

отношением массы введенного железа к массе расплава  $k = m_{\text{Fe}}/m_{\text{расп}} \approx 0,02$ . Варьировали только время выдержки расплава с железом: 10, 30 и 60 мин. Временная зависимость концентрации U, Zr и Fe показывает, что основной массообмен в системе расплав—железо протекает за время не более 10 мин. Если оценивать взаимодействие расплава со сталью по установившейся концентрации атомов урана и циркония в металлической фазе, то можно заключить, что при одинаковой начальной массе железа интенсивность взаимодействия снижается по мере увеличения степени окисления. В экспериментах № 2, 6—8 использовали исходные брикеты с различной степенью окисления С-32, -50, -70, -100 соответственно с отношением  $m_{\text{Fe}}/m_{\text{расп}} \approx 0,02$ . Эксперименты проводили при одинаковой выдержке 10 мин в температурном интервале 2500—2650 °С (рис. 3).

При контакте расплава С-100 с железом, как установлено в эксперименте № 8, взаимодействие минимально. Железо насыщается ураном и цирконием до массовой доли 0,1—0,2%, имея меньшую плотность, располагается на поверхности расплава. Зависимость соотношения массы равновесных оксидной и металлической фаз, образующихся при взаимодействии железа с оксидным расплавом ( $C \sim 32$ ,  $U/Zr = 1,2$ ), от начального соотношения имеет вид

$$K_2 = 2,924 K_1,$$

где  $K_1 = m_{\text{Fe}}/m_{\text{расп}}$ ;  $K_2 = m_{\text{мет.фаза}}/m_{\text{окс.фаза}}$ .

Образующаяся металлическая фаза во всех экспериментах содержит кислород. Очевидно, что в условиях экспериментов кислород вместе с

ураном и цирконием переходит из оксидного расплава в расплавленное железо. После отключения высокочастотного генератора в процессе кристаллизации происходит распад однородного металлического расплава на фазовые составляющие. Рентгеноструктурным анализом в металлической фазе полученного слитка во всех экспериментах было установлено наличие твердых растворов  $(U, Zr)O_2$  и интерметаллидов типа  $(U, Zr)Fe_2$ . Сопоставление экспериментов № 9 и 15 показывает, что при переходе от железа к стали основные результаты взаимодействия сохраняются.

Установленные процессы образования страстифицированного расплава активной зоны ВВЭР представляются ключевыми с точки зрения его удержания внутри корпуса реактора и обоснования процедур управления аварией как на внутри-, так и внекорпусной стадии.

Таким образом, исследования показали, что в температурной области 2500—2600 °С в результате взаимодействия недоокисленных расплавов С-32—С-70 ( $U/Zr = 1,2$ ) с железом образуются несмешивающиеся в расплавленном состоянии оксидная и металлическая фазы. Расплавленное железо насыщается ураном, цирконием и кислородом. Плотность металлической фазы становится больше плотности оксидного расплава, что приводит к ее перемещению на дно. Определенный состав сосуществующих оксидных и металлических фаз может служить основой для построения термодинамических моделей расплавов в системе  $U-Zr-O-Fe$ .

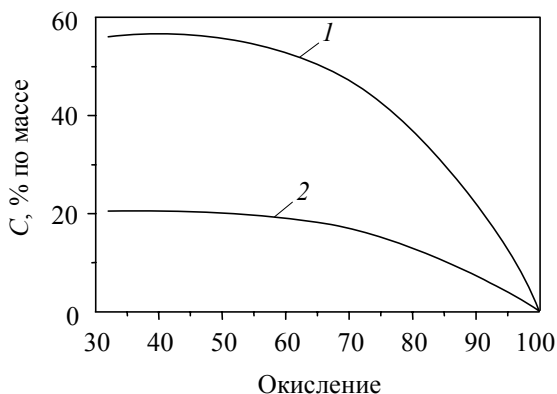
#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асмолов В.Г., Загряжский В.Н., Цуриков Д.Ф. Термодинамика  $U-Zr-O-Fe$  расплавов. — Теплофиз. высоких темп., 2007, т. 45, № 3, с. 347—354.
2. Асмолов В.Г., Цуриков Д.Ф., Вишневский В.Ю. и др. Исследование процессов взаимодействия в корпусе реактора типа ВВЭР-1000 при тяжелой аварии. Взаимодействия расплавов оксидного корнума и стали: Препринт ИАЭ-6423/3, 2006.

