

Закключение. Настоятельная необходимость оснащения основных цехов НЗХК современной контрольной аппаратурой и новейшими технологиями, с одной стороны, и наличие в КТИ НП СО РАН высококвалифицированного научного, инженерно-конструкторского потенциала, экспериментальной базы и действующего опытного производства, с другой, позволяют объединенными усилиями в сжатые сроки организовать разработку, создание и внедрение необходимых цифровых оптико-электронных и рентгеновских измерительных систем неразрушающего контроля, лазерных специализированных комплексов по кодовой маркировке и считыванию.

Современная оптико-электронная элементная база и оригинальные совместные идеи создают предпосылки для разработки и внедрения контрольной аппаратуры нового поколения, позволяющей осуществлять высококачественный неразрушающий контроль изделий в производственных технологических линиях атомной промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тематический выпуск журнала, посвященный 50-летию Минатома РФ. — Приборы и системы управления, 1995, № 11.
2. Жуков Ю.А., Карлов Ю.К., Косых В.П. и др. Компьютерная томография в задачах контроля сварных соединений твэл. — Автометрия, 1997, № 4, с. 43.
3. Битоцкий О.И., Вертопрахов В.В., Ладыгин В.И. и др. Оптико-электронная система бесконтактного контроля геометрических параметров полых цилиндров. — Там же, 1995, № 6, с. 69.
4. Plotnikov S.V., Bityutsky O.I., Chugui Yu.V. et al. Optico-electronic dimensional integral inspection of hollow cylinder-type articles for conveyor line. — In: Proc. SPIE, 1998, v. 3313, p. 17.
5. Воробьев В.В., Кондратенко А.М., Хорев В.М. Патент РФ № 2106011 от 27.02.98, приоритет от 24.01.96.

Поступило в Редакцию 12.10.98

УДК 621.039.55

ЭФФЕКТ «ПРОСВЕТЛЕНИЯ» УРАН-ГРАФИТОВОГО ТОПЛИВА ИГР

Горин Н.В., Кандиев Я.З., Козыбаев Р.М., Литвин В.И., Малышкин Г.Н., Самарин С.И., Шмаков В.М. (РФЯЦ—ВНИИТФ), Васильев А.П. (НИКИЭТ), Гайдайчук В.А., Казьмин Ю.М., Пахниц В.А., Скивка А.С. (ИАЭ Национального ядерного центра Казахстана)

В 1994 г. во ВНИИТФ расчетным путем было показано, что отношение флюенса тепловых нейтронов в центральном экспериментальном канале уран-графитового реактора ИГР [1] к энерговыделению возрастает примерно на 30—40% при разогреве активной зоны от 300 до ~1200 К. Этот эффект, для краткости названный «просветлением» графита, вызван уменьшением эффективных сечений захвата и деления при увеличении энергии тепловых нейтронов в результате их термализации в графите с более высокой температурой. Благодаря просветлению при разогреве уран-графитового топлива не только отмечается нелинейная связь между энерговыделением и флюенсом, но и увеличивается длина свободного пробега тепловых нейтронов и, следовательно, их утечка из активной зоны, что обуславливает мощное самогашение реактивности и определяет динамику реактора, параметры импульсов деления, необходимую эффективность регулирующих элементов, вводимую избыточную реактивность и последствия аварийных ситуаций. Во ВНИИТФ проводится расчетное обоснование уран-графитового реактора МИГР [2] по программам ПРИЗМА.Д [3] и MCNP [4], верифицированным на экспериментальных данных [5, 6]. Расчетами показано, что эффект просветления графита МИГР сильнее, чем ИГР, и указанное отношение флюенса нейтронов к энерговыделению для реактора МИГР возрастает на 100% при разогреве активной зоны от комнатной температуры до 2000 К. Для верификации программ на реакторе ИГР проведены эксперименты по измерению флюенса тепловых и быстрых нейтронов в небольших по энерговыделению вспышках при разной начальной температуре активной зоны и разогреве топлива до 1020 К в 1995 г. и до 1220 К в 1997 г.

Методика измерений. Для измерения флюенса тепловых и быстрых нейтронов набор активационных детекторов ^{176}Lu , ^{197}Au , ^{186}W , ^{139}La , ^{59}Co , ^{63}Cu , ^{23}Na , ^{45}Sc , ^{50}Cr , ^{27}Al , ^{58}Ni , ^{47}Tl из фольг чистых металлов и на основе алюминиевых сплавов или эпоксидных смол облучали в открытом виде и кадмиевых экранах — цилиндрических контейнерах диаметром 15, высотой 7 мм с толщиной стенок 1 мм. Открытые и кадмированные детекторы при облучении отстояли один от другого на расстоянии не менее 5 см по горизонтали.

В каждом пуске облучали три набора детекторов: один из них располагали на 100 мм ниже геометрического центра центрального экспериментального канала в свободном пространстве, второй — на 100 мм

выше центра в стальном контейнере диаметром и высотой по 80 мм, толщиной стенок 9,3 мм, третий — в геометрическом центре бокового экспериментального канала в свободном пространстве. Температура активной зоны измерена штатной термопарой, расположенной в центре колонны «Г-9», ее показания близки к среднеобъемной температуре зоны.

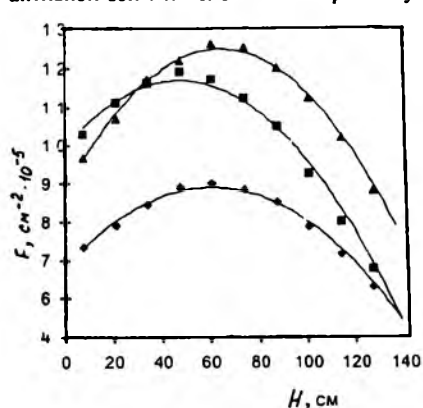
Пуск 133Ф-1 проведен при температуре активной зоны 292—320 К, 133Ф-2 — в регулируемом режиме «импульс» без активационных детекторов для разогрева зоны до 1390 К. Затем по мере остывания реактора в канал были установлены комплекты активационных детекторов и проведены пуски на разогрев и остывающей активной зоне при температуре 1016—1031 К (пуск 133Ф-3) и 706—741 К (пуск 133Ф-5). Пуск 133Ф-3 проведен через 3 ч после пуска 133Ф-2, 133Ф-5 — через 2,5 ч после 133Ф-3. В течение всего этого времени постоянно происходило перетекание тепла по объему активной зоны и из нее в отражатель и, следовательно, выравнивание температуры, но тепловое равновесие не достигалось. Так, к моменту пуска 133Ф-3 температура топлива вблизи бокового экспериментального канала была на 350 К меньше, чем в районе центрального канала, к моменту пуска 133Ф-5 — на 200 К меньше. Температура графита отражателя, окружающего боковой экспериментальный канал, была на 100—150 К меньше температуры уран-графитового топлива вблизи канала.

После облучения детекторы извлекали из каналов и отправляли во ВНИИТФ для измерения активности на образцовой радиометрической установке с полупроводниковым детектором на основе особо чистого германия. Измерения проводили через 3 сут после облучения. Для повышения точности каждая группа детекторов проходила 3—5 циклов измерений.

Аналогично были организованы эксперименты в 1997 г. в серии пусков 142Ф. Отличия состояли в небольших изменениях состава активационных детекторов и меньшем энерговыделении при вспышках реактора. Наборы активационных детекторов располагали в свободном пространстве в центре центрального и бокового экспериментального каналов.

В эксперименте для обнаружения эффекта просветления необходимо измерять две основные характеристики — абсолютное энерговыделение в каждом пуске (или относительное разных пусков) и флюенс тепловых нейтронов. Эффект просветления при 1200 К составляет по расчетным оценкам 30—40%, поэтому необходимо регистрировать эти характеристики с погрешностью не хуже 5%. Определение абсолютного энерговыделения в пуске ИГР даже с погрешностью 5% является трудной задачей. Относительные измерения энерговыделения по сигналам ионизационных камер, расположенных в водяном баке реактора, затруднены из-за деформации нейтронного поля в активной зоне [6], которое связано с изменением ее температуры, разным положением стержней управления и их влиянием на сигналы камер. Поэтому относительное энерговыделение определено по флюенсу быстрых нейтронов, измеренному активационными детекторами из никеля пореакции $^{58}\text{Ni}(n, p)^{59}\text{Co}$, которые размещали вместе с остальными детекторами. Такое определение правильно при условии, что быстрая часть спектра, нормированная на 1 деление, не меняется (или слабо меняется) с ростом температуры активной зоны. Результаты расчета показали, что при 300 К доля флюенса нейтронов энергией $E_n > 0,5$ эВ в энергетических спектрах, нормированных на 1 деление для различной температуры топлива, равна $8,7 \cdot 10^{-5}$ (2%), при 1000 К составляет $9,2 \cdot 10^{-5}$ (2%). В скобках приведена погрешность расчета (σ).

Расчетное обоснование эксперимента. Рассчитан флюенс нейтронов ($E < 0,5$ эВ) по высоте центрального экспериментального канала для трех значений среднеобъемной температуры и положений стержней управления, зарегистрированных при пусках 133Ф-1, -3 и -5. Результаты расчета с погрешностью в каждой точке ~1% (рис. 1) показывают, что при пусках реактора, когда одновременно изменяется температура активной зоны и положение стержней управления, функция распределения заметно меняется. При комнатной температуре и введенных поглощающих стержнях, т.е. в условиях симметрии верхней и нижней половины активной зоны, максимум функции распределения находится вблизи ее центра. По мере роста температуры уран-графитового топлива и вывода поглощающих стержней из нижней половины зоны симметрия нарушается, и максимум распределения вначале смещается вниз, в ту область, откуда удаляется поглощающий материал. По мере дальнейшего разогрева топлива и вывода стержней уже из верхней половины зоны симметрия начинает восстанавливаться, и максимум распределения начинает подниматься вверх, приближаясь к центру. В трех пусках соотношение флюенса в центре, на уровне 100 мм ниже и выше центра центрального экспериментального канала, т.е. там, где располагались наборы активационных детекторов, составляет 1:1,27:1,4. Отношение потока нейтронов энергией до 0,5 эВ в центре активной зоны при 706 и 1016 К к потоку нейтронов при 300 К является расчетным коэффициентом просветления.



Р и с. 1. Распределение флюенса нейтронов по оси центрального экспериментального канала ИГР в пуске 133Ф-1 (◆), 133Ф-5 (■), 133Ф-3 (▲)

Результаты измерения. Обработка результатов измерений для определения флюенса тепловых и надтепловых нейтронов выполнена согласно рекомендациям [7, 8]. Погрешность опре-

деления флюенса тепловых и надтепловых нейтронов выполнена согласно рекомендациям [7, 8]. Погрешность опре-

деления активационных интегралов при доверительной вероятности 0,95 составляет 5—7% для Au , Cu , La , Cr , Ni , 6—9% для Lu , W , Na , Ti и до 10% для кобальта. Коэффициент просветления вычислен как отношение флюенса тепловых нейтронов во вспышке на разогретой активной зоне к флюенсу во вспышке при комнатной температуре, нормированное на одинаковое энерговыделение во вспышках. Вычисленные коэффициенты просветления в центральном и боковом экспериментальных каналах и оцененная температура графита вблизи мест измерений приведены в таблице.

Коэффициенты просветления

Индекс пуска	Температура графита вблизи центра экспериментального канала, К		Центральный экспериментальный канал		Боковой экспериментальный канал. В свободном поле
	центрального	бокового	В свободном поле	В стальном контейнере	
133Ф-1	300	300	1	1	1
133Ф-3	1023	613	$1,31 \pm 0,02$	$1,29 \pm 0,04$	$1,18 \pm 0,01$
133Ф-5	723	583	$1,17 \pm 0,04$	$1,16 \pm 0,04$	$1,1 \pm 0,01$
142Ф-1	300	300	1	—	1
142Ф-3	1220	—	$1,36 \pm 0,07$	—	—
142Ф-4	1090	723	$1,39 \pm 0,06$	—	$1,19 \pm 0,06$
142Ф-5	858	—	$1,36 \pm 0,09$	—	—
142Ф-7	571	483	$1,22 \pm 0,07$	—	$1,06 \pm 0,04$

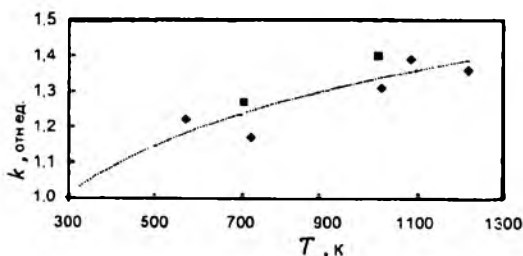
Расчетные и экспериментальные коэффициенты просветления в центральном экспериментальном канале в зависимости от температуры активной зоны в экспериментах 1995 и 1997 гг. представлены на рис. 2. Видно, что результаты расчета эффекта просветления с ~10%-ной погрешностью совпали с экспериментальными данными. В одном и том же пуске коэффициент просветления в боковом экспериментальном канале заметно меньше, чем в центральном, что объясняется более низкой температурой топлива и еще более низкой температурой близлежащего графита в районе бокового канала.

Выводы. Таким образом, с помощью активационных детекторов измерен флюенс тепловых и быстрых ($E > 2,65$ МэВ) нейтронов в центральном и боковом каналах ИГР во вспышках при начальной температуре активной зоны в диапазоне 300—1200 К. Определены коэффициенты просветления уран-графитового топлива. Результаты измерения коэффициента просветления находятся в хорошем согласии с расчетами. Для уточнения экспериментальных данных необходимо провести более детальные измерения пространственно-энергетического поля нейтронов, которое будет зависеть от температуры топлива и положения регулирующих стержней реактора.

В организации и проведении экспериментов на ИГР, а также при обработке результатов большую помощь оказали сотрудники физического отделения РФЯЦ—ВНИИТФ и эксплуатационный персонал ИГР, которым авторы выражают благодарность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курчатова И.В., Фейнберг С.М., Доллежалъ Н.А. и др. Импульсный графитовый реактор ИГР. — Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 6, с. 463—474.
2. Pavshook V., et al. A concept of the multichannel pulse graphite reactor MIGR. — In: Intern. Embedded Topical Meeting «Physics, Safety and Applications of Pulse Reactors», p. 274—280, 13—17 November, 1994, Washington, D.C.
3. Arnaudova M.A., Kandiev Ya.Z., Lukhminsky B.E., Malishkin G.N. Monte-Carlo simulation in nuclear geophysics. In: Comparison of the PRIZMA Monte-Carlo program and benchmark experiments. — Nucl. Geophys., 1993, v. 7, № 3, p. 407—418.
4. RSIC Computer Code Collection, MCNP-4A. Monte-Carlo N-Particle Transport Code System. ORNL, 1993.
5. Васильев А.П., Горин Н.В., Кандиев Я.З. и др. Верификация методик расчета характеристик импульсного графитового реактора. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 3, с. 150—153.



Р и с. 2. Зависимость коэффициента просветления в центральном экспериментальном канале от температуры топлива вблизи него: $\blacklozenge$, $\blacksquare$ — эксперимент, расчет соответственно

6. Васильев А.П., Горин Н.В., Кандиев Я.З. и др. Исследование трехмерного нейтронного поля в активной зоне ИГР. — Там же, 1997, т. 82, вып. 6, с. 407—413.
7. Брискман Б.А., Генералова В.В., Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Внутрореакторная дозиметрия. Практическое руководство. М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках. Рекомендуемые справочные данные и методики измерений. Т. 2. М., ЦНИИатоминформ, 1976.

Поступило в Редакцию 28.10.98

УДК 621.039.58'68

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АППАРАТОВ ТВЭЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Грозовский Г.И., Калганова Е.Г., Малевинский Г.В.
(НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России), Романов А.В. (АО «МСЗ»)*

Вероятностные методы анализа начинают находить применение в экспертизе безопасности исследовательских реакторов и аппаратов ПТЦ. При этом критерием безопасности для аппаратов ПТЦ, размещенных в обслуживаемых или полубслуживаемых помещениях (корпусах), является риск облучения персонала.

Экспертизу прежде всего интересует риск наружного облучения персонала в случае возникновения самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) на одном из аппаратов. Факторами, влияющими на риск облучения персонала, в подобных аварийных ситуациях являются частота возникновения и мощность возникшей СЦР.

Поражающие факторы радиационной аварии. Основная опасность аварии на производстве, вырабатывающем диоксид урана, связана с ситуацией, вызванной сочетанием нескольких факторов и заключающейся в возникновении СЦР с испусканием потоков γ -квантов и нейтронов. Один из главных факторов, способствующих возникновению СЦР, является присутствие в материале водородосодержащих веществ (в частности, воды) или других эффективных замедлителей нейтронов. Остальные факторы относятся к условиям образования критической массы. При возникновении и до самогашения СЦР из делящегося вещества испускаются мгновенные нейтроны и γ -кванты высокой интенсивности. После самогашения, происходящего вследствие ликвидации условий образования критической массы (тепловое расширение, испарение замедлителя), облучение связано с вторичными явлениями: излучением осколков деления ядер урана и наведенной активностью стен.

Появление условий возникновения СЦР так или иначе связано с нарушениями нормальной эксплуатации аппарата.

Анализ нарушений нормальной эксплуатации. Проекты автоматизации управления аппаратом и эксплуатационные инструкции предусматривают комплекс мер, предупреждающих образование условий возникновения СЦР и называемых барьерами безопасности. Но любой барьер может разрушаться вследствие недостаточно высокой надежности образующих его элементов.

Элементарный отказ вызывает соответствующую реакцию контролируемого технологического процесса. Каждый аппарат имеет свои органы управления (для изменения подачи исходного продукта, подвода энергии и т.п.), приводимые в действие либо автоматикой (по команде защиты, блокировки), либо вручную персоналом. Поэтому устранением элементарного отказа будет либо восстановление технологического процесса до начального стационарного состояния, либо перевод аппарата в другое стационарное состояние. Своевременное устранение отказа возможно, если автоматика исправна, оператор находится на рабочем месте и действует правильно (в соответствии с технологической инструкцией), первопричина исходного события (элементарный отказ) не привела к появлению зависимого отказа. В других случаях первопричина нарушения вызывает более глубокие последствия. Восстановление технологического процесса уже не происходит, а текущая ситуация может потребовать принятия экстренных мер для безопасности персонала. Эти последствия рассматриваются далее как этапы продвижения процесса по пути ИС→ИСА, где ИСА — исходное событие аварии, ИС — исходное событие, степень опасности которого не требует экстренных мер безопасности, а персонал располагает резервом времени для выполнения восстанавливающих действий. Так, аппарат переходит в то или иное состояние: установившееся контролируемое состояние после удачного устранения ИСА (срабатывание систем безопасности, правильные и своевременные действия оператора) или аварии с последующими радиационными последствиями для персонала.

Построение дерева событий по перечню ИСА и предполагаемым сценариям развития аварии создает предпосылки для последующего получения численных оценок вероятности разрушения барьеров безопасности и прогнозирования, как часто такие переходы могут происходить в реальных условиях эксплуатации аппаратов. Иллюстрирует сказанное рисунком на примере одного из аппаратов.