

Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко, В. А. Краснов

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова, 36а, Чернобыль, 07270, Украина

ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА ЧАЭС

Приводится определение ядерной безопасности как гарантии отсутствия или исключения возможности возникновения критичности. Показано, что источником ядерной опасности на объекте "Укрытие" является скопление топливосодержащих материалов с критической переувлажненной композицией, гарантия сохранения подкритичности которой в процессе обезвреживания штатными системами объекта не обеспечивается. Предложены первоочередные меры минимизации рисков возникновения самоподдерживающейся цепной реакции в ядерно-опасном скоплении при потере воды в условиях нового безопасного конфайнмента.

Ключевые слова: ядерная безопасность, топливосодержащие материалы, критичность.

Ядерная безопасность

Согласно нормативно правовым актам и научно-техническим документам текущее состояние объекта "Укрытие" квалифицируется как «разрушенный запроектной аварией 4-й блок ЧАЭС, который утратил все функциональные свойства энергоблока и на котором выполнены первоочередные мероприятия по уменьшению последствий аварии, а также продолжаются работы по обеспечению его ядерной и радиационной безопасности» [1].

Создание нового безопасного конфайнмента (НБК) является основным этапом подготовки к превращению объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему. Сооружение НБК должно обеспечить:

защиту персонала, населения и окружающей среды от влияния источников ядерной и радиационной опасности, связанных с существованием объекта "Укрытие";

создание условий для осуществления практической деятельности по превращению объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему, в частности для извлечения остатков ядерного топлива и топливосодержащих материалов (ТСМ), выполнения работ по демонтажу/усилению нестабильных конструкций объекта "Укрытие" и обращения с радиоактивными отходами [2].

При этом решение проблемных задач, связанных с введением в эксплуатацию НБК, не регламентированы действующими нормативными и другими документами. Одной из наиболее важных является задача обеспечения ядерной безопасности на всех этапах преобразования НБК в экологически безопасную систему, так как более 180 т делящихся материалов в виде скоплений с неоднозначной композицией и геометрией находятся во внутренних помещениях 4-го блока ЧАЭС.

Закон Украины «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» дает следующее определение ядерной безопасности: «*ядерна безпека* – дотримання норм, правил, стандартів та умов використання ядерних матеріалів, що забезпечують радіаційну безпеку; *радіаційна безпека* – дотримання допустимих меж радіаційного впливу на персонал, населення та навколишнє природне середовище, встановлених нормами, правилами та стандартами з безпеки» [3]. В соответствии с [4]: «*ядерна безпека* – достижение надлежащих условий эксплуатации, предотвращение аварий или смягчение последствий аварии, благодаря чему обеспечивается защита работников, населения и окружающей среды от чрезмерной радиационной опасности; *ядерная безопасность* – система организационно-технических мероприятий на потенциально ядерно-опасных объектах в целях максимального снижения и/или исключения возможностей по возникновению опасных и вредных воздействий на людей и окружающую среду [5]; *ядерная безопасность* – свойство объектов, содержащих источники ядерной опасности, не допускать их проявления с требуемой вероятностью в течение заданного времени» [5]. Использование вероятностного подхода не применимо к скоплениям ТСМ на объекте "Укрытие", потому что для определения вероятности конечного «нежелательного события», нарушающего ядерную безопасность, необходимо знать вероятности исходного и промежуточных событий, которые не определяются, так как ТСМ на объекте "Укрытие" являются уникальными. При этом учитывая, что фактически отсутствуют эффективные барьеры по предотвращению выхода продуктов деления при потенциально возможной ядерной аварии, ядерная безопасность каждого скопления ТСМ на объекте "Укрытие" определяется только доказанной гарантией отсутствия условий для возникновения самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) или наличием эффективных средств

© Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко, В. А. Краснов, 2017

превентивного подавления параметров критичности ядерно-опасных скоплений (ЯОС, т.е. скоплений ТСМ, вероятность возникновения СЦР в которых не может быть гарантировано исключена).

Последний официальный документ ГСП ЧАЭС [6] с анализом ядерной безопасности объекта "Укрытие", принятый в 2009 г., содержал следующие выводы:

1. «Объект «Укрытие» в настоящее время не может считаться полностью ядерно-безопасным объектом, поскольку абсолютный уровень ядерной безопасности не гарантирован...».
2. Организационно-технические мероприятия при текущей эксплуатации объекта «Укрытие» обеспечивают поддержание систем с ТСМ в подкритическом состоянии.
3. Для обеспечения ядерной безопасности во всех потенциальных состояниях ТСМ при разрешенной деятельности на объекте «Укрытие» необходимо проведение дополнительных исследовательских работ с целью получения полной и достоверной информации по диагностике и прогнозированию состояния ТСМ.