Поступила в Редакцию 17.07.07

УДК 662.998

#### АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РБМК ПРИ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ



Р и с. 3. Зависимость концентрации урана (1) и циркония (2) в металлической части слитка от степени окисления

Ткачев В.В., Михайлов Д.А., Желтухин К.К. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Для уменьшения последствий аварии требуется реализация мер по ее управлению, а также защите персонала и населения. Эти мероприятия содержатся в руководстве по управлению запроектной аварией. Основой для его разработки в соответствии с ОПБ-88/97 является анализ последствий аварий. Обсуждению результатов такого анализа в части, касающейся развития повреждений элементов активной зоны РБМК при запроектной аварии с разогревом осушенной активной зоны, и посвящена настоящая статья.

Многообразие путей протекания аварии и ограниченность прямых средств контроля параметров приводят к тому, что в значительной мере состояние активной зоны и ход развития аварии могут быть определены в основном по косвенным признакам. Некоторые характерные признаки могут проявиться сравнительно быстро, другие через значительный интервал времени после исходного события. Для выбора конкретной последовательности корректирующих мер и действий по восстановлению критических функций безопасности необходимо, в частности, оценить время развития аварии, ожидаемые повреждения активной зоны, т.е. определить тип аварии.

Запроектную аварию можно классифицировать по характерному времени развития, причине возникновения, тяжести повреждений активной зоны. Знание характерного времени развития, особенно оценка интервала времени, которым располагает персонал для блокирования неблагоприятного развития аварии, необходимы для определения стратегии управления ею. Установление причины возникновения аварии позволяет оптимизировать корректирующие действия персонала и действия по восстановлению и поддержанию критических функций безопасности. Оценка возможного уровня тяжести аварии позволяет дать информацию для органов государственного управления, на основании которой будут приниматься решения по развертыванию необходимого количества сил и средств в рамках действий по ослаблению ее последствий и введению в действие плана по защите персонала.

Анализ типовой запроектной аварии показал, что после внедрения на РБМК второй системы останова (комплексной системы контроля, управления и защиты в рамках программы мо-

дернизации энергоблоков) риск приводящих к тяжелому повреждению активной зоны быстропротекающих процессов, которые характерны для запроектных аварий типа ATWS (ожидаемые переходные режимы без срабатывания аварийной защиты), LOCA (авария с потерей теплоносителя) с отказом функции заглушения реактора, снижен до менее  $10^{-7}$  1/год. Аварии с потерей теплоносителя, вызывающие стагнацию расхода теплоносителя в группе каналов — разрывы раздаточного группового коллектора и опускных трубопроводов с незакрытыми обратными клапанами на соседних коллекторах, не приводят к опасному разогреву канальных труб при высоком давлении в контуре. Разрыв нескольких труб топливных каналов опасен с точки зрения целостности герметичности активной зоны реактора. Оболочки твэлов в каналах этих коллекторов могут быть повреждены. Наиболее опасным процессом, приводящим к стагнации расхода в каналах одного коллектора на первой фазе аварии, является частичный разрыв сечением 170—240 см<sup>2</sup>. При разрыве такого сечения давление в контуре многократной принудительной циркуляции снижается медленно. Расчетные исследования частичных разрывов показали, что запас до температуры разрыва труб каналов этого коллектора мал. Оболочки твэлов будут разгерметизированы. Но и вероятность частичных разрывов раздаточных групповых коллекторов опасного сечения мала.

