

ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕЙТРОННОГО КОНТРОЛЯ И ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ «ОБЪЕКТА УКРЫТИЕ»

Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, В. А. Краснов

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

Приводятся результаты экспериментальных и модельных исследований динамики нейтронной активности скоплений топливосодержащих материалов (ТСМ). Обоснована концепция обеспечения ядерной безопасности объекта «Укрытие» путем оперативного предотвращения условий возникновения самоподдерживающейся цепной реакции. Показаны возможности реализации средств раннего обнаружения и подавления подкритических аномалий, возникающих вследствие опасных изменений размножающих свойств локальных зон в скоплениях ТСМ.

Введение

После завершения активной стадии аварии главными вопросами были, где и в каком состоянии находятся 190 т топлива, и может ли оно быть ядерно-опасным. Расчетные оценки показывали, что уже при сохранении десятой части регулярной структуры активной зоны реактора в отсутствие поглотителей возможно возникновение самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР). Только в 1988 г., когда через пробуренные скважины получили доступ в шахту реактора и подреакторное пространство, стало ясно, что зона полностью разрушена, шахта реактора пуста и топливо в виде регулярных структур зоны в больших объемах сохраниться не могло.

Поисковые работы и исследования состава и геометрии лавообразных топливосодержащих масс (ЛТСМ), расположенных на нижних отметках объекта, а также нейтронные измерения и постоянный контроль динамики нейтронной активности дали основания к 1990 г. сделать выводы о ядерной безопасности объекта [1]. И это было естественно, так как стеклообразная поверхность и температура более 100 °С внутри лав, находящихся в подреакторном пространстве, полностью исключали возможность попадания воды и давали определенные гарантии, что лавы в любых достижимых геометрических и массовых комбинациях с низкообогащенным ураном будут глубоко подкритичными. И хотя в центральном зале (ЦЗ) полностью неизвестными оставались расположение и состояние топлива, предположительно выброшенного взрывом на отметку 35 м и засыпанного сверху пятиметровым слоем изолирующих материалов, а детекторы, размещенные на периферии завалов в ЦЗ, практически не регистрировали нейтронной активности, но и здесь определенные гарантии безопасности давало большое содержание в материалах засыпки нейтронных поглотителей – более 40 т карбида бора.

Настораживающим событием, которое указывало на то, что придется пересмотреть выводы по ядерной безопасности объекта, была нейтронная аномалия, значительно выходящая за рамки наблюдаемой уже два года системой «Финиш» устойчивой и прогнозируемой динамики нейтронной активности ТСМ. В течение 5 сут (24 - 29 июня 1990 г.) счетность в канале системы «Финиш», регистрирующем нейтроны в подреакторном помещении 304/3, возрастала с постоянно увеличивающейся скоростью, характерной для скорости нарастания плотности потока нейтронов (ППН) в подкритической размножающей системе при вводе в нее положительной компенсирующей реактивности. Счетность в канале возросла в 64 раза, а период удвоения ППН уменьшился более чем на порядок, когда в район расположения детектора ввели однопроцентный раствор азотнокислого гадолиния. Поглотитель нейтронов фактически заблокировал детектор от тепловых нейтронов, но не повлиял на уровень подкритичности. Счетность канала резко упала в пять раз, но к начальному уровню счетность вернулась только через 36 ч. Подробные исследования причин этой аномалии были приведены авторитетной комиссией только в 1992 г. [2]. Из восьми выдвинутых гипотез похожим

был только сценарий развития подкритической аномалии в результате поступления воды от атмосферных осадков в локальную зону ТСМ вплоть до возникновения СЦР с числом деления 10^{18} и разгоном на запаздывающих нейтронах при эффективном коэффициенте размножения $K_{эф} \approx 1 + 4 \cdot 10^{-3} \beta$ [3].

Первым официальным документом, в котором признавалось, «что объект «Укрытие» нельзя считать ядерно-безопасным», был «Анализ текущей безопасности...», подготовленный в 1996 г. [4]. В этом документе указывалось, что «совокупности наших знаний о скоплениях ТСМ недостаточно, чтобы расчетным или экспериментальным путем доказать невозможность возникновения самоподдерживающейся цепной реакции». Эти выводы остались без изменения и при анализе состояния объекта, проведенном в 2001 г. [5].

Более категоричным было заявление администрации ядерного регулирования (АЯР), определяющее государственную политику регулирования деятельности по обеспечению ядерной и радиационной безопасности объекта, появившееся в 1997 г. в соответствии с постановлением Кабинета Министров от 28 декабря 1996 г. В частности, в нем указывалось: «находящиеся на объекте ядерные материалы.... создают угрозу возникновения СЦР»; «на объекте не обеспечен, соответствующий требованиям нормативных документов по безопасности, контроль состояния ядерных материалов». Что касается деятельности по обращению с ядерными материалами, то в заявлении указывалось, что она должна «основываться на принципе предотвращения ядерного инцидента» и быть направлена на: выявление мест нахождения ядерных материалов; реализацию неотложных мер по созданию надежной системы контроля и управлению реактивностью ТСМ; измерения и моделирования протекающих в ТСМ физических процессов с целью прогнозирования их поведения [6].

Именно в обеспечении этих направлений в ИПБ АЭС проводятся работы, связанные с исследованием эффективности нейтронного контроля подкритичности ТСМ и практической реализацией функций безопасности, обеспечивающих принцип «предотвращения» СЦР путем раннего обнаружения и подавления подкритических аномалий [7, 8].

