

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039.586

А.В. Андреева, Г.Н. Власичев

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ АВАРИИ С БЛОКИРОВКОЙ ОТДЕЛЬНОЙ ТВС РЕАКТОРА БН В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Цель исследования: Доказательство эффективности средств обнаружения аварии с блокировкой отдельной ТВС и аварийной защиты реактора БН.

Результаты: Выполнен расчетный анализ аварии с блокировкой отдельной ТВС при различных уровнях мощности реактора. Получены высотные зависимости времен выпаривания натрия, расплавления оболочки и топливного сердечника. Анализ результатов показал, что проектный предел при данной аварии выполняется. Срабатывание аварийной защиты по сигналу системы контроля герметичности оболочек твэлов ограничит аварию пределами одной аварийной ТВС.

Применение: Возможность применения результатов исследования для выработки технических и организационных мер по предотвращению, управлению и ограничению последствий аварий для настоящих и будущих реакторов типа БН.

Ключевые слова: безопасность реакторов БН, проектная авария, тепловыделяющая сборка, выкипание натрия, плавление твэлов.

Введение

Существующая концепция безопасности ядерного реактора включает рассмотрение проектных и запроектных аварий [1]. В число проектных аварий реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (реактора БН) входят аварии с локальным нарушением расхода.

Уменьшение или прекращение расхода теплоносителя в отдельной тепловыделяющей сборке (ТВС) возможно в результате частичного или полного перекрытия сечения для прохода теплоносителя. Авария с закупоркой тепловыделяющей сборки может произойти при попадании посторонних предметов в хвостовик кассеты или в нижнюю решетку пучка тепловыделяющих элементов (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.

Процесс развития проектной аварии с блокировкой проходного сечения отдельной ТВС при работе реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (реактора БН) на мощности представляет интерес, в первую очередь, с точки зрения распространения повреждений на соседние ТВС. Анализ распространения аварии в радиальном направлении в активной зоне важен для разработки в проекте реакторной установки мер по предотвращению повреждения тепловыделяющих элементов в объеме за пределами аварийной ТВС.

Проектный предел повреждения твэлов для проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС для реактора БН состоит в разрушении твэлов аварийной ТВС с непревышением

пределов безопасной эксплуатации по повреждению твэлов во всем остальном объеме активной зоны [1]. По результатам анализа должно быть очевидно, что не нарушается установленный проектный предел. Для предотвращения развития проектной аварии за пределы одной ТВС активной зоны и соответственно перехода аварии в разряд запроектных необходима своевременная остановка реактора средствами воздействия на реактивность (аварийной защитой). Для обоснования эффективности средств обнаружения аварий и аварийной защиты (доказательства своевременности срабатывания аварийной защиты) необходим детальный анализ аварии, в результате которого должны быть определены временные параметры ее развития. Предельные временные характеристики аварийных процессов могут быть получены в консервативном анализе с постулированием полного мгновенного прекращения расхода. Возможный сценарий развития аварии с прекращением расхода в отдельной ТВС определяется возможностями диагностики аварии на различных этапах ее протекания. При своевременном обнаружении и срабатывании аварийной защиты реактора развитие этой аварии ограничится установленным для нее проектным пределом повреждения твэлов. Для обнаружения аварии с блокировкой отдельной ТВС в реакторе БН предназначена штатная система контроля герметичности оболочек твэлов по запаздывающим нейтронам на входе в промежуточный теплообменник (система КГО). Выход источников запаздывающих нейтронов из твэлов в теплоноситель происходит при разгерметизации твэлов в процессе их перегрева либо расплавления оболочек на наиболее теплонапряженных участках.

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 и сопровождающих 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 [2] с образованием стальных блокировок каналов для теплоносителя в области нижней зоны воспроизводства [3]. После стальных оболочек плавятся таблетки топлива, образуя в случае продолжения работы реактора на мощности расплавленный и затем кипящий бассейн из топлива и стали. Высокие тепловые потоки от кипящего бассейна к чехлу [2] приводят к плавлению и разрушению чехлов аварийной и соседних ТВС и проникновению расплава в межчехловые зазоры [4] и, возможно, в окружающие ТВС. Чтобы избежать распространения аварии за пределы аварийной ТВС, реактор должен быть остановлен до достижения кипящего бассейна в этой сборке [2]. Проникновение расплава в окружающие ТВС с образованием полной блокировки происходит очень быстро – в случае образования кипящего бассейна в аварийной ТВС за 1-2 с [2, 5].