При разрыве трубопроводов большого диаметра с наложением отказа функции аварийного охлаждения реактора разгерметизация твэлов возможна через 15 мин после исходного события. Нарушение целостности канальных труб, приводящее к опасности разрушения реакторного пространства, для этой аварии маловероятно, так как давление в КМПЦ быстро снижается до уровня, близкого к атмосферному (0,4 МПа и ниже). Отметим, что при запроектной аварии с отказом аварийной подпитки реактора существенно наличие или отсутствие охлаждения каналов СУЗ. При отказе функции аварийного охлаждения сохранение теплоотвода в каналах СУЗ ограничивает разогрев топлива ~1100 °С.

Для аварии с полным обесточиванием энергоблока разгерметизация твэлов может начаться через 2—2,5 ч, разрыв канальных труб — через

4—5 ч после исходного события, что может привести к переопрессовке реакторного пространства, если персонал не примет меры к снижению давления в КМПЦ. При аварии с потерей подпитки КМПЦ от всех источников, но при сохранении теплоотвода от активной зоны через контур охлаждения СУЗ перегрев канальных труб до опасной температуры достигается через 7—8 ч, максимальная температура топлива не превышает 1000 °С.

Анализ позволяет сделать вывод о том, что для обоснования стратегии управления запроектной аварией актуальным является исследование развития повреждений активной зоны при сравнительно медленном разогреве ее элементов, которое характерно для аварий:

с полным обесточиванием энергоблока;

при потере подпитки КМПЦ с сохранением отвода тепла в контуре охлаждения каналов системы управления и защиты;

с потерей теплоносителя при отказе функции аварийного охлаждения реактора с сохранением отвода тепла в контур охлаждения каналов СУЗ.

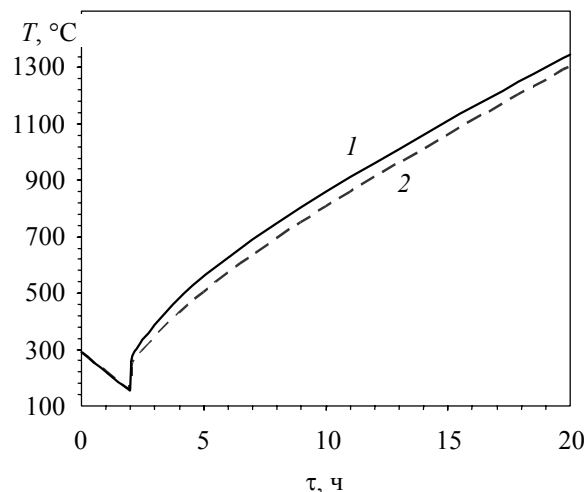
Приведем результаты оценки степени повреждения элементов активной зоны для этих аварий. Эти оценки, в частности, дают ответ на вопрос о возможности восстановления охлаждения активной зоны при управлении аварией.

Применительно к РБМК при анализе запроектной аварии необходимо оценить степень перекрытия проходного сечения топливного канала в результате раздутия оболочек ТВЭЛов при разогреве топлива, перемещение топлива вследствие обрыва несущего стержня ТВС, число разорванных труб топливных каналов при повышении температуры в процессе аварии.

Рассмотрим результаты расчетного анализа для запроектных аварий РБМК, обусловленных:

полным обесточиванием энергоблока с медленным повышением температуры активной зоны до 1300 °С за 20 ч (рис. 1);

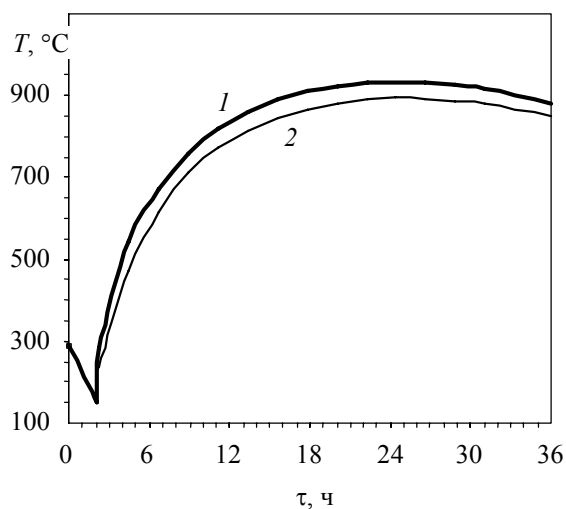
потерей аварийной подпитки реактора водой при сохранении контура охлаждения каналов СУЗ, при которой температура активной зоны возрастает до 900 °С за 22 ч (рис. 2);