ГНТЦ ЯРБ в своем «Экспертном заключении» согласился с выводом отчета [7] о том, что существующие скопления ТСМ подкритичны, но указал, что «уровень настоящих знаний о ТСМ недостаточен, чтобы обосновано исключить возможность возникновения СЦР».

В то же время в работах ИПБ АЭС НАН Украины (далее - ИПБ АЭС) на основании анализа многолетних наблюдений за динамикой нейтронной активности и градиентами температурных полей было показано наличие в юго-восточном квадранте помещения 305/2 скопления ТСМ с большой массой (~ 20 т) и массовой долей (> 40 %) топлива [8 - 10], а также принята версия СЦР как единственной причины возникновения и гашения мощной нейтронной аномалии, зарегистрированной в июне 1990 г. на периферии этого скопления [11, 12].

Ядерно-опасные скопления

Необходимым и достаточным условием для возникновения СЦР в размножающей системе с низкообогащенным ураном является наличие: критической композиции (массы и массовой доли топлива в ТСМ); внутреннего источника нейтронов; замедлителя в диапазоне оптимального водоуранового отношения.

Расчеты нейтронно-физических параметров силикатной топливной смеси при увлажнении позволили получить консервативные оценки соотношений между реальным выгоранием (11,5 – 12,5 мВт/сут · кг U), массовой долей (45 - 55 %) и массой (15 - 20 т) топлива в скоплениях ТСМ, в пределах которых возможно существование критической композиции и, как следствие, возникновение СЦР в процессе поступления воды [13]. На основании этих оценок, в рамках анализа безопасности объекта "Укрытие", была проведена классификация помещений по степени ядерной опасности находящихся в них скоплений лавообразных ТСМ (ЛТСМ). Все помещения, кроме центрального зала (ЦЗ) и подреакторного помещения 305/2, были признаны ядерно-безопасными, так как массовая доля топлива в обнаруженных скоплениях ТСМ составляла 5 - 10 %. В практически недоступных ЦЗ и помещении 305/2 допускалось «существование композиций, в которых возникновение СЦР принципиально возможно» [14].

Что касается ЦЗ, то потенциальную ядерную опасность здесь могли бы представлять гипотетические критические композиции (уран-графитовый кластер 3×5 м в штатной структуре активной зоны и/или компактное образование из тепловыделяющих сборок со свежим топливом), скрытые под многометровым слоем материалов вертолетной засыпки. Существование таких композиций не подтверждалось результатами визуальных наблюдений, а наличие в материалах засыпки 40 т карбида бора и соединений гадолиния, периодически распыляемых над развалом, могут быть гарантией ядерной безопасности [14]. За 25 лет на периферии ЦЗ нейтронной активности не наблюдалось, доступ под завалы материалов засыпки отсутствует.

Помещение 305/2 в юго-восточной части является местом образования и исхода потоков ЛТСМ. Эта часть помещения оказалась практически недоступной из-за отсутствия технологии «горячего» бурения. При этом здесь было отмечено следующее: разошлись результаты теплотемпературных (~ 75 т) и концентрационных (~ 35 т) измерений количества топлива; зарегистрированы холодный критический инцидент 1990 г. и нейтронная аномалия 2000 г.; с 1990 г. постоянно наблюдаются высокий уровень нейтронной активности и температуры; фиксируется постоянное присутствие воды [15].

Результаты расчетно-экспериментальных исследований, проведенные ИПБ АЭС в 2006 – 2016 гг. [16, 17], дают основания допустить, что в связи с надвижкой НБК и изменением температурно-влажностного режима объекта "Укрытие", реальная ядерная опасность комплекса НБК + объект

"Укрытие" определяется фактом существования в юго-восточной части помещения 305/2 ЯОС, скрытого под слоем «свежего» бетона в зоне проплавления опорной плиты шахты реактора.

Скопление образовалось на заключительной стадии аварии в результате длительного высоко-температурного процесса взаимодействия кориума с силикатными материалами (бетоном, материалами засыпки межкомпенсаторного и монтажного зазоров) и растворения фрагментов технологических каналов в силикатном расплаве [18, 19].