Возможность обнаружения аварии детектированием запаздывающих нейтронов подтверждается экспериментами программы SCARABEE [6]. При свежем топливе достаточно сильный сигнал может быть получен после повреждения чехла тепловыделяющей сборки 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 [6], источники запаздывающих нейтронов выносятся к выходу из аварийной ТВС непосредственно после разрыва оболочек твэлов, что обеспечит своевременное детектирование аварии и ограничение ее проектными пределами. Такая авария может распространиться на всю активную зону в случае множественных отказов в системе аварийной защиты реактора.

Анализ проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС при работе реактора БН на номинальной мощности показал, что проектный предел при данной аварии выполняется [7]. Срабатывание аварийной защиты по сигналу системы КГО ограничит аварию пределами одной аварийной ТВС – проектным пределом повреждения твэлов. Для доказательства безопасности быстрого реактора при данной аварии необходим анализ во всех возможных режимах работы, в частности на уровнях пониженной мощности, с облученным и свежим топливом.

Методика исследования

Расчетная модель динамики разогрева и плавления твэла описывает нестационарный теплообмен в отдельном цилиндрическом твэле с учетом плавления оболочки и топлива при аварии с прекращением расхода. В процессе расчета динамики теплообмена в отдельном твэле и прилегающей эффективной кольцевой ячейке (канале) определяются на каждом шаге по времени осесимметричные распределения температуры в радиальном направлении (в цилиндрической системе координат) и координаты фазовых границ для отдельного высотного участка.

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 эффективную кольцевую ячейку теплоносителя. Две дополнительные расчетные области используются для учета выталкивания части жидкого теплоносителя из рассчитываемого поперечного сечения пузырьком паров натрия из соседних по высоте канала, более нагретых участков.

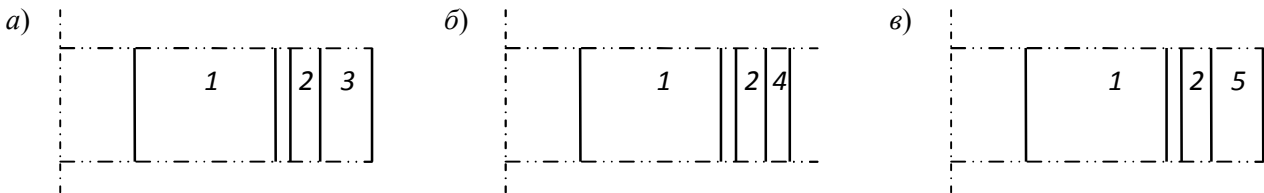


Рис. 1. Расчетные схемы радиального теплообмена в твэле в характерных состояниях в аварийном процессе после прекращения расхода:

a – до закипания натрия; *б* – после закипания натрия; *в* – после высыхания пленки жидкого натрия; 1 – топливный сердечник; 2 – оболочка; 3 – жидкий натрий; 4 – пленка жидкого натрия; 5 – пары натрия

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

$$\begin{aligned} & c\rho(r, z, T) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} + R_m \delta(T - T_m) \left] \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \right. \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(r, z, T) r \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(r, z, T) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] + q_v(r, z, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где r – радиальная координата с центром на оси твэла; z – высотная координата; t – время; T – температура; λ – коэффициент теплопроводности; $c\rho$ – объемная теплоемкость; q_v – удельное тепловыделение (единицы объема); $\delta(T - T_m) = 0$ при $T \neq T_m$. На границе раздела фаз температура равна температуре фазового перехода (T_m), этим условием определяется текущее положение границы раздела.