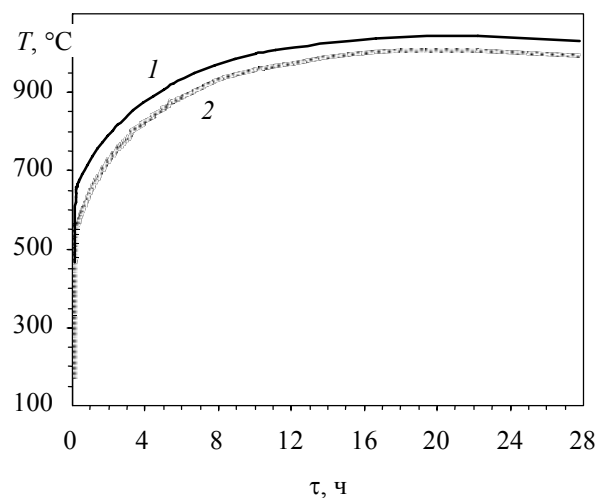
Р и с. 1. Максимальная (1) и минимальная температура (2) труб топливных каналов в сечении с  $Kz = 1,27$  при полном обесточивании энергоблока для фрагмента активной зоны размером 5×5 графитовых колонн, средней мощностью канала в фрагменте 2,24 МВт

разрывом опускающего трубопровода при отказе САОР, во время протекания которой температура активной зоны увеличивается до 1100 °С за 28 ч (рис. 3).

Указанные аварии выбраны как наиболее показательные, характеризующиеся сочетанием высокого уровня температуры элементов и характерным временем протекания процесса. В области высокой температуры 900—1100 °С температура оболочек ТВЭЛов на рис. 3 отличается от температуры труб каналов менее чем на 50 °С. Это справедливо и для первых двух аварий.



Р и с. 2. Максимальная (1) и минимальная температура (2) труб осушенных каналов в сечении с  $Kz = 1,27$  при потере питательной воды и сохранении контура охлаждения каналов СУЗ для фрагмента активной зоны размером 5×5 графитовых колонн, средней мощностью канала 2,24 МВт

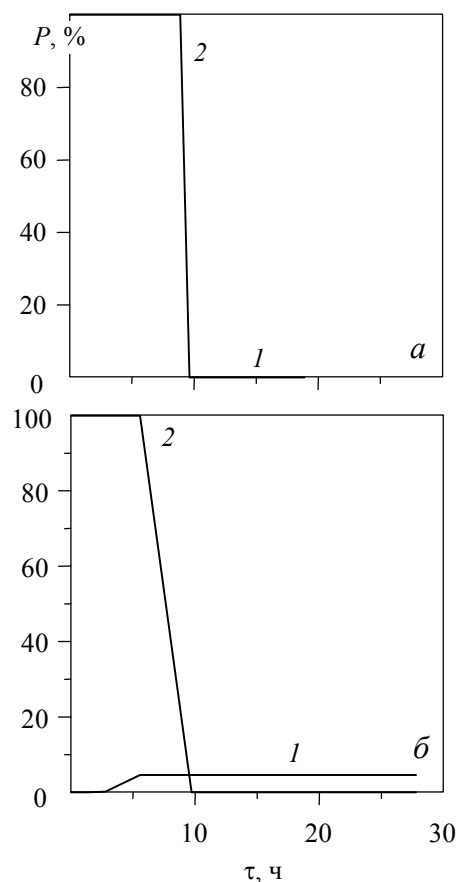


Р и с. 3. Температура оболочки твэлов (1) и трубы топливного канала (2) мощностью 2,26 МВт в сечении с  $Kz = 1,27$  в аварии с разрывом опускающего трубопровода при отказе САОР и сохранении контура охлаждения каналов СУЗ для фрагмента активной зоны размером  $5 \times 5$  графитовых колонн

Анализ выполняли с помощью расчетных кодов PCLAD [1] и PTUBL [2, 3]. Первый код моделирует деформирование и повреждение твэлов, второй — труб каналов РБМК в процессе аварии.

Результаты расчетов показали, что в рассматриваемых авариях все твэлы разгерметизируются (рис. 4). Благодаря снижению давления внутри оболочек твэлов при разгерметизации существенного деформирования оболочек, приводящего к блокировке проходного сечения топливного канала РБМК, не происходит. В худшем случае возможна блокировка до 5% проходного сечения канала РБМК. По результатам расчетов следует сделать вывод о том, что площадь блокировки проходного сечения зависит от скорости разогрева оболочек твэлов в аварийном процессе — чем выше скорость роста температуры, тем меньше блокировка. В частности, при аварии с разрывом опускающего трубопровода блокировка проходного сечения канала меньшей мощности оказалась наибольшей.

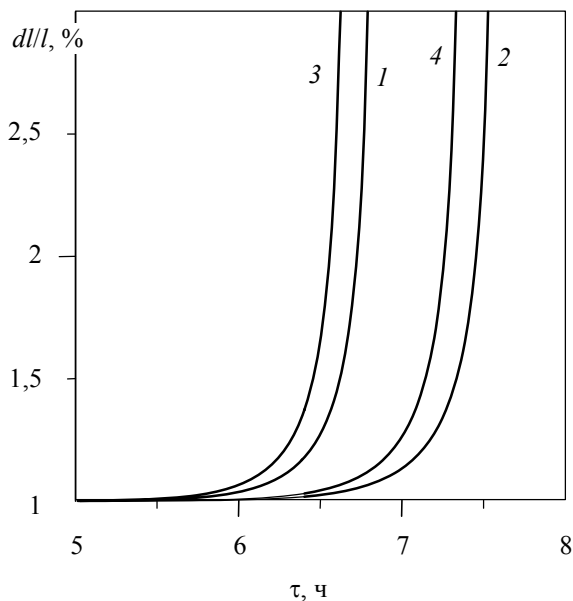
После разгерметизации твэлов важнейшей задачей является удержание топливных таблеток внутри оболочек, предотвращение их рассыпания внутри канала. Нетрудно показать, что при сохранении целостности несущего стержня ТВС таблетки останутся внутри оболочки твэла. В этом случае на оболочку действует только массовая нагрузка до 50 Н. Площадь поперечного сечения оболочки равна  $38 \text{ мм}^2$ . Следовательно, осевые напряжения составляют 0,13 МПа. Это



Р и с. 4. Площадь перекрытия проходного сечения деформируемыми твэлами (1) и вероятность сохранения целостности оболочки твэла (2) при аварии, обусловленной полным обесточиванием энергоблока (а) и разрывом опускающего трубопровода с отказом САОР для топливного канала мощностью 1,67 МВт (б)

низкий уровень напряжений, который не вызовет разрушения даже полностью окисленной оболочки.

В рассмотренных авариях температура центрального несущего стержня (трубы) ТВС мало отличается от температуры твэлов. Она достигает высокой температуры  $900\text{--}1000^\circ\text{C}$  и более почти одновременно с оболочками твэлов. Расчеты показывают, что при такой температуре в течение рассмотренного времени протекания аварии вероятен обрыв центрального стержня (трубы) как при штатном, так и центральном закреплении пучков твэлов в ТВС. Как видно на рис. 5, при развитии аварии с полным обесточиванием энергоблока (см. рис. 1) произойдет значительное удлинение центрального стержня или трубы, которое вызовет разрыв несущей конструкции ТВС. В случае штатного закрепления пучков обрыв центрального стержня приведет к падению нижнего пучка твэлов без отрыва верхнего от подвески. При центральном закреплении

