начала кампании БН-1600, когда мощность твэлов с воспроизводящим материалом составляет около 1/3 мощности твэлов с топливом.

Результаты расчетов закипания натрия и плавления твэлов в гетерогенной ТВС с наибольшей мощностью приведены на рис. 1. Учен теплообмен между одним топливным твэлом (с диоксидом урана) и двумя сырьевыми твэлами (с металлическим ураном) в соответствии с описанной методикой. В такой ТВС при аварии сырьевые твэлы будут нагреваться за счет собственного тепловыделения и дополнительно за счет передачи тепла от топливных твэлов. Температура натрия достигает точки насыщения в центральной плоскости активной зоны примерно через 0,7 с с момента перекрытия сечения ТВС на входе, далее зона кипения расширяется вверх и вниз. Толщина пленки натрия, остающейся на оболочках твэлов после закипания, принималась равной 1,5 мм, что соответствует объемной доле $\sim 0,2$, принятой в соответствии с работой [1]. Расширение пузыря пара в высотном направлении в еще недогретые до кипения области не учтено. Испарение такой пленки на твэлах с оксидным топливом в центральной плоскости продолжается примерно 0,3 с, после этого через 0,4 с закипает пленка на сырьевых твэлах и испаряется в центре за 1,1 с. Плавление начинается с оболочек твэлов с диоксидом урана в момент времени 2 с после начала аварии. В центральной плоскости продолжительность плавления составляет 0,4 с. Плавление сырьевых твэлов начинается с имеющего более низкую температуру плавления металлического урана, а не с оболочки. В центральной плоскости плавление начинается в момент 3,1 с и завершается через 4,2 с с начала аварии, оболочки расплавляются в момент 5,4 с. Плавление оксидного топлива, начинающееся чуть ранее последнего из указанных моментов времени, в центре заканчивается через 7,5 с после блокировки. Такая последовательность плавления элементов твэлов одинакова по всей высоте активной части ТВС, на концах плавление происходит позднее. Существенно, что за счет передачи тепла от топливных



Р и с. 1. Время испарения натрия и плавления элементов твэлов по высоте активной части гетерогенной ТВС с момента полной блокировки сечения на входе: —, --- — топливный и сырьевой твэл соответственно; 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6 — начало и окончание испарения пленки натрия, плавления оболочки и сердечника твэла соответственно



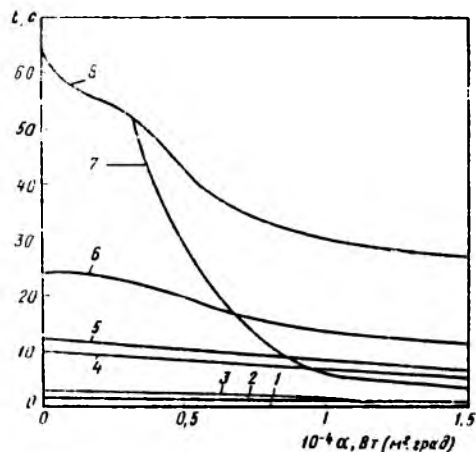
Р и с. 2. Характерные моменты в процессе проплавления стенок чехлов аварийной и соседней ТВС в зависимости от начальной толщины неподвижного слоя расплавленного топлива: 1 — начало затвердевания топлива у стенки; 2 — закипание межпакетного теплоносителя; 3 — начало плавления стенки чехла аварийной ТВС; 4 — проплавление стенки чехла аварийной ТВС; 5 — кризис теплоотдачи к теплоносителю соседней ТВС; 6 — начало плавления стенки чехла соседней ТВС; 7 — расплавление затвердевшего расплава; 8 — проплавление стенки чехла соседней ТВС; 9 — начало кипения топлива

твэлом с высоким тепловыделением металлический уран, а также оболочки сырьевых твэлов плавятся раньше оксидного топлива. Расчеты без учета обмена тепла между твэлами с разным тепловыделением показывают иную последовательность — оксидное топливо плавится прежде воспроизводящего материала. Поскольку последовательность плавления материалов активной зоны важна в оценке эффектов реактивности от последующего перемещения расплавленных материалов, способных повлиять на ход изменения мощности в случае расширения аварии на большее число ТВС, учет фактора такого обмена тепла имеет принципиальное значение. Приведенное на рис. 1 время, преимущественно в нижней части, можно, продолжив итерации, дополнительно уточнить за счет упомянутого учета перемещения расплавленных материалов.

Расчетное время плавления стенки чехла аварийной ТВС слоем расплавленного топлива толщиной 2,4 мм при номинальном удельном тепловыделении (максимальном по активной зоне) составляет 8 с. Указанная начальная толщина слоя топлива выбиралась из условия непревышения его температурой точки кипения. В случае наступления кризиса теплоотдачи к теплоносителю соседней ТВС проплавится и вторая стенка. Время плавления двух стенок составляет примерно 34 с. Существенным фактором в таких оценках является поведение прослойки из расплавленной стали между топливом (затвердевшим расплавом) и затвердевшим материалом стенок. Приведенное время получено при условии сохранения жидкой стальной прослойки в течение всего времени процесса. Отток жидкой стали ускоряет плавление стенок. В таком случае проплавление обеих стенок чехлов наступит не ранее чем через 16 с.

Расчеты показали, что время плавления стенок чехлов существенно зависит от начальной толщины неподвижного слоя топлива в диапазоне 1,5—3 мм (рис. 2). При попадании на стенку большая масса топлива быстро начинает закипать, в результате толщина слоя у стенки составит не более 2,5—3 мм. Время проплавления обеих стенок чехлов первоначально большой неподвижной массой расплавленного топлива составит не менее ~ 31 с при сохранении жидкой стали между топливом и затвердевшей частью стенок (см. рис. 2), при полном удалении расплавленного материала — не менее 10 с.

В расчетах принималось, что на чехол попадает неподвижный слой топлива, который является первоначально тонким либо в результате кипения быстро становится тонким. Наиболее тяжелые условия могут быть, очевидно, при продолжающемся притоке массы жидкого топлива к стенке чехла в течение



Р и с. 3. То же, что на рис. 2, в зависимости от коэффициента теплоотдачи большой массы расплавленного топлива

времени плавления топлива в аварийной ТВС. В таких расчетах принято условие конвективной теплоотдачи от большой массы расплавленного топлива, его начальная температура принята равной температуре кипения диоксида урана. В диапазоне коэффициента теплоотдачи от движущегося вдоль стенки чехла жидкого топлива ($0-1,5$) 10^4 Вт/(м²·град) [10] время проплавления двух стенок составит 64—27 с (рис. 3). В случае оттока жидкой стали минимальное время плавления стенок чехлов всего 7 с.

Ввиду того, что попадание топлива на стенку чехла возможно только после его расплавления в наиболее горячем сечении, минимальное время распространения аварии на соседние ТВС (от момента перекрытия аварийной ТВС) в настоящем анализе равно 15 с.

С помощью комплекса одномерных программ TRAMS наиболее эффективно рассчитываются поля температуры с учетом фазовых превращений в материалах со значительным преобладанием градиента температуры в одном из координатных направлений, что характерно для рассмотренных явлений. Обобщенный подход позволяет решать новые конкретные задачи, возникающие при рассмотрении аварий, путем формирования специфических условий в дополнительных программных модулях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уолтер А., Рейнольдс А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Бухша Ю.К., Багдасаров Ю.Е., Забудько Л.М., Кузнецов И.А. Анализ максимальной проектной аварии в активной зоне быстрого реактора. — Атомная энергия, 1985, т. 59, вып. 2, с. 112—116.
3. Галактионов В.В., Езерский А.П. Анализ процесса плавления с учетом свободной конвекции. — ИФЖ, 1983, т. 44, № 4, с. 689.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнение математической физики. М.: Наука, 1977.
5. Власичев Г.Н. Метод численного решения одномерных задач Стефана двух типов. — ИФЖ, 1993, т. 65, № 3, с. 332—340.
6. Власичев Г.Н., Семенчиков М.А. Моделирование плавления цилиндрических элементов. — В кн.: Актуальные вопросы научно-технического прогресса и внедрения в практику. Тез. докл. науч. конф. молодых ученых Волго-Вятского региона. Горький, 1984, с. 191—192.
7. Усынин Г.Б., Аношкин Ю.И., Власичев Г.Н. и др. Модельное изучение процессов, возникающих при перегреве твэлов. — Атомная энергия, 1986, т. 61, вып. 5, с. 347—350.
8. Власичев Г.Н., Усынин Г.Б., Аношкин Ю.И. Задача Стефана в расчетной модели теплового взаимодействия расплавленного тепловыделяющего материала с конечными стенками. — ИФЖ, 1986, т. 51, № 5, с. 825—830.
9. Wright S., Mast P., Schumacher G., Fisher E. In-core fuel disruption experiments simulating LOF accidents for homogeneous and heterogeneous core LMFBRs: FD2/4 series. — In: Proc. LMFBR Safety Topical Meeting, Lyons, July 1982.
10. El-Genk M., Moore R. Freezing and melting in finite media, with an assessment of molten fuel containment capability of the SLSF. — Nucl. Engng Design, 1980, № 56, p. 413—428.
11. Усынин Г.Б., Аношкин Ю.И., Боддин С.В. Тепловое взаимодействие типа парового взрыва в ЯЭУ. — Атомная техника за рубежом, 1989, № 8, с. 3—7.

Поступила в Редакцию 28.04.94

УДК 621.039.58

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ РЕАКТИВНОСТНОЙ АВАРИИ, СВЯЗАННОЙ С ПОПАДАНИЕМ В ВОДУ КОСМИЧЕСКОЙ ЯЭУ «ТОПАЗ-2»

Глушков Е.С., Ермошин М.Ю., Пономарев-Стенной Н.Н., Скорлыгин В.В.
(Ин-т ядерных реакторов РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Реактор космической ЯЭУ, известной как «Топаз-2» [1], является малогабаритным термоэмиссионным реактором-преобразователем с гидридциркониевым замедлителем и физически тонкими бериллиевыми торцевыми и боковым отражателями. Его особенностью является большая утечка нейтронов, которая уменьшается при попада-