Скопления с критической композицией ТСМ, содержащей до 20 т урана, и фактически постоянным внутренним источником нейтронов спонтанного деления и (α , n)-реакции на легких ядрах примеси рассматривается как гетерогенная водо-урановая система, в объеме однородной топливной среды которой равномерно распределены делящиеся материалы, примеси и внутренние источники нейтронов [20, 21]. Гетерогенная структура скопления определяется наличием широкого спектра макропор, доступных для воды через бесконечный кластер микротрещин и поровых каналов. Для таких систем с низкообогащенным топливом характерным является наличие надкритичности в диапазоне оптимального водо-уранового отношения, т.е. два значения критичности и подкритичность при недостатке или избытке воды [16].

ЯОС находится постоянно в воде, наиболее вероятно за вторым значением критичности, которое было достигнуто при холодном критическом инциденте июня 1990 г. СЦР (повторная критичность) возникла в процессе поступления воды в объемы остывающей ($< 100\text{ }^\circ\text{C}$) пористой размножающей среды и удерживалась в течение 34 ч в режиме осцилляций. Гашение СЦР произошло в результате переувлажнения [16]. Текущая подкритичность ЯОС определилась доступной для воды пористостью среды. Стабильность подкритичности, которая может находиться за пределами аварийных значений ($K_{эф} > 0,98$), обеспечивается поступлениями в объект "Укрытие" атмосферной, конденсационной и технической воды. Стоки подогретой воды периодически наблюдаются из скважин, забои которых находятся в зоне проплавления бетона опорной плиты [17].

Эффекты возвратной критичности

Расчеты зависимости нейтронно-физических характеристик при вариации массовых и геометрических параметров материальной модели ЯОС проводились с помощью MNCP-4A – программного комплекса решения задач переноса нейтронов методом Монте-Карло в трехмерных материальных системах. Материальная модель ЯОС была представлена критической сборкой с геометрией, вписывающейся в зону проплавления опорной плиты. При этом принималось, что при повторной критичности 1990 г. механизмом гашения СЦР могло быть только переувлажнение размножающей среды.

Основной целью расчетов являлось уточнение массовых и геометрических параметров модели ЯОС, обеспечивающих наличие двух значений критичности в процессе поступления воды в размножающую среду. При оценке количества топлива в критической сборке были использованы результаты сведения материально-энергетического баланса доменной версии сценария аварийных процессов [17].

Химический состав черных ЛТСМ и ТСМ ЯОС

Химический состав	Массовая доля, %		Плотность, г/см ³
	ЛТСМ	ТСМ	
U ₃ O ₈ (U)	5,50 (4,7)	62,5 (53)	8,4
SiO ₂	62,00	22,7	2,50
CaO	7,50	2,2	3,80
TiO ₂	0,18	0,06	3,80
ZrO ₂	4,20	6,4	5,70
Na ₂ O	5,50	2,0	3,50
BaO	0,13	0,04	6,00
Al ₂ O ₃	8,80	2,3	3,97
MnO	0,40	0,13	5,87
Fe ₂ O ₃	0,97	0,13	5,87
FeO	0,87	0,12	5,87
MgO	3,90	1,2	3,97
CrO	0,23	0,07	5,21
NiO	0,17	0,06	5,87
Парциальная плотность ТСМ			6,3

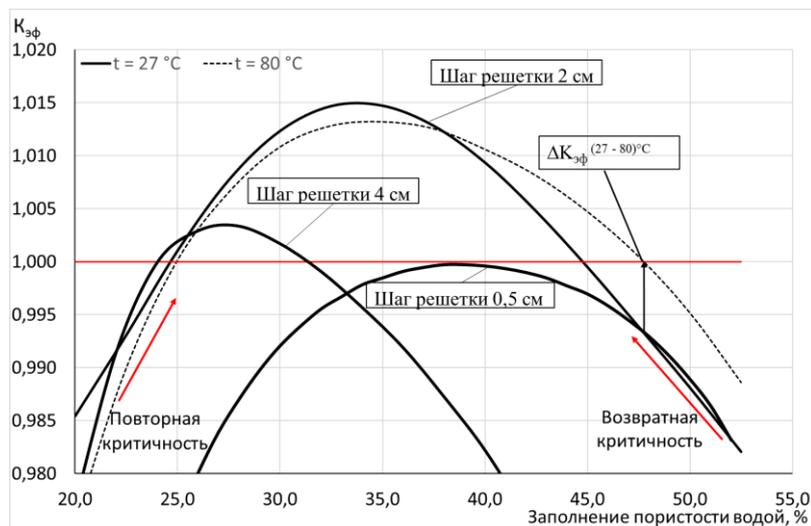
За основу смеси, использованной в модели, был принят химический состав черных ЛТСМ, образовавших большой горизонтальный поток из района скопления (см. таблицу). При этом предполагалось, что в смеси доля топлива образована микровключениями, а доступная для воды пористость составляет не менее 50 % объема сборки.