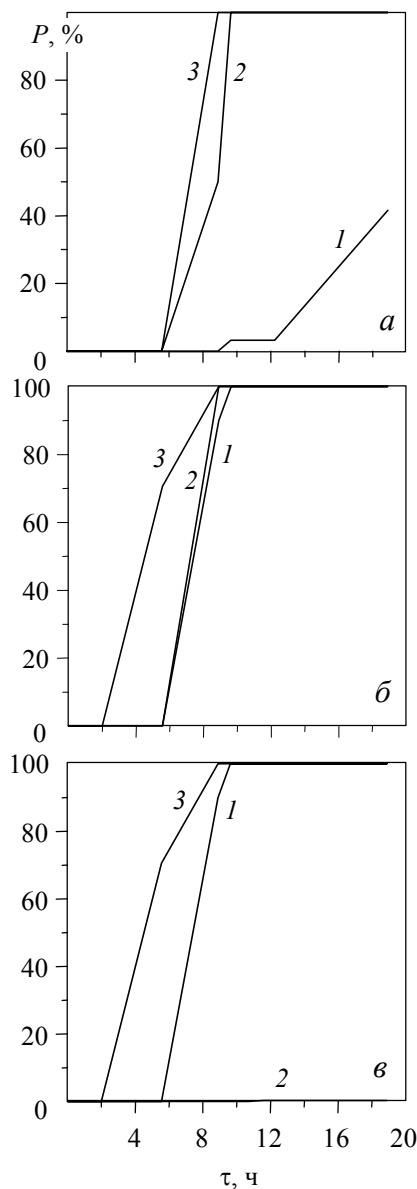


Р и с. 5. Деформирование центрального стержня (1, 2) и центральной несущей трубы (3, 4) для топливного канала мощностью ТВС 2,79 МВт (1, 3) и 1,67 МВт (2, 4) при аварии с полным обесточиванием энергоблока

может произойти падение обоих пучков твэлов. Интервал времени между разрушением несущего стержня ТВС большей и меньшей мощности не превышает 1,5 ч. Отметим, что время от начала аварии до обрыва несущего стержня при центральном закреплении будет меньше, чем в случае штатного закрепления пучков твэлов.

После разрыва несущего элемента часть ТВС с твэлами упадет вниз до места сужения трубы канала в районе переходника сталь—цирконий. Высота падения составляет около 450 мм. Энергия удара, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения, равна  $0,58 \text{ МДж/м}^2$ . Ударная вязкость металлов и сплавов изменяется в пределах  $(1,5—2)10^6 \text{ Дж/м}^2$ , хрупких керамических материалов —  $(0,1—0,2)10^6 \text{ Дж/м}^2$ . Таким образом, если оболочка твэла не окажется полностью окисленной, при ударе ее целостность сохранится. Если она будет полностью корродирована, при падении может произойти рассыпание таблеток и, как следствие, заметное перекрытие проходного сечения трубы канала. Поэтому оценка степени окисления оболочек твэлов в аварийных процессах РБМК имеет существенное значение для прогноза блокировки проходного сечения канала.

Результаты расчетов деформирования и вероятности разрыва труб каналов показали, что во всех рассмотренных запроектных авариях в течение установленного времени их протекания неизбежен разрыв топливных каналов (рис. 6). Время до разрушения зависит от мощности ка-



Р и с. 6. Вероятность разрыва каналной трубы за счет затекания материала в зазор колец твердого контакта (1), вследствие разрушения графитового блока (2), наличия разрушенного графитового блока до начала аварии (3) при протекании аварии, обусловленной полным обесточиванием энергоблока при поддержании в процессе аварии постоянного давления в канале 0,5 МПа (а), в случае увеличения давления в каналах с 1,6 до 3,86 МПа за 20 ч (б) через 30 лет работы реактора, при повышении давления с 1,6 до 3,86 МПа за 20 ч через 15 лет работы (в)