Для описания плавления в топливе, характеризующемся распределенным по объему тепловыделением и значительным интервалом температур ликвидуса и солидуса, используется приближение двухфазной зоны. В нем поле температуры в топливном сердечнике твэла описывается обыкновенным уравнением теплопроводности (без члена с δ -функцией), а скрытая теплота учитывается в величине объемной теплоемкости по следующей формуле:

$$c\rho_{SL} = R_m / \Delta T_m + [c\rho_S(T_m) + c\rho_L(T_m + \Delta T_m)] / 2, \quad (2)$$

где R_m – теплота плавления; ΔT_m – перепад температуры в двухфазной зоне; L , S , SL – индексы жидкой и твердой фаз, двухфазной зоны соответственно.

Приведенные уравнения дополняются системой краевых условий на границах расчетных областей – топлива, оболочки, эффективной кольцевой ячейки натриевого теплоносителя, а также начальными условиями.

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 результате расчетов ряда высотных участков определяются времена выпаривания натрия и плавления элементов по всей длине активной части твэла.

Величина коэффициента термической проводимости в зазоре между топливом и оболочкой рассчитывается в данной модели с учетом газовой и лучистой составляющих. Учет лучистой составляющей в термической проводимости зазора обуславливается рассматриваемыми нестационарными температурными режимами. При подъеме температуры вплоть до точки плавления сильно возрастает доля лучистой составляющей теплообмена.

В данной версии модели расчеты напряженно-деформированных состояний твэла не производятся, расчет теплообмена продолжается до полного расплавления оболочки и топлива в рассчитываемом 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 механизмом 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 % [8].

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. После выпаривания пленки натрия на поверхности твэла принимается условие лучистого теплообмена. Плотность потока лучистой энергии с осушенной от теплоносителя поверхности отдельного твэла в ТВС, ослабляющегося за счет отражения от поверхностей окружающих твэлов, определяется с учетом расположения рассчитываемого твэла в пучке, плотности упаковки и числа рядов твэлов в сборке.

Система дифференциальных уравнений, описывающая теплообмен в элементах твэла и на границах с учетом плавления, а также в кольцевой ячейке теплоносителя, решена численно и реализована в компьютерной программе TRAMS-TWEL [9]. Данная программа позволяет получить высотные зависимости времен выпаривания натрия, плавления оболочки и топливного сердечника.

Результаты исследования

Расчеты аварийного разогрева твэл и расплавления топливного сердечника и стальной оболочки по программе TRAMS-TWEL выполнены при номинальном и пониженных уровнях мощности реактора БН. В данном консервативном анализе примем, что разгерметизация твэлов происходит после расплавления оболочек твэлов на наиболее теплонапряженных участках.

В результате расчетов при номинальной мощности ТВС, равной 4,2 МВт, получено, что температура натрия достигает точки насыщения сначала в центре по высоте активной зоны примерно через 0,7 с после прекращения расхода в ТВС, далее зона кипения расширя-

ется вверх и вниз (рис. 2, а). Расплавление оболочки твэла наступает первоначально в центре через 3,6 с после прекращения расхода.

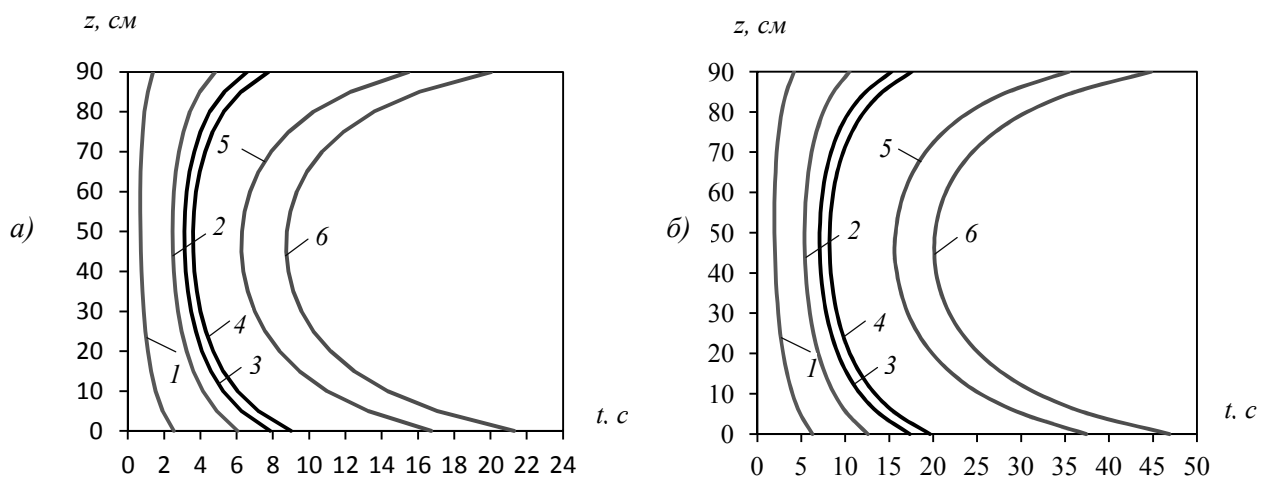


Рис. 2. Времена начала (1) и окончания (2) выпаривания натрия, начала (3) и окончания (4) расплавления оболочки, начала (5) и окончания (6) расплавления топливного сердечника по высоте твэл:

а – при мощности ТВС, равной 4,2 МВт; б – при мощности ТВС, равной 2 МВт

Расчет перемещения расплава оболочки вдоль твэла под действием силы тяжести, сил трения от восходящего потока паров натрия и противодействующих сил трения о твердый топливный сердечник показал, что верхняя граница стальной пленки не достигает верха активной зоны [7]. Следовательно, блокировок каналов для прохода теплоносителя затвердевающим расплавом оболочек в верхней части активной зоны не произойдет. При этом источники запаздывающих нейтронов будут выноситься к выходу из аварийной ТВС непосредственно после разрыва либо расплавления оболочек твэлов. В результате последующего опускного перемещения жидкой стальной пленки происходит полная закупорка проходного сечения в нижней зоне воспроизводства в результате затвердевания расплава.

Плавление топливного сердечника в центральной плоскости активной зоны начинается в момент 6,3 с и заканчивается через 8,7 с после прекращения расхода. В момент 21 с топливо расплавляется по всей высоте твэл.

В результате расчетов при пониженной мощности ТВС, в частности при 2 МВт (рис. 2, б), времена выпаривания натрия, плавления оболочки и топливного сердечника увеличиваются. Так, расплавление оболочки твэла в центре при мощности ТВС, равной 2 МВт, наступает только через 8,2 с после прекращения расхода. Однако увеличиваются и времена расплавления топливного сердечника в центральной плоскости активной зоны – в момент 20 с и по всей высоте твэл – в момент 46 с.

После расплавления топлива на наиболее теплонапряженном участке твэл (в области центральной плоскости активной зоны) возможно попадание небольшого количества расплава топлива на стенку чехла аварийной ТВС. Это может привести к проплавлению стенок чехлов аварийной и соседней ТВС. При своевременной остановке реактора и соответствующем снижении тепловыделения в топливе до остаточного радиальное распространение аварии с повреждением стенок чехлов и, возможно, твэлов окружающих ТВС, прекращается.

При облученном топливе источники запаздывающих нейтронов выносятся к выходу из аварийной ТВС непосредственно после разрыва оболочек твэлов, после чего они в потоке теплоносителя беспрепятственно достигнут детектора системы контроля герметичности оболочек твэлов на входе в промежуточный теплообменник реактора. Для срабатывания ава-

рийной защиты за счет такого сигнала в реакторе БН требуется время около 5–10 с [10], необходимое преимущественно для переноса источников запаздывающих нейтронов до детектора системы КГО.

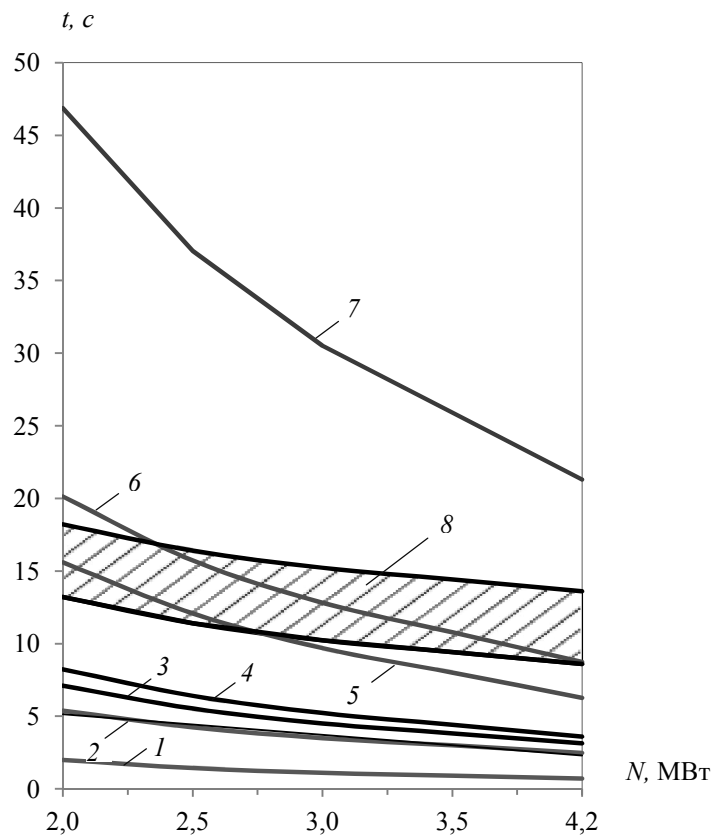


Рис. 3. Времена начала (1) и окончания (2) выпаривания натрия, начала (3) и окончания (4) расплавления оболочки, начала (5) и окончания (6) расплавления топливного сердечника в центральном сечении активной зоны, полного расплавления топлива (7), время срабатывания аварийной защиты (8) в зависимости от мощности ТВС

При номинальной мощности ТВС, равной 4,2 МВт, с учетом указанного времени переноса источников запаздывающих нейтронов до детектора время срабатывания АЗ после расплавления оболочек в центральной плоскости активной зоны составит около 8–13 с от момента исходного события аварии. Это произойдет во время расплавления топлива на наиболее теплонапряженном участке твэл либо немного позже (не более, чем на 5 с) (рис. 3). В случае остановки реактора и соответствующего снижения тепловыделения в топливе до остаточного до начала плавления стенки чехла аварийной ТВС при попадании на нее тонкого слоя топлива плавления стенки не произойдет. Топливо будет продолжать разогреваться, но значительно медленнее, под действием только остаточного тепловыделения; по мере его спада плавление прекратится и начнется постепенное остывание. Поскольку минимальное время проплавления стенки чехла аварийной ТВС тонким неподвижным слоем топлива при наихудших предпосылках составит примерно 5 с, плавление стенок в худшем случае ограничится одной стенкой чехла аварийной ТВС либо частью, без повреждения стенки соседнего чехла.

При меньших значениях мощности ТВС превышение верхнего предела времени срабатывания аварийной защиты, равного 10 с, над временем расплавления топлива на наиболее теплонапряженном участке твэл уменьшается (рис. 3), и при мощности ТВС, равной немного более 2 МВт, срабатывание аварийной защиты произойдет ранее расплавления топлива

на теплонапряженном участке либо, возможно, и до начала плавления (если время срабатывания аварийной защиты после выхода источников запаздывающих нейтронов из аварийной ТВС будет составлять только 5 с). Следовательно, протекание рассматриваемой аварии будет более безопасным при пониженных уровнях мощности реактора.

Следует отметить, что срабатывание аварийной защиты будет происходить всегда намного раньше расплавления топлива по всей высоте активной части тепловыделяющего элемента (рис. 3), в случае которого становится возможным попадание большой массы расплавленного топлива на стенку чехла ТВС и соответственно более быстрое проплавление стенки.

В результате облученное топливо будет локализовано пределами одной аварийной ТВС – проектным пределом повреждения твэлов при номинальном уровне мощности реактора, а также и при любом частичном уровне мощности.

Заключение

Выполнено исследование аварии с блокировкой проходного сечения отдельной тепловыделяющей сборки быстрого реактора с натриевым теплоносителем при номинальном и пониженных уровнях мощности реактора. В результате расчетов получены высотные зависимости времени начала и окончания выпаривания натрия, расплавления оболочки и топливного сердечника. Анализ результатов показал, что проектный предел при данной аварии выполняется. Срабатывание аварийной защиты по сигналу системы контроля герметичности оболочек твэлов ограничит аварию пределами одной аварийной ТВС – проектным пределом повреждения твэлов.

Библиографический список

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП 082 07 // Ядерная и радиационная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 52–77.
2. **Kayser, G.** Main SCARABEE Lessons and Most Likely Issue of the Sub-assembly Blockage Accident / G. Kayser, G. Berthoud, K. Schleisiek [et al.] // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3–7, 1994. – Obninsk, 1994. – V. 2. – P. 2/146–2/155.
3. **Moxon, D.** SCARABEE – an Interpretation of the Pump Trip and Inlet Blockage Series / D. Moxon, J. Papin, P. Obry, P. Soussan // Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. of an international conference held in Guernsey on 12-16 May 1986. – BNES, London, 1987. – V. 1. – P. 263–268.
4. **Papin, J.** 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.
5. **Schwarz, M.** The SCARABEE PV A Test for Melt Propagation of a Boiling Pool into a Neighbouring Pin Bundle / M. Schwarz, G. Kayser, C. Jamond // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3–7, 1994. – Obninsk, 1994. – V. 2. – P. 2/102–2/111.
6. **Charpenel, J.** Release of Delayed Neutron Emitters in SCARABEE Experiments / J. Charpenel, G. Kayser, R. Sesny, J.P. Trapp // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3-7, 1994. – Obninsk, 1994. – V. 2. – P. 2/112-2/121.
7. **Власичев, Г.Н.** Анализ проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем / Г.Н. Власичев // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/120-16588> (дата обращения: 24.12.2014).
8. **Wright, S.A.** In-core Fuel Disruption Experiments Simulating LOF Accidents for Homogeneous and Heterogeneous Core LMFBRs: FD2/4 Series / S.A. Wright, P.K. Mast, G. Schumacher, E.A. Fischer. // Proc. of the LMFBR Safety Topical Meeting, Lyons, 19–23 July 1982. – V. 2. – P. 123–132.
9. Расчет аварийного разогрева и расплавления цилиндрического твэла ядерного реактора (TRAMS-TWEL): программа для ЭВМ № гос. регистрации 2014616006 от 09.06.2014 РФ / Власичев Г.Н.; Бюл. № 7(93) 2014.

10. Швецов, Ю.Е. Расчетный анализ эффективности контроля повреждений твэлов с помощью секторной системы «КГО» // В кн.: Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах: Материалы Российской межотрасл. конф. «Теплофизика-2005». Т. 1. Тез. докл. – Обнинск, 16–18 ноября 2005 г. – Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2005. – С. 44–45.

*Дата поступления
в редакцию 05.04.2018*

A.V. Andreeva, G.N. Vlasichev

**ANALYSIS OF THE DESIGN-BASIS ACCIDENT WITH BLOCKAGE
OF LIQUID METAL FAST REACTOR INDIVIDUAL FUEL ASSEMBLY
IN VARIOUS OPERATION MODES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Substantiation of the detecting means effectiveness of accident with blockage of individual fuel assembly and emergency protection of fast reactor.

Results: Analysis of the design-basis accident with blockage of Liquid Metal Fast Reactor individual fuel assembly in various reactor power levels is executed. The altitude dependences of the evaporation times of sodium, of the melting times of pin cladding and fuel are received. Analysis showed that design limit under this accident is performed. The emergency protection actuation by fuel failure detection system signal will limited the accident within one damaged fuel assembly by design pins failure limit.

Application: The possibility of applying of the scientific study results to develop of technical and organizational measures to prevent, manage and limit of the accidents consequences for current and future fast reactors.

Key words: BN reactors safety, design-basis accident, fuel assembly, sodium boiling over, melting of fuel rods