Материальная модель была представлена трехслойной композицией, размещенной в бетоне опорной плиты между отметками 8.000 и 9.700 и прикрытой слоем «свежего» бетона до отметки 10.500. Верхний слой (между отметками 9.100 и 9.700) – черные ЛТСМ, сформировавшие большой горизонтальный поток. Нижний слой (между отметками 8.000 и 8.200) – металл, промежуточный слой – ТСМ с массовой долей топлива от 50 % и геометрией, вписывающейся в границы реальной зоны проплавления подреакторной плиты (между отметками 8.200 и 9.100).

Гетерогенная структура размножающей среды моделировалась в виде регулярной пространственной решетки с ячейками кубической формы. В этой решетке ячейки в шахматном порядке были заполнены гомогенной смесью силикатного раствора топлива. Объемная доля воды в пустых ячейках одновременно и равномерно варьировалась от нуля до полного заполнения всей пористости.

Для версий материальной модели были выполнены расчеты величины $K_{эф}$ при вариации: геометрии сборки, массовой доли топлива, объемного содержания воды, шага решетки, температуры размножающей среды [22].

На рисунке приведены результаты расчета $K_{эф}$ для версии критической сборки в геометрии плоского цилиндра ($R = 2,0$ м, $h = 0,9$ м) с объемом пористости, доступной для воды, до 52 % и массовой долей топлива в ТСМ (52 %) при обогащении 1,15 % ^{235}U .



Зависимость $K_{эф}$ в модели от уровня объемного содержания воды, шага (0,5; 2,0; 4,0 см) моделирующей решетки и температуры размножающей среды (27 °C, 80 °C).

Температурный коэффициент среды (α) оценивался по модельной зависимости и составил $0,5 \div 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (см. рисунок). Таким образом, если повторная критичность возникла при температуре остывающего $\leq 100\text{ } ^\circ\text{C}$ скопления, то при «возвратной» критичности увеличение текущего запаса реактивности (при текущей температуре среды ЯОС $50\text{ } ^\circ\text{C}$) составит $5,0 \cdot 10^{-3}$. Зависимость $K_{эф}$ от гетерогенности среды модели показывает, что два значения критичности при пористости до 50 % объема могут реализоваться в границах диапазона шага решетки от 0,5 до 5 см. Выход в критичность, в зависимости от текущего состояния структуры среды, может происходить как при уменьшении, так и при увеличении гетерогенности.

В условиях объекта «Укрытие», при сохранении текущего состояния с доступом воды в зону локализации ЯОС, эффектами, приводящими к «возвратной» критичности, могут быть деградация структуры при изменении спектра пористости и/или рост температуры размножающей среды за счет изменений условий теплосема. При прекращении поступления воды в условиях НБК+ объект «Укрытие», вероятность «возвратной» критичности будет определяться естественным механизмом обезвоживания переувлажненной среды критической композиции.

Консервативные модельные оценки характеристик СЦР на запаздывающих нейтронах при «возвратной» критичности показали, что мощность нейтронной вспышки (плотность потока нейтро-

нов, ППН $>10^{12}$ н/см²·с) будет определяться запасом реактивности, скоростью потери воды, а также временем удержания до разрушения фактически запечатанной в бетон размножающей системы [23].

Обеспечение ядерной безопасности

В соответствии с определением ядерной безопасности, гарантированное исключение вероятности возникновения СЦР в условиях НБК+ объект "Укрытие", может быть обеспечено наличием эффективных средств мониторинга (нейтронной активности и температуры) и средств оперативного подавления параметров критичности ЯОС. В настоящее время штатные системы (СКЯБ, СПРГ и СПП) не позволяют обеспечить ядерную безопасность объекта по следующим причинам:

при обсадке скважин в опорной плите, выходящих в юго-восточную часть помещения 305/2, из-за непроходимости, в зоне локализации ЯОС были утрачены основные информационные точки мониторинга;

отсутствует функция мониторинга температурного и водного режимов ЯОС;

подача растворов системами подавления, осуществляемая с верхних отметок в шахту реактора, неэффективна из-за фильтрации раствора в слоях бетона и ЛТСМ, прикрывающих зону локализации ЯОС (концентрация гадолиния падает более чем на 3 порядка) [17].

Поэтому, когда невозможно гарантировать ядерную безопасность и существуют источники ядерной опасности, вероятность проявления которых неопределенна, в обязательном порядке следует предпринимать меры по минимизации риска возникновения СЦР. На этапе ввода в эксплуатацию комплекса НБК+ объект "Укрытие" такими мерами, приемлемыми с точки зрения эффективности и экономической целесообразности, являются:

оценка эффективности штатных систем при выполнении функций обнаружения и подавления аварийных значений подкритичности ЯОС, а также разработка мер по повышению эффективности этих систем;

создание экспертной системы локального мониторинга нейтронной активности и температуры, а также средств подачи воды или водных растворов нейтронных поглотителей непосредственно на доступную периферию зоны локализации ЯОС;

разработка процедур экспертной идентификации опасных подкритических аномалий нейтронной активности и температуры, при обнаружении которых в процессе естественного обезвоживания временной мерой будет сохранение и поддержание водного режима путем оперативной принудительной подачи воды в зону локализации;

рассмотрение возможности реализации процедуры принудительного управляемого обезвоживания, которая должна обеспечивать поэтапное сокращение массовых параметров критической композиции при условии обязательного контроля нейтронной активности;

проведение расчетно-экспериментальных исследований с целью снижения неопределенностей связанных с риском возвратной критичности и в том числе: корректировка материальной модели ЯОС на основании доменной версии сценария образования критической композиции на последней стадии аварии; оценки характеристик и последствий СЦР при возвратной критичности для откорректированной материальной модели ЯОС; оценка прочностных характеристик и времени удержания системы размножающей системы до разрушения; анализ возможных механизмов гашения СЦР - деградация структуры среды, радиолитиз воды и обезвоживание; моделирование тепло-гидравлических процессов при уменьшении массовой доли воды и выходу системы в надкритичность.

Выводы

1. Если допускается версия, что при повторной критичности 1990 г. механизмом гашения СЦР явилось переувлажнение размножающей среды ЯОС, то в непредсказуемом процессе обезвоживания существует вероятность возвратной критичности, при которой СЦР будет иметь положительные температурные коэффициенты реактивности, ускоряющие разгон.

2. Для обеспечения ядерной безопасности в процессе обезвоживания ЯОС на этапе ввода комплекса НБК+ объект "Укрытие" в эксплуатацию наименее затратной временной мерой будет реализация эффективных средств слежения, обнаружения и подавления параметров критичности путем восстановления водного режима.

3. До этапа извлечения делящихся материалов в любом случае будет необходимо решить проблему доступа непосредственно к среде скопления, находящимся в помещении 305/2 и ЦЗ, так как эффективной и гарантированной мерой обеспечения ядерной безопасности может быть только введение в зону локализации ЯОС твердых нейтронных поглотителей!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Техническая оценка применения для объекта «Укрытия» перечня нормативно-правовых актов и нормативно-технических документов по ядерной и радиационной безопасности.* Реферат № 023611-КНК, ГКЯРУ, 2001, 13 с.
2. *Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему / Закон України. № 309-XIV від 11.12.1998 р // Відом. Верховної Ради України. – Офіц. вид. від 29.01.1999 р., № 4, ст. 33.*
3. *Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку / Закон України № 39/95-ВР від 08.02.1995 р. // Відом. Верховної Ради України. – Офіц. вид. від 21.03.1995 р., № 12, ст. 81.*
4. *Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты.* - Вена: МАГАТЭ, 2007. - 295 с.
5. *Гражданская защита. Понятийно-терминологический словарь; под общ. ред. Ю. Л. Воробьева.* - М.: Флайст. Информ.-изд. центр «Геополитика», 2001.
6. *Обеспечение ядерной безопасности объекта «Укрытие» // Отчет ПО ЧАЭС, арх. № 216 - ОУ. – Славутич, 2009.*
7. *Экспертное заключение на отчет «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации.* - К.: ГНТЦ ЯРБ, 1996. - 40 с. (Объект «Укрытие», арх. № 1188 от 03.02.97.)
8. *Бабенко В.А., Высотский Е.Д., