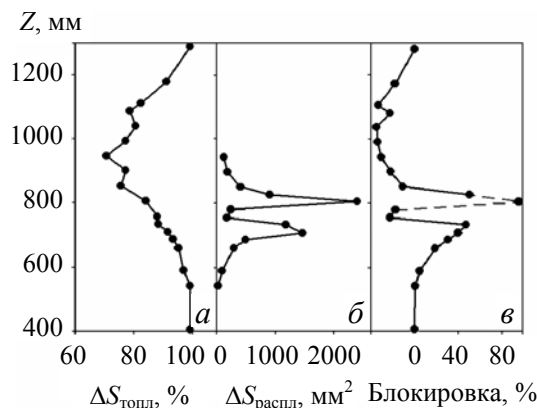
Р и с. 6. Структура оболочки твэла на уровне $Z = 1263$ мм

лов и расплава, а также обечайки. Толщина оксидной пленки на поверхности оболочек на уровне 1263 мм составляет 200 мкм (рис. 6). Обечайка окислена с обеих сторон, толщина пленки на внешней и внутренней поверхностях 150 мкм. Фактов, подтверждающих плавление металлического циркония на этом уровне, не обнаружено.

В интервале $Z \sim 700\text{—}1100$ мм обнаружено существенное растворение топливных таблеток. Для количественной оценки растворения топлива и состояния ТВС в каждом сечении была измерена площадь каждой таблетки, расплава и остатков конструктивных элементов. По методике [4] определены растворение топлива по высоте ТВС, распределение застывшего расплава и блокировка проходного сечения (рис. 7).

Таким образом, материаловедческими исследованиями модельной ТВС ВВЭР после испытаний в условиях тяжелой аварии $T_{\text{макс}} > 2000$ °C с заливом воды расходом 40 г/с сверху установлено, что основными процессами деградации являлись плавление конструктивных элементов, перемещение расплава, растворение топлива и блокировка проходного сечения. В наиболее поврежденной зоне $Z \sim 700\text{—}1100$ мм циркониевые конструктивные элементы полностью расплавлены. Целостность

сохранили лишь топливные столбы, покрытые следами стекавшего расплава. Масса расплава,



Р и с. 7. Профиль растворения топлива (а), застывшего расплава (б) и блокировки проходного сечения (в) в модельной ТВС

блокировавшая проходное сечение, неоднородна по высоте сборки. Степень растворения топлива достигает 25%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. ПБЯ РУ АС-89. Введены в действие с 01.09.90.
2. **Sepold L., Miasoedov A., Schanz G. et al.** Hydrogen generation in reflooding experiments with LWR — type rod bundles (QUENCH program). — Nucl. Technol., 2004, v. 147, p. 202—215.
3. **Бибилашвили Ю.К., Наливаев В.И., Семишкин В.П. и др.** Стендовые испытания модельных ТВС типа ВВЭР в экспериментах, моделирующих условия аварий с потерей теплоносителя. — В сб.: 6-я Рос. конф. по реакторному материаловедению. Димитровград, НИИАР, 2001, т. 2, ч. 1, с. 231—251.
4. **Горячев А.В., Штукерт Ю.А., Звир Е.А., Ступина Л.Н.** Результаты послепусковых исследований топлива ВВЭР-1000, испытанного в условиях тяжелой аварии. — В сб.: 4-я Рос. конф. по реакторному материаловедению. Димитровград, НИИАР, 1996, т. 1, с. 405—426.

Поступила в Редакцию 6.03.08

УДК 621.039.548

ФОРМИРОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ В РЕАКТОРЕ МИР ИСПЫТАНИЙ ТВЭЛОВ ВВЭР В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ С УВЕЛИЧЕНИЕМ МОЩНОСТИ

*Алексеев А.В., Калыгин В.В., Малков А.П.,
Овчинников В.А., Шулимов В.Н. (ГНЦ РФ — НИИАР)*

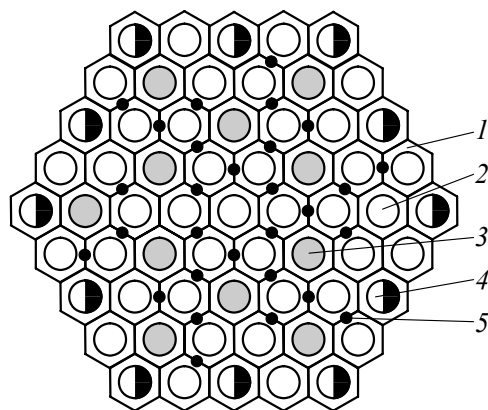
Для повышения конкурентоспособности энергетических реакторов требуется повысить надежность, экономичность и безопасность их

активных зон и в первую очередь наиболее напряженных узлов — твэлов. Одна из важных задач — получение экспериментальных данных

о поведении твэлов в нестационарных режимах. Наиболее доступный способ получения требуемой экспериментальной информации — использование исследовательских реакторов. Хотя в них не удастся полностью воспроизвести условия эксплуатации твэлов энергетического реактора, но можно реализовать наиболее критические условия, определяющие работоспособность в интересующих режимах. Среди исследовательских реакторов более всего подходит для этих целей реактор МИР [1], предназначенный для испытаний ТВС и отдельных твэлов и оснащенный петлевыми установками, в которых поддерживают параметры теплоносителя реакторов различного назначения.

В настоящей работе рассмотрено формирование в активной зоне реактора МИР нейтронно-физических условий для безопасного проведения экспериментов, в которых моделируются параметры твэлов ВВЭР, характерные для нестационарных режимов с увеличением мощности. В частности, рассмотрены три типа экспериментов, отличающихся скоростью изменения мощности: скачкообразное увеличение мощности, циклическое изменение мощности (режим слежения за нагрузкой), проектная авария с выбросом регулирующего органа.

Конструктивные и физические особенности реактора МИР. Реактор МИР относится к бассейновым исследовательским реакторам канального типа. Его активная зона набирается из шестигранных бериллиевых блоков с отверстиями вдоль вертикальной оси, в которых в индивидуальных каналах размещены рабочие и экспериментальные ТВС (рис. 1). Одновременно в реакторе можно проводить испытания не-



Р и с. 1. Картограмма активной зоны реактора МИР: 1 — бериллиевый блок; 2 — канал с рабочей ТВС; 3 — петлевой канал; 4 — компенсатор реактивности с топливной догрузкой; 5 — стержень аварийной защиты и компенсации реактивности

скольких ТВС, отличающихся конструкцией, содержанием делящихся материалов в твэлах, мощностью, видом и параметрами теплоносителя. В соответствии с назначением реактора структура активной зоны выбрана из условия минимального взаимного влияния соседних петлевых устройств. Для этого каждый петлевой канал окружен шестью рабочими каналами. На стыке граней бериллиевых блоков размещены органы регулирования системы управления и защиты — стержни с поглощающей композицией на основе диспрозия. Вокруг каждого петлевого канала расположено от трех до пяти стержней, что позволяет их использовать для формирования заданных режимов испытаний.

Шаг решетки активной зоны выбирали из конструктивных соображений с учетом необходимости размещения трубопроводов петлевых каналов и приводов органов регулирования. В результате отношение ядерной концентрации замедлителя и топлива в активной зоне не является оптимальным: замедлителя в реакторе значительно больше, чем требуется для термализации нейтронов. Вследствие этого изменение плотности воды сложным образом влияет на реактивность. В частности, эффект реактивности от уменьшения плотности воды в петлевом канале, например, при разрыве его корпуса положителен и при определенных условиях может достигать значений, превышающих $\beta_{эф}$ [2].

Методы формирования нейтронно-физических условий. При моделировании в исследовательском реакторе условий, характерных для нестационарных режимов с увеличением мощности твэлов энергетического реактора, необходимо за фиксированное время повысить мощность твэлов, размещенных в петлевом канале, от исходного значения до заданного. Это может быть выполнено различными способами. В частности, физические и конструктивные особенности реактора МИР позволяют проводить значительную часть подобных испытаний путем перекомпенсации штатных органов регулирования [3]. Однако скорость перемещения органов регулирования ограничена соображениями безопасности. Это не позволяет с помощью описанного способа быстро увеличить мощность исследуемых твэлов. Кроме того, процедура перемещения органов регулирования неудобна в процессе эксплуатации, если ее необходимо применять многократно в течение кампании. Поэтому были разработаны способы выполне-

ния испытаний, основанные на использовании экспериментальных устройств с применением поглощающих экранов [4].

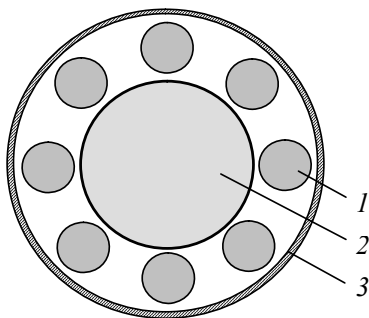
Каждый из подходов имеет свои особенности при формировании нейтронно-физических условий для безопасного проведения эксперимента. Важнейшим из таких условий принято считать линейную мощность твэлов, которая является одним из основных критериев представительности испытаний экспериментальной ТВС в исследовательском реакторе. Для достижения требуемых значений в процессе подготовки и проведения эксперимента могут быть использованы различные методы. Например, на стадии проектирования в зависимости от решаемых задач можно варьировать конструкцию и состав экспериментальной ТВС и петлевого канала. При подготовке эксперимента важное значение имеет положение петлевого канала с экспериментальной ТВС в активной зоне и выгорание топлива в окружающих его рабочих ТВС. Непосредственно в процессе проведения эксперимента линейная мощность твэлов определяется мощностью реактора и глубиной погружения ближайших к петлевому каналу органов регулирования. Используя комбинацию перечисленных методов, в активной зоне формируют распределение плотности потока нейтронов, обеспечивающее необходимую линейную мощность твэлов во всех одновременно испытываемых экспериментальных ТВС. Эффект реактивности при аварийном обезвреживании петлевого канала также зависит от распределения плотности потока нейтронов. Поэтому для достижения значения, при котором с ним справляется система управления и защиты, используют те же методы.

Скачкообразное изменение мощности.

Под скачкообразным изменением мощности понимают повышение мощности после продолжительной работы реактора на пониженном уровне со скоростью, превышающей скорость релаксации напряжений в оболочке твэла, которые возникают за счет воздействия на нее топливного сердечника. Как правило, интерес представляет увеличение до 100% исходной линейной мощности твэлов. Рассматриваемый диапазон скорости изменения мощности находится в пределах от 0,01 до 1 Вт/см·с, что соответствует ожидаемой скорости изменения мощности при переходных режимах в твэлах ВВЭР [5].

Реализованный в реакторе МИР алгоритм проведения эксперимента предусматривает следующую последовательность действий [6]. Реактор выводят на мощность, обеспечивающую достижение в петлевом канале требуемых исходных условий эксперимента. При этом ближайшие к петлевому каналу органы регулирования погружены в активную зону. После стабилизации всех параметров и достижения равновесных состояний на данной мощности скачкообразно увеличивают мощность исследуемых твэлов с необходимой скоростью и амплитудой. Для этого ближайшие к петлевому каналу органы регулирования извлекают с максимально допустимой скоростью. Одновременно для компенсации вводимой положительной реактивности в активную зону погружают регуляторы, расположенные на других участках активной зоны. Особенность проведения подобных экспериментов в реакторе МИР обусловлена необходимостью поддержания требуемых параметров испытаний во всех остальных петлевых каналах. Поэтому приведенный алгоритм выполнения эксперимента предъявляет жесткие требования к загрузке активной зоны.

При извлечении органов регулирования происходит, хотя и в меньшей степени, рост мощности и на соседних участках активной зоны, поэтому исследуемая ТВС должна находиться в таком месте, где это не приводит к превышению допустимой мощности других экспериментальных сборок. Как правило, это условие может быть выполнено при ее размещении в третьем ряду активной зоны. Кроме того, поскольку в исходном состоянии ближайшие к исследуемой ТВС органы регулирования погружены в активную зону, вклад данного участка в суммарную мощность реактора занижен. Для обеспечения требуемых начальных параметров испытания при минимальной мощности реактора исследуемая ТВС должна быть окружена рабочими сборками с малым выгоранием топлива. Наконец, ограниченное время проведения эксперимента требует, чтобы в процессе перекомпенсации участвовало как можно меньше органов регулирования. Тогда за счет сокращения числа операций по их выбору и подключению к работе время увеличения мощности исследуемой ТВС будет минимальным. Это может быть обеспечено, если в области активной зоны, где расположены выбранные для погружения органы регулирования, также будут установлены



Р и с. 2. Поперечное сечение экспериментальной ТВС: 1 — твэл; 2 — вытеснитель; 3 — корпус канала

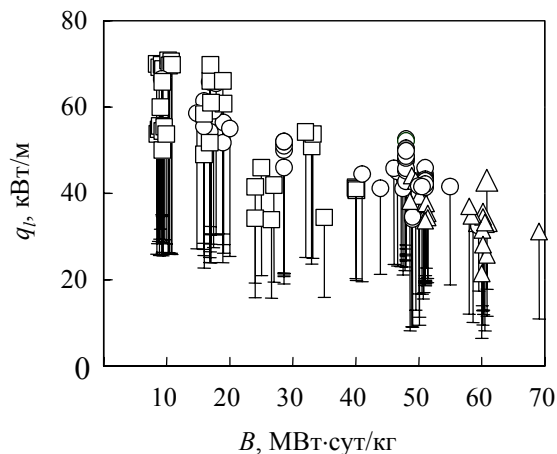
рабочие сборки с малым выгоранием топлива. Содержание топлива в остальных рабочих сборках должно формировать требуемые условия испытаний в других петлевых каналах и необходимую реактивность для работы в течение кампании.

Для проведения испытаний разработана конструкция экспериментальной ТВС (рис. 2), в которой предусмотрено равномерное размещение 6—12 твэлов на одинаковом расстоянии от вертикальной оси. Для достижения приемлемой реактивности при аварийном обезвреживании петлевого канала лишняя вода (до 40% суммарного объема) удалена с помощью вытеснителя.

С учетом разработанных рекомендаций в реакторе МИР испытано более 80 твэлов ВВЭР выгоранием 15—70 МВт·сут/кг, извлеченных из отработавших ТВС. При проведении испытаний варьировали выгорание топлива в твэлах, начальную линейную мощность, амплитуду и скорость увеличения мощности, время выдержки при максимальной мощности. Начальная линейная мощность, как правило, была равна линейной мощности твэлов на последнем этапе их эксплуатации в энергетическом реакторе. Максимальную линейную мощность подбирали таким образом, чтобы превысить допустимый уровень, определяемый техническими условиями эксплуатации.

Кроме того, проведены испытания более 40 опытных твэлов ВВЭР различных модификаций, предварительное облучение которых до требуемого выгорания осуществлялось непосредственно в реакторе МИР. Изменение линейной мощности в экспериментах показано на рис. 3.

Циклическое изменение мощности. Для перевода АЭС в режим слежения за нагрузкой сети требуется обосновать работоспособность

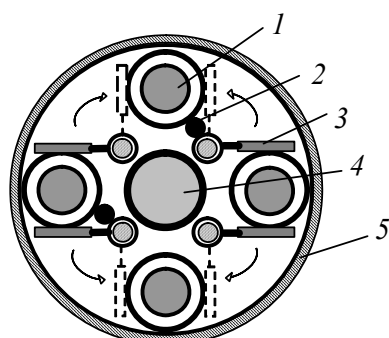


Р и с. 3. Изменение линейной мощности в зависимости от выгорания топлива в твэлах ВВЭР-1000 (○), ВВЭР-440 (△), опытных (□)

твэлов при многократном изменении линейной мощности. Суточное регулирование мощности реактора при маневренной эксплуатации приводит к циклическому термомеханическому нагружению оболочек твэлов, что напрямую влияет на их работоспособность. В наибольшей степени это проявляется при выгорании, превышающем 45 МВт·сут/кг, когда почти исчезает зазор между топливом и оболочкой твэла [7].

Эксперимент по изучению поведения твэлов ВВЭР при маневренном режиме эксплуатации предусматривает в каждом цикле изменение линейной мощности твэлов в 1,4—1,6 раза (с 18—19 до 27—28 кВт/м и обратно). Переход с одной линейной мощности на другую необходимо осуществлять за 20—30 мин с выдержкой в стационарном режиме в течение 6—12 ч.

При небольшом числе циклов для реализации указанного сценария можно использовать перекомпенсацию органов регулирования. Если число циклов велико и эксперимент должен продолжаться в течение нескольких кампаний, то такой метод неудобен из-за описанных особенностей компоновки активной зоны. Поэтому были разработаны конструкции экспериментальной ТВС, в которых предусмотрено размещение четырех твэлов и четырех подвижных поглощающих пластин из гафния, обеспечивающих поочередную экранировку то одной, то другой пары твэлов по всей их высоте. Один из вариантов такой конструкции показан на рис. 4. Данное решение обеспечивает проведение испытания при минимальном воздействии на реактивность, а также мощность других исследуемых ТВС и всего реактора. Однако малое

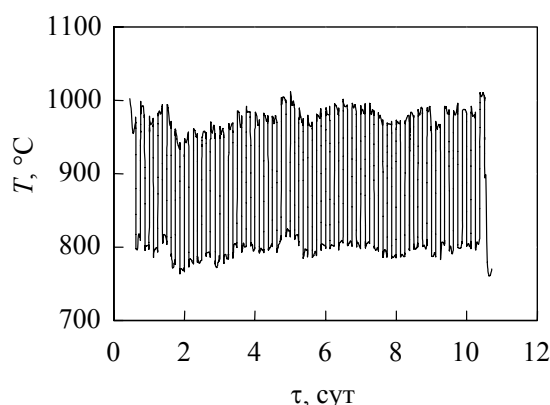


Р и с. 4. Поперечное сечение экспериментальной ТВС с размещением четырех твэлов и четырех поглощающих пластин: 1 — твэл; 2 — детектор прямого заряда; 3 — поглощающий экран; 4 — вытеснитель; 5 — корпус канала

число твэлов, большое выгорание топлива и наличие в экспериментальной ТВС поглотителя приводят к существенному уменьшению вклада участка активной зоны в суммарную мощность реактора. Для компенсации этого в окружающие рабочие каналы загружают ТВС с минимальным выгоранием топлива, а при проведении эксперимента все рядом расположенные органы регулирования полностью извлекают из активной зоны. Такая конфигурация активной зоны позволяет получить требуемую линейную мощность исследуемых твэлов без завышения общей мощности реактора. Наличие в конструкции вытеснителя, удаляющего лишнюю воду, и размещение петлевого канала на периферии активной зоны снижают эффект реактивности в случае аварийного обезвоживания петлевого канала до значения, при котором безопасность в процессе эксперимента обеспечивается штатной системой управления и защиты.

Успешное проведение в реакторе нескольких серий испытаний с циклическим изменением мощности подтвердило правильность предложенных решений. Для примера на рис. 5 показано изменение температуры топливного сердечника одного из твэлов в процессе эксперимента.

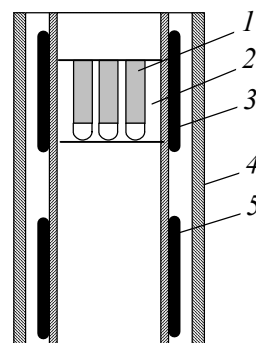
Проектная авария с выбросом регулирующего органа. При выбросе регулирующего органа ВВЭР-1000 возникает импульс нейтронной мощности с амплитудой до 3 и полушириной импульса до 5 с [8]. Разработанная методика испытания в реакторе МИР обеспечивает моделирование термомеханического состояния твэлов, характерное для такой аварии [9]. Она предусматривает получение импульса нейтронной мощности при постоянной мощности реактора



Р и с. 5. Изменение температуры топлива в процессе эксперимента (40 циклов)

внутри экспериментального устройства, содержащего трехтвэльный фрагмент рабочей ТВС ВВЭР-1000, путем удаления от него поглощающего экрана из гафния (рис. 6). Введение положительной реактивности компенсируется дополнительным экраном, который замещает в активной зоне первый и имеет аналогичную поглощающую способность. Гидродинамическое подобие твэльных ячеек формируют с помощью фигурного вытеснителя. Окончание импульса обеспечивается сбросом аварийной защиты реактора, которая срабатывает от реле времени. Продолжительность выдержки при максимальной линейной мощности составляет 0,5—3 с и определяется необходимостью максимальной энтальпии и средней по радиусу температуры топлива.

Как и в предыдущем эксперименте, данное устройство содержит малое число твэлов и много поглощающего материала. Поэтому необходимая линейная мощность твэлов при приемлемой мощности реактора обеспечивается организацией вокруг петлевого канала локальной области с минимальным выгоранием топлива и полностью извлеченными из активной зоны ор-



Р и с. 6. Экспериментальное устройство: 1 — твэл; 2 — вытеснитель; 3 — поглощающий экран; 4 — корпус канала; 5 — дополнительный экран

ганами регулирования. Снижение до допустимой реактивности при аварийном обезвреживании петлевого канала достигается использованием вытеснителя и размещением петлевого канала в третьем ряду активной зоны.

В процессе апробации методики в петлевом канале с параметрами теплоносителя ВВЭР-1000 для ТВЭЛОВ выгоранием 50—60 МВт·сут/кг при начальной линейной мощности 25 кВт/м получен импульс трапецеидальной формы амплитудой 3,25—3,5 (в зависимости от выгорания топлива в ТВЭЛАХ), временем нарастания мощности около 1 с, полушириной импульса примерно 3 с.

Заключение. Разработанные рекомендации по формированию нейтронно-физических условий для безопасного проведения экспериментов по моделированию параметров ТВЭЛОВ ВВЭР, характерных для нестационарных режимов с увеличением мощности, позволили существенно расширить экспериментальные возможности реактора МИР. Проведение таких испытаний необходимо для обоснования работоспособности и безопасности эксплуатации новых и усовершенствованных конструкций ТВЭЛОВ, верификации расчетных кодов, описывающих состояние ТВЭЛОВ, при прогнозировании изменения характеристик ТВЭЛОВ в подобных режимах. Предложенная методология проведения экспериментов применима для испытания ТВЭЛОВ большинства других водоохлаждаемых реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Исследовательские** реакторы НИИАР и их экспериментальные возможности. Под ред. В.А. Цыканова. Димитровград, НИИАР, 1991. 103 с.
2. **Калыгин В.В., Малков А.П.** Влияние методов формирования режимов облучения на значение эффекта реак-

тивности при обезвреживании петлевых каналов реактора МИР. — В кн.: Сб. трудов НИИАР. Димитровград, 1996, вып. 4, с. 3—10.

3. **Грачев А.Ф., Калыгин В.В., Малков А.П. и др.** Изучение возможности проведения в реакторе МИР экспериментов со скачкообразным увеличением мощности ТВЭЛОВ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерная техника и технология, 1993, вып. 1, с. 41—49.
4. **Бурукин А.В., Ижуров А.Л., Калыгин В.В. и др.** Методы испытаний в реакторе МИР топлива ВВЭР при переходных и аварийных режимах. — Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2007, вып. 3, № 1, с. 83—91.
5. **Бемерт Ю., Ютнер К., Райнфрид Д.** Эксперименты по моделированию скачкообразных изменений мощности для выявления повреждаемости ТВЭЛОВ ВВЭР. — Атомная энергия, 1989, т. 67, вып. 1, с. 49—51.
6. **Bibilashvili Yu.K., Grachyev A.F., Kalygin V.V. et al.** Methods of performing the ramping experiments with VVER fuel rods at different burnups. — In: Proc. Techn. Com. Meet. Behaviour of LWR Core Materials under Accident Conditions. Dimitrovgrad, Russian Federation, 9—13 October 1995, IAEA-TECDOC-921, 1996, p. 101—116.
7. **Смирнов В.П., Смирнов В.А., Цыканов В.А. и др.** Характеристики топлива ВВЭР после эксплуатации в стационарных и переходных режимах. Прогнозирование сверхвысоких выгораний. — В сб.: VI Рос. конф. по реакторному материаловедению. Димитровград, НИИАР, 2001, т. 1, с. 3—16.
8. **Алексеев А.В., Киселева И.В., Шулимов В.Н.** Изучение поведения ТВЭЛОВ ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 в условиях МПА (Большая течь) и проектной аварии с выбросом регулирующего органа. Возможность постановки интегральных экспериментов в исследовательском реакторе МИР. Тезисы докл. VII Рос. конф. по реакторному материаловедению. Димитровград, НИИАР, 2003, с. 46—48.
9. **Алексеев А.В., Киселева И.В., Овчинников В.А., Шулимов В.Н.** Методика испытания в реакторе МИР топлива ВВЭР-1000 в условиях аварии с выбросом регулирующего органа. — Атомная энергия, 2006, т. 101, вып. 6, с. 427—431.

Поступила в Редакцию 17.03.08

УДК 621.539

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОДЛЕНИИ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС

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

При обосновании продления срока службы оборудования возникает необходимость адекватной оценки этого срока с точки зрения безопасности. Использование для такой оценки норм расчета на прочность ПНАЭ Г-7-002-86 некорректно, поскольку они предназначены для расчета нового оборудования с допущением равной прочности всех частей конструкции и

отсутствия дефектов. Очевидно, что для трубопроводов и оборудования, проработавшего длительное время, такое допущение неприемлемо.