Функции ядерной безопасности

Для специфических условий объекта «Укрытие», когда исключается возможность превентивного воздействия на массовые и геометрические параметры размножающих систем, которыми являются ТСМ, ядерная безопасность может достигаться только за счет оперативного использования гомогенных поглотителей нейтронов.

При начальной глубокой подкритичности ТСМ возникновение СЦР может быть результатом введения положительной реактивности за счет:

проникновения воды в структуру ТСМ, ставшей водопроницаемой в результате охрупчивания и растрескивания в процессе остывания;

изменения геометрии при обрушениях и образованиях квазигомогенной уран-графитовой смеси (“сухой инцидент”).

Возможность залпового залива ТСМ водой практически отсутствует. Также крайне мала вероятность “сухого инцидента”, так как он связан с экстремальными внешними воздействиями и трудно реализуемой в условиях объекта комбинацией делящегося вещества и замедлителя [4]. Поэтому значимые риски уменьшения подкритичности ТСМ, вплоть до возникновения СЦР, связаны только с вялотекущими процессами поступления на объект воды от атмосферных осадков и конденсата. Эти процессы могут быть интерпретированы как введение положительной реактивности в гипотетическую размножающую систему за счет:

увеличения массовой доли замедлителя, т.е. увлажнения ТСМ, что характерно для ТСМ в подреакторном помещении;

уменьшения концентрации гомогенных поглотителей нейтронов в результате вымывания водой нейтроннопоглощающих компонент из структуры ТСМ, находящихся на нижнем перекрытии ЦЗ.

Процессы введения положительной реактивности подлежат обязательному контролю. Контроль в условиях объекта «Укрытие» может быть реализован только посредством непрерывного наблюдения за сохранением и изменением уровня подкритичности тех зон в скоплениях ТСМ, в которых расчетные и экспериментальные данные допускают возможность образования критических условий при увлажнении (далее по тексту КМЗ – зоны критмассового риска). В крупных скоплениях ТСМ может образоваться по несколько таких зон. Функции раннего обнаружения опасных изменений начального уровня подкритичности и следующий за этим локальный ввод в опасную зону поглотителей нейтронов обеспечивают ядерную безопасность объекта в соответствии с принципом "предотвращения".

Параметром текущей подкритичности для ТСМ (размножающая система неопределенной геометрии с источником нейтронов) является нейтронная активность, измеряемые значения которой могут быть однозначно привязаны к текущему значению эффективного коэффициента размножения $K_{эф}$. Нейтронная активность для ТСМ в стабильно глубоком подкритическом состоянии определяется в основном нейтронами спонтанного деления накопленных актинидов. Многолетняя динамика поведения этого параметра носит устойчивый и предсказуемый характер с незначительными сезонными колебаниями около среднегодовой составляющей (рис. 1).

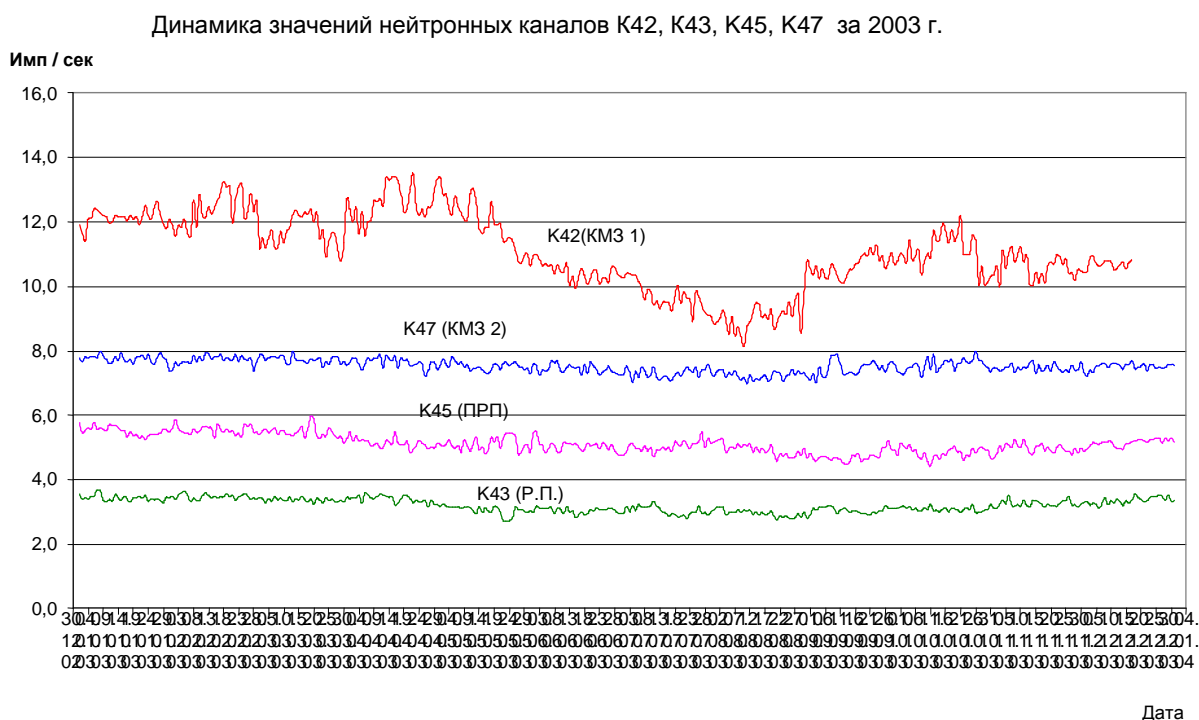


Рис. 1. Годовая динамика нейтронной активности в реакторном пространстве (РП) и подреакторном помещении (ПРП).

Изменения уровня подкритичности может оцениваться только по результатам интерпретации динамики относительных изменений измеряемых во времени значений ППН, т.е. скорости счета в нейтронных каналах. При наличии оценочных значений начальной подкритичности $K_{0эф}$ относительные изменения скорости счета однозначно привязываются к текущему значению $K_{эф}$. На допустимые текущие значения скорости счета в нейтронных каналах накладывается ограничение, соответствующее $K_{эф}$, - не более 0,95, а также выбирается

коэффициент запаса на допустимое значение параметра. Предотвращение превышения допустимых значений параметра обеспечивает ядерную безопасность объекта.

Эффективность функции обнаружения и подавления подкритических аномалий и определяет в конечном итоге достижимый уровень ядерной безопасности объекта,

Зоны критмассового риска

Консервативная оценка количества, геометрии и гипотетических структурных композиций «топливо – замедлитель - отражатель» определяет возможность возникновения СЦР только в скоплениях ТСМ, находящихся в подреакторном помещении 305/2 и ЦЗ.

Предполагается, что в ЦЗ под слоем засыпки находится более 20 т ядерного топлива в виде фрагментов активной зоны (АЗФ). Гипотетически возможные композиции «топливо – графит – вода» могут создавать реальную угрозу возникновения СЦР, при этом процесс роста мощности при СЦР будет носить более интенсивный характер, чем в композициях с ЛТСМ [9]. Скопление топлива в ЦЗ фактически не исследовано, неизвестны расположение и физико-химические характеристики состава ТСМ, на периферии засыпки нейтронная активность не регистрируется, т.е. контроль состояния топлива полностью отсутствует.

Для помещения 305/2 наиболее вероятные топливные композиции, образование которых может привести к появлению условий критичности, представляют собой гомогенные структуры из лавы и АЗФ - обломки твэлов и тепловыделяющих сборок, а также непереплавленные топливные таблетки. Геометрические параметры гомогенной критической сборки с отражателями из бетона, при полученных средних значениях концентрации и выгорания топлива и отношением объемов лавы и АЗФ от 1,5 до 4 при оптимальном увлажнении, составляют (диаметр сферы или цилиндра, толщина пластины) от 1 до 2 м с массой топлива до 5,0 т [5].

Возможность образования таких сборок в процессе распространения и остывания лавы создавалась в местах ее затекания и ухода. Это районы 4-го юго-западного паросбросного клапана, пролома стены в помещении 304/3 и откатных ворот в юго-восточном секторе помещения 305/2. Здесь происходила естественная фильтрация и удержание непереплавленных фрагментов зоны. В юго-восточном секторе также наблюдались признаки достаточно глубокого прожога пола. Углубления в нижнем перекрытии помещения 305/2, которые образовались в результате прожога, являются естественными бассейнами, в которые поступает и удерживается вода, попадающая на нижнее перекрытие помещения 305/2, т.е. создается подкритическая сборка, реактивность которой регулируется уровнем воды в углублении.

Массивы ТСМ, локализованные в вышеобозначенных районах помещения 305/2, были определены как КМЗ: КМЗ-1 в районе пролома стены между помещениями 305/2 и 304/3; КМЗ-2 в районе 4-го паросбросного клапана; КМЗ-3 в южном углу около откатных ворот (рис. 2). В район КМЗ-3 доступа для установки нейтронного контроля не было. Долговременная регистрация и анализ нейтронной активности КМЗ-2 позволили установить, что в показаниях детекторов нейтронов не наблюдается значимых аномалий, коррелирующих с поступлением воды от атмосферных осадков и, следовательно, пока отсутствуют риски опасных изменений начальной подкритичности. В то же время значимые изменения в динамике нейтронной активности КМЗ-1 всегда являлись следствием выпадения атмосферных осадков и/или поступления конденсата, интенсивность и продолжительность которых превышала определенный порог. Пример корреляции нейтронной активности КМЗ-1 с интенсивностью атмосферных осадков приводится ниже на рис. 5.

В настоящее время КМЗ 1 контролируется тремя детекторами (№ 22, 25 и 30) нейтронов, подключенными к каналам системы «Финиш» (рис. 3).

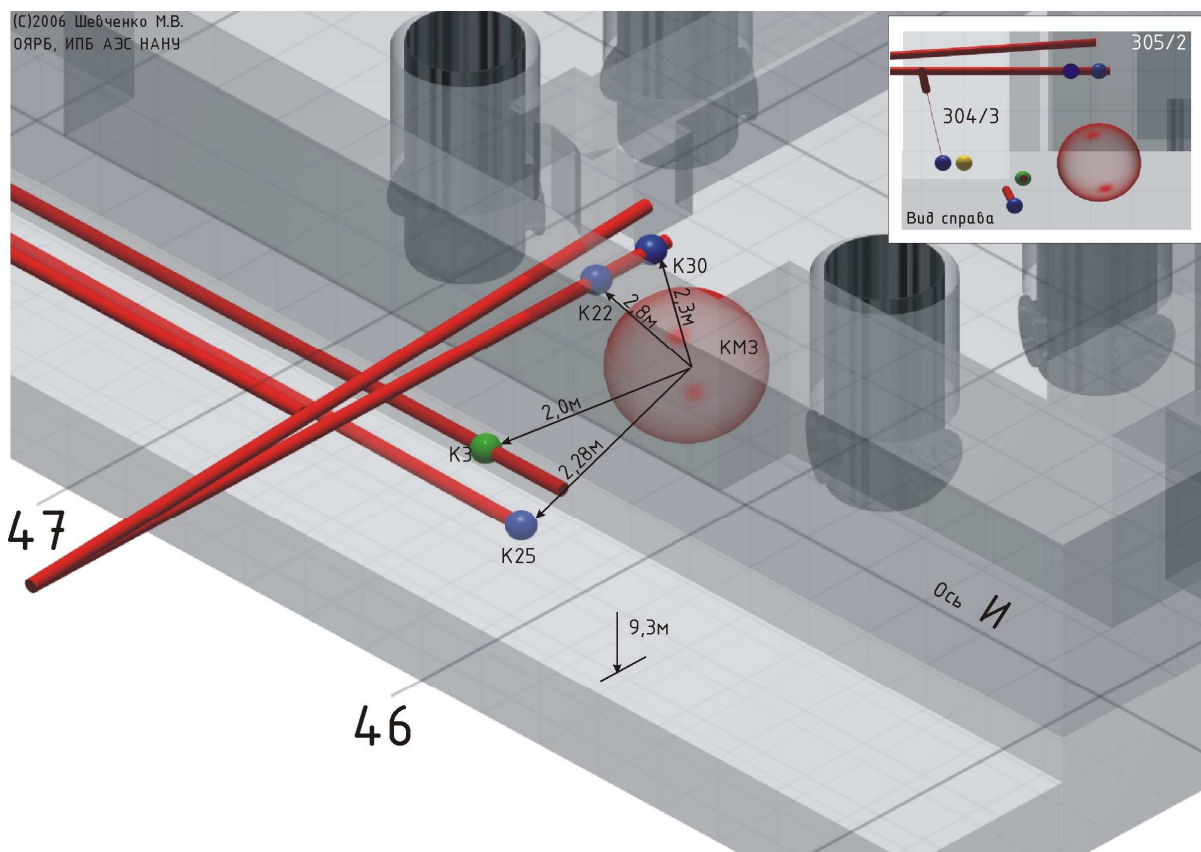


Рис. 3. Геометрия наблюдения КМЗ-1 нейтронными детекторами системы «Финиш».

Динамика показаний этих детекторов посуточно восстанавливается и сопоставляется с динамикой атмосферных осадков, внешней температурой и интенсивностью истока воды с нижнего перекрытия помещения 305/2. Среднесуммарный поток воды с отметки 9,0 м, который наблюдается ежемесячно, изменяется в пределах от 0,05 до 1,15 м³ при среднесуточном расходе 0,029 м³. Только в июле 2000 г., при выпадении 172 мм осадков за месяц, исток воды составлял 6,34 м³ [7]. Все это подтверждает наличие определенного режима поступления и истока воды с нижнего перекрытия помещения 305/2 и, следовательно, изменения уровня воды в районе пролома.

На рис. 4 приведены характерные годовые временные реализации нейтронной активности N , интенсивности атмосферных осадков S и истока воды с нижнего перекрытия L . Количество воды, попадающей на нижнее перекрытие в помещение 305/2, зависит от периодичности и интенсивности осадков, их агрегатного состояния (дождь - снег), а также плюсовой или минусовой внешней температуры.

В зависимости от скорости притока или оттока меняется уровень воды в композиционной сборке в КМЗ-1 и, следовательно, уровень подкритичности $\delta K_{эф} = 1 - K_{эф}$, который определяет колебания ППН около некоторой средней составляющей.

Колебания нейтронной активности носят преимущественно сезонный характер. Наиболее значительные нестабильности приходятся на летне-осенний период, совпадающий с периодом конденсации (май - сентябрь), тогда подъем активности всегда отслеживает среднесуточную норму осадков, превышающую 30 мм/сут (рис. 5).

Анализ наиболее характерных нестабильностей на временных реализациях нейтронной активности показал, что почти всегда существует запаздывание в реакции детектора на интенсивность внешних атмосферных осадков. Время запаздывания различно, но всегда за-