нала на момент начала аварии и влияет на температуру трубы, давление внутри канала и скорость роста температуры в процессе аварии. Разрыв труб каналов происходит при 700—800 °С. Диапазон изменения максимальной температуры в рассматриваемой расчетной ячейке из 20 топливных каналов в процессе аварии сравнительно невелик и составляет 100 °С. Таким образом, при авариях с низким давлением внутри канала 0,5 МПа для повторного охлаждения труб в расчетной ячейке у персонала имеется в запасе около 2 ч между началом разрыва канала максимальной и минимальной мощности. При авариях со сравнительно высоким давлением внутри трубы 1,5—3 МПа аналогичный запас времени меньше в несколько раз.

Есть два альтернативных механизма разрыва трубы: при деформировании в разрез графитовых колец твердого контакта и в результате истощения несущей способности как графитового блока (с фрагментацией), так и самой трубы. С точки зрения локализации последствий аварии легче первый вариант, поскольку в этом случае условный диаметр области разрыва может быть небольшим. Это даст возможность уменьшить потери теплоносителя. Малый разрыв ожидается в случае низкого давления в трубе. При сравнительно высоком давлении более вероятен разрыв, размеры которого сопоставимы с проходным сечением канала.

На реализацию того или иного механизма разрыва трубы влияет состояние графита — его способность воспринимать нагрузку со стороны трубы. При накопленной дозе облучения графита менее  $(1—1,5)10^{22}$  м<sup>-2</sup> и сравнительно небольшом давлении вероятно реализация первого механизма, при  $2 \cdot 10^{22}$  м<sup>-2</sup> и более в процессе вторичного распухания графита вероятен второй

механизм. Таким образом, механизм разрыва трубы канала и рекомендации об ограничении последствий аварии должны определяться конкретно для каждого энергоблока. Предварительно можно считать, что второй механизм разрушения трубы канала более ожидаем для энергоблоков РБМК первого поколения.

При моделировании раскрытия стенки трубы канала имеются неопределенности. В частности, очевидно, что площадь разрыва и скорость утечки теплоносителя существенно зависят от уровня стеснения при деформировании. Однако разобраться в правильном выборе расчетной модели без эксперимента не представляется возможным.

Следует учитывать отличия в характере разрыва труб, содержащих теплоноситель с преобладанием жидкой фазы, от разрыва труб с парогазовой средой. Разрушение в последнем случае происходит без образования свища — труба разлетается кусками. Характер разрушения в случае разрыва трубы канала при запроектных авариях РБМК следует уточнить с помощью модельных стендовых экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткачев В.В., Желтухин К.К. Программное средство PCLAD. Акт № 355 передачи программы в Отраслевой фонд программ ОФАП-ЯР, 1994.
2. Ткачев В.В., Желтухин К.К. Программное средство PTUBL. Акт № 363 передачи программы в Отраслевой фонд программ ОФАП-ЯР, 1994.
3. Tkachev V.V., Zheltukhin K.K. Mathematical simulation of the RBMK reactor pressure tubes ruptures during accidents. — In: Proc. ASME-JSME 4th Intern. Conf. on Nuclear Engineering. New Orleans, USA, 1996, v. 3, p. 223—227.

Поступила в Редакцию 24.01.08

УДК 541.183.621.039.542

#### АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОЭЛЕМЕНТНОМ ЭГК С СООБЩАЮЩИМИСЯ ПОЛОСТЯМИ ТВЭЛА И МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРА

Гонтарь А.С., Гриднев А.А., Любимов Д.Ю. (НИИ НПО «Луч»)

Многоэлементный электрогенерирующий канал (ЭГК) с сообщающимися полостями твэла и межэлектродного зазора обуславливает наиболее приемлемые массогабаритные характеристики реактора-преобразователя встроенного

типа космической ЯЭУ вследствие меньшего содержания конструкционных материалов в активной зоне и меньшей скважности между последовательно соединенными электрогенерирующими элементами. Относительная простота