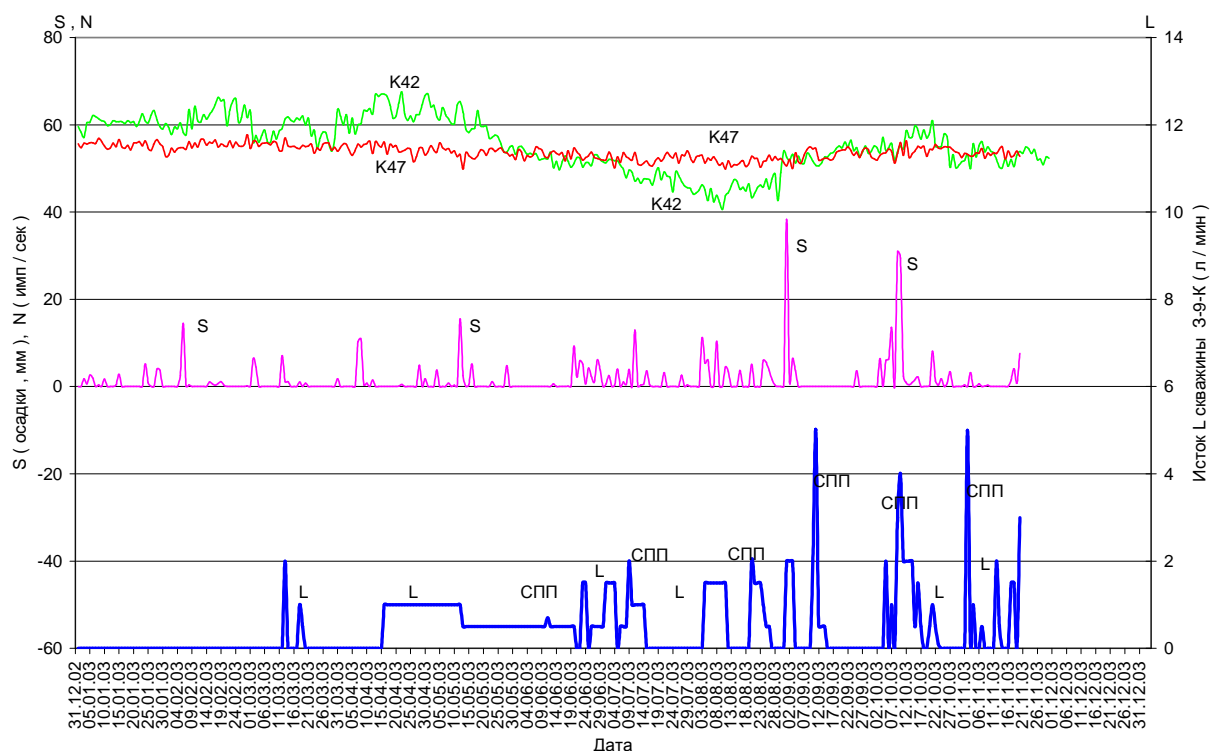


Рис. 4. Характер нейтронной активности для КМЗ-1 (к. 42) и КМЗ-2 (к. 47).

висит от количества и периодичности выпадающих осадков на предваряющем (до нескольких суток) временном интервале. При этом, в случае достаточно длительного отсутствия осадков, происходит спад активности и отсутствует реакция на значительное количество осадков, выпавших сразу после «сухого» периода. Но последующие менее интенсивные осадки вызывают соответствующую реакцию и практически без запаздывания. Очевидно, на маршрутах поступления воды на нижние перекрытия объекта «Укрытие» существует «каскад бассейнов», которые и определяют механизм запаздывания и выравнивания скоростей притока и поднятия уровня воды на нижнем перекрытии помещения 305/2 (отметка 9,7 м).

Для размножающих систем с глубокой подкритичностью скорость изменения ППН практически равна скорости ввода-вывода реактивности, т.е. динамика счетности, регистрируемая нейтронным детектором, следует за уровнем воды в композиционной сборке. Усреднение оценки скорости спада и нарастания нейтронной активности позволяют предположить, что:

механизм водопотоков на объекте «Укрытие» определяет относительно постоянную скорость ухода воды с отметки 9,7 м;

скорость поступления воды на отметке 9,7 м зависит от динамики поступления воды на объекте «Укрытие», но всегда ограничена сверху механизмами фильтрации на маршрутах водопотоков.

Поэтому появление и развитие опасной подкритической аномалии возможно в случае длительного поступления воды на отметке 9,7 м со скоростью, превышающей скорость просачивания и ухода воды из района КМЗ-1.

Еще одним фактором, который может ограничивать скорость ввода положительной реактивности в размножающую систему, является процесс, связанный с объемной влагоемкостью ЛТСМ. Оценки доступной пористости ЛТСМ составляют 4 – 9 %. Процесс поглощения воды протекает крайне медленно, за десятки часов реализуется только до 50 % пористости. Но в условиях, когда объемное содержание воды в критической системе составляет 20 - 30, то 3 – 5 % незаполненного объема в композиции могут играть решающую роль [9].

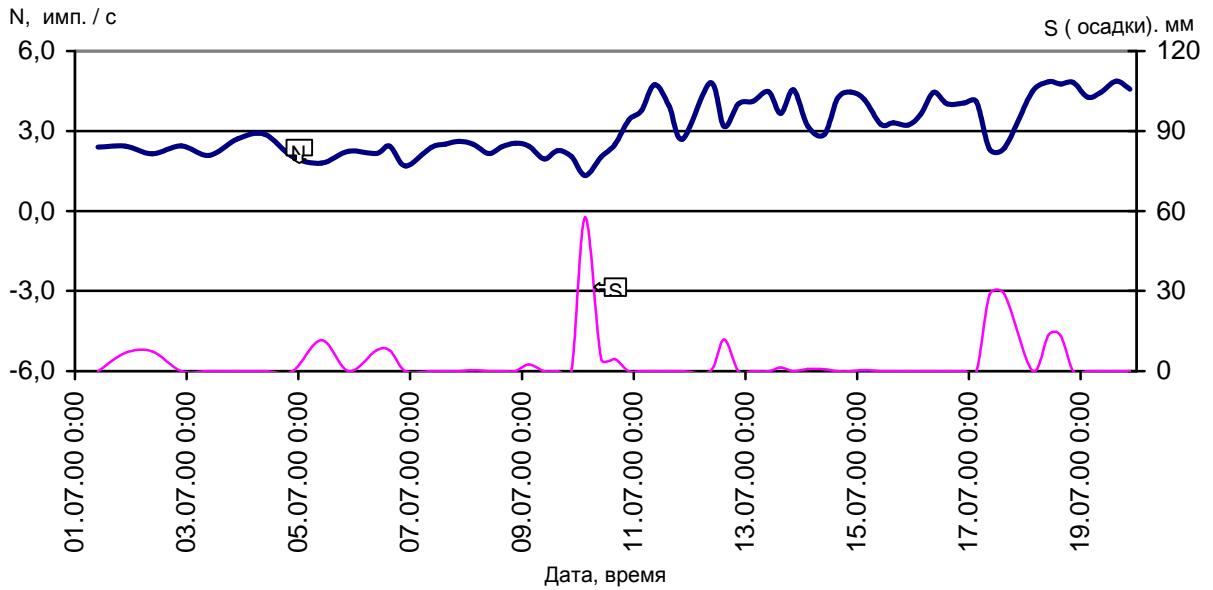


Рис. 5. Характер динамики нейтронной активности и интенсивность атмосферных осадков в летний период.

Самые предварительные оценки скорости вывода реактивности при уходе воды с нижнего перекрытия помещения 305/2, сделанные по многолетним временным реализациям, дали значения $\sim(0,5 \div 2,6) \cdot 10^{-4} \beta/c$, при консервативной оценке максимально возможной скорости ввода $\sim 10^{-3} \beta/c$.

Контроль подкритичности

Контроль за сохранением безопасного уровня подкритичности КМЗ основывается на существовании сложившейся динамики поведения нейтронной активности.

Наблюдаемая динамика нейтронной активности показывает, что при стабильном состоянии подкритичности ППН фактически постоянна, поэтому любая тенденция к увеличению плотности потока, т.е. появление аномалии, может быть причинно связана с увеличением эффективного коэффициента размножения подкритической сборки, которой и является КМЗ.

Состояние уровня подкритичности ТСМ оценивается по результатам интерпретации динамики изменений, измеряемых во времени значений $N(t)$ скорости счета в нейтронных каналах.

Соотношение, которое связывает скорость счета в канале с параметрами критичности среды, можно представить в виде

$$N(t) = A \{ S_n / [1 - K_{эф}(t)] + S_f \}, \quad (1)$$

где $K_{эф}(t)$ – эффективный коэффициент размножения, может меняться во времени под воздействием внешних факторов; A – показатель эффективности канала, зависящий от чувствительности детектора к нейтронам утечки, геометрии наблюдения и среды раздела на границе «детектор - КМЗ», статической характеристики преобразования; S_n – интенсивность распределенного источника нейтронов, находящихся в контролируемом объеме зоны; S_f – интенсивность нейтронного фона в месте расположения детекторов.

Соотношение (1) показывает, что текущая величина $N(t)$ следует за изменением $K_{эф}$ и при подходе к критичности ($\delta K_{эф} \rightarrow 0$) будет неограниченно возрастать. При этом реакция (в идеальной геометрии) «вектор – реализации $N(t)$ » на текущую величину $\delta K_{эф}$ будет определяться следующими соотношениями:

измеряемое абсолютное значение скорости счета в канале

$$N(t) \sim 1/\delta K_{эф}, \quad (2)$$

скорость изменения абсолютного значения

$$dN(t)/dt \sim 1/\delta K_{эф}^2 \quad (3)$$

Вектор реализации $N(t)$ будет адекватно отражать состояние размножающей системы только в том случае, если значение абсолютной величины S_f сравнимо с величинами интенсивности нейтронного потока от КМЗ.

В реальной геометрии наблюдения удаленность детектора от контролируемой зоны, поглощающие свойства на границе раздела, а также значительная величина местного фона создают ситуацию, когда отклик детектора на изменение нейтронной активности КМЗ на ранних стадиях развития подкритической аномалии фактически отсутствует, т.е. функция раннего обнаружения на данном канале не реализуется.

Моделирование подкритической аномалии

Эффективность нейтронного контроля определяется способностью детектора обнаруживать нейтронную аномалию, вызываемую изменениями подкритичности КМЗ до достижения допустимых $K_{эф} \leq 0,95$. В реально достижимой геометрии наблюдения детектор располагается на периферии КМЗ и регистрирует нейтроны утечки КМЗ и нейтроны местного фона от ТСМ. Постоянная составляющая фона и сигнальная составляющая нейтронов утечки не могут быть определены экспериментальным путем, так как нет возможности провести эксперимент с возмущением среды от внешних источников нейтронов. Поэтому исследования и оценки эффективности каналов нейтронного контроля проводились с помощью расчетного моделирования распределений ППН.

Были построены сферическая и трехмерная компьютерные модели, воспроизводящие расположение и элементный состав ТСМ в строительных конструкциях помещении 305/2. При построении моделей использовались самые последние данные видеонаблюдений и пробоотборов, а также отработанные экспертные версии геометрических и массовых параметров ТСМ.

Сферическая модель использовалась для предварительных оценок относительных величин откликов детекторов на точечный источник нейтронов со спектром деления, расположенный в условном центре неразмножающей среды сферического ядра, представляющего КМЗ. Ядро прикрывалась сверху полусферой, моделирующей слой ТСМ, снизу полусферой, моделирующей бетон нижнего перекрытия помещения 305/2. Элементный состав неразмножающей среды моделей задавался по усредненным результатам пробоотборов. Расчеты версий распределений ППН проводились в двухгрупповом приближении специальной программы с использованием экспериментальных значений сечений, измеренных для спектров деления. Ослабление отклика детекторов, расположенных в бетоне нижнего перекрытия, на 2 - 3 порядка превышало ослабление отклика детекторов, располагаемых над слоем ТСМ. Это фактически совпадало с данными долговременных измерений динамики нейтронной активности и подтверждало нецелесообразность использования маршрутов доступа в бетоне к местам размещения ТСМ.

Для корректных исследований динамики изменений распределения ППН в помещении 305/2 на разных стадиях развития подкритической аномалии были использованы возможности многофункциональной программы расчетов переноса нейтронов методом

Монте Карло (MCNP-4C). Для чего была построена полная трехмерная модель расположения ТСМ в строительных конструкциях помещения 305/2. Модель представляет собой структуру из множества (более 600) материальных ячеек, на каждой из которых определялся объем и элементный состав. В настоящее время проводятся работы по верификации параметров модели путем сопоставления расчетных версий распределений ППН с экспериментальными нейтронными полями, восстановленными по более чем 200 измеренным значениям ППН в подреакторных помещениях.

При окончательной отработке версии материальной модели предполагается симулировать появление и поэтапное развитие подкритической аномалии и получить сопровождающую этот процесс динамику изменения распределений ППН в любой точке подреакторного пространства.

Предварительные результаты моделирования влияния нейтронной аномалии, появляющейся в КМЗ, на распределение ППН показывают, что большинство детекторов реально существующей на объекте «Укрытие» сети контроля не отреагируют на ядерный инцидент даже на стадии разгона на запаздывающих нейтронах.

Технология подавления

Предотвращение возможности возникновения критических условий осуществляется через функцию локального подавления размножающих свойств среды КМЗ. Функция локального подавления реализуется путем подачи в район КМЗ гомогенного нейтронного поглотителя. Подача поглотителя является технологическим процессом, включающим в себя приведение в готовность оборудования, перемещение и подсоединение его к заранее подготовленным маршрутам.

Маршруты доставки поглотителя должны гарантировать попадание его в массив КМЗ, а не в среду границы раздела «детектор – источник». В последнем случае тепловая составляющая контролируемого потока нейтронов «съедается», имитируя процесс подавления аномалии.

Технология доставки поглотителя определяется индивидуально для каждой КМЗ, с учетом реально существующих маршрутов, и может быть реализована:

- подачей поглотителя сверху и пропиткой массива;
- подпором и подъемом уровня снизу к основанию КМЗ;
- подмешиванием поглотителя к водопотокам, подходящим в район КМЗ.

Состояние готовности технологической системы подавления ориентировочно определяется тремя часами, если скорость ввода реактивности при развитии подкритической аномалии не превышает 10^{-4} β /с и не должно превышать 20 мин при скорости ввода реактивности 10^{-3} β /с.

Объемы и скорость подачи поглотителя могут быть оценены расчетно-экспериментальными методами в каждом случае индивидуально для конкретного маршрута и способа доставки.

Для КМЗ-1, расположенной в районе «пролома», удобным маршрутом доставки поглотителя могут служить скважины Ю.12.83 и Ю.12.78. Скважины проходят с юга на север, по оси 46_{+2600} и попадают в завал над проломом на расстоянии 11 м от преентора (см. рис. 2). В скважине Ю.12.78 установлено два дублирующих детектора нейтронов, обеспечивающие контроль подкритичности КМЗ-1 с верхней стороны завала. Основным маршрутом доставки служит скважина Ю.12.83, выходящая из стены помещения 305/2, точно над проломом, на отметке 12,8 м. Верхняя граница завала над проломом достигает отметки 10,3 м. Завал имеет покатые с углом 10^0 снижения вдоль стены склоны, поверхность которых в сетке глубоких разломов, что позволяет считать структуру завала водопроницаемой.

Скважина Ю.12.83 свободна и через нее пропущен стационарный трубопровод, выходящий непосредственно на завал на отметке 10,3 м, что позволяет обойти нейтронные детекторы, размещенные в скважине Ю.12.78.

К стационарному трубопроводу, по требованию готовности, подсоединяется установка подачи поглотителя. Такой установкой может быть насос с электроприводом на двухколесной тележке типа «Вагнер», позволяющей подавать за 1 ч на расстояние более 10 м до 200 л жидкости.

Оценка необходимых объемов и скорости подачи поглотителя может широко варьироваться в зависимости от уровня подкритичности, задаваемого пределами безопасной эксплуатации объекта.

К основным результатам проделанной работы можно отнести следующее:

1) в подреакторном пространстве локализованы три зоны КМЗ. В этих зонах доказано наличие гомогетерогенных структур (ЛТСМ + АЗФ), которые при наличии воды образуют критическую массу, вписывающуюся в геометрию этих участков скопления. Зона в районе пролома юго-восточного сектора – КМЗ-1, зона в районе паросбросного клапана юго-западного сектора – КМЗ-2, зона у южных откатных ворот – КМЗ-3;

2) контроль параметров подкритичности с гарантией обнаружения аномалии до $K_{эф} \leq 0,95$ при существующих маршрутах доступа к подреакторному помещению (305/2) обеспечивается для зоны в районе «пролома» (КМЗ-1) и зоны в районе паросбросного клапана (КМЗ-2). К зоне в районе южных откатных ворот (КМЗ-3) доступ отсутствует. Также полностью отсутствует доступ к скоплениям топлива, находящемуся в ЦЗ, нейтронная активность на периферии завалов ЦЗ не регистрируется;

3) создание верифицированной компьютерной модели позволило максимально приблизиться к реальной ситуации при симуляции появления и развития подкритической аномалии в КМЗ. При создании модели помещения 305/2 и верификации ее по геометрии и физико-химическому составу ТСМ были использованы результаты сопоставления расчетных и экспериментальных нейтронных и гамма-полей;

4) анализ режимов поступления воды на объект от атмосферных осадков и конденсата, исследования маршрутов миграции водопотоков на нижней отметке объекта, а также полученные значения корреляции истока воды с нижней отметки (9,7 м) с колебаниями нейтронной активности КМЗ-1 дали основание ограничить возможную максимальную скорость ввода положительной компенсирующей реактивности при достройке зоны водой на уровне $< 10^{-3}\beta/c$.

Выводы

1. Ядерная безопасность объекта «Укрытие» не обеспечивается, так как на объекте нет и не предполагается реализация штатных функций ядерной безопасности.

2. Штатные функции ядерной безопасности объекта «Укрытие» могут быть реализованы, так как единственным фактором, приводящим к изменению начальной подкритичности, вплоть до возникновения СЦР, являются вялотекущие (многочасовые) процессы поступления и накопления воды во внутренних помещениях объекта от атмосферных осадков и конденсата.

3. Эффективность функций безопасности состоит в возможно более раннем ($K_{эф} \leq 0,95$) обнаружении аномальных тенденций к опасным изменениям уровня подкритичности, а также в надежности оперативного подавления размножающих свойств ТСМ путем локального ввода зон риска нейтронных поглотителей.

4. При реальном доступе только к удаленной периферии зон риска реализуется заведомо «плохая» геометрия наблюдения нейтронной активности. В этом случае отклик каждого детектора на нейтронную аномалию из-за высокого местного фона и неопределенной среды раздела будет сугубо индивидуальным. Поэтому критерии раннего обнаружения должны быть определены индивидуально для каждой точки нейтронного контроля.

5. В условиях отсутствия возможности проведения активного эксперимента критерии раннего обнаружения определяются только путем расчетного моделирования распределений

ППН на периферии ТСМ в зависимости от изменения мощности объемного источника нейтронов деления, имитирующего зону риска в процессе изменения ее подкритичности.

6. Эффективность нейтронного контроля, соответствующая требованиям обеспечения ядерной безопасности, достигается только за счет оптимального размещения детекторов нейтронов и задания индивидуальных критериев обнаружения для каждого из них.

7. Ядерную безопасность можно полностью гарантировать только в случае установления полного нейтронного контроля в подреакторном помещении и кардинального решения проблемы доступа к скоплениям топлива под завалами в ЦЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Техническое обоснование ядерной безопасности объекта «Укрытие»: (Отчет о НИР) / КЭ при ИАЭ им. И. В. Курчатова.* – Чернобыль, 1990. – 160 с.
2. *Заключение экспертной комиссии о причинах аномального события в помещении 304/3 объекта «Укрытие» в июне 1991 г. / ИБРАЭ РАН, 1992.* – 67 с.
3. *Фролов В.В.* Аномальный инцидент 27 - 30 июня 1990 г. в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС // *Атомная энергия.* – 1996. - Т. 60, вып. 3. – С. 216 - 219.
4. *Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации: (Отчет) / МНТЦ «Укрытие». Руководитель темы А. А. Боровой.* - Арх № 3601. – Чернобыль, 1996. – 272 с.
5. *Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации: (Отчет о НИР) / МНТЦ «Укрытие» НАН Украины; Руководитель темы А. А. Боровой.* – Арх. № 3836. - Чернобыль, 2001.
6. *Заявление о политике регулирования ядерной и радиационной безопасности объекта «Укрытие» ПО «Чернобыльская АЭС» / Администрация ядерного регулирования.* - К., 1997.
7. *Высотский Е.Д., Шевченко В.Г.* Методические основы контроля подкритичности топливосодержащих масс. – Чернобыль, 1998. – 24 с. – (Препр./ НАН Украины. МНТЦ «Укрытие»; 98-1).
8. *Разработка методик и способов контроля состояния подкритичности топливосодержащих материалов. Модельные и экспериментальные исследования эффективности контроля состояния подкритичности критмассовых зон: (Отчет о НИР) / МНТЦ «Укрытие» НАН Украины; Руководитель темы А. А. Ключников.* - Инв. № 3886.- Чернобыль, 2003. – 100 с.
9. *Безкоровайный В.П., Горбачева Н. В., Котович В. В.* СЦР в объекте «Укрытие»: некоторые сценарии, механизмы и последствия // «Объект «Укрытие» – 10 лет. Основные результаты научных исследований. - Чернобыль, 1996. – С. 169 – 173.
10. *Гончар В. В., Двоеглазов А. М., Жидков А. В.* Исследование некоторых физических характеристик ЛТСМ объекта «Укрытие» // Там же. - С.173 – 181.

Поступила в редакцию 21.03.06

16 ЕФЕКТИВНІСТЬ НЕЙТРОННОГО КОНТРОЛЮ ТА ЯДЕРНА БЕЗПЕКА ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

Є. Д. Висотський, О. О. Ключников, В. О. Краснов

Наводяться результати експериментальних і модельних досліджень динаміки нейтронної активності скупчень паливовмісних матеріалів (ПВМ). Обґрунтовано концепцію забезпечення ядерної безпеки об'єкта «Укриття» шляхом оперативного запобігання умовам виникнення ланцюгової реакції, що самопідтримується. Показано можливості реалізації засобів раннього виявлення та подавлення підкритичних аномалій, що виникають унаслідок небезпечних змін розмножуючих властивостей локальних зон у скупченнях ПВМ.

16 UKRYTTYA OBJECT'S NEUTRON MONITORING EFFICIENCY AND NUCLEAR SAFETY

J. D. Visotsky, A. A. Kluchnikov, V. A. Krasnov

Results of experimental and model researches of neutron activity dynamics of fuel-containing material clusters (FCM) are demonstrated. Concept of facility's nuclear safety by way of operative prevention of conditions for occurring self-sustained chain reaction (SCR) is substantiated. Capability of realization of means of early detection and suppression of subcritical abnormalities arising due to dangerous changes of multiplying properties of local zones in FCM clusters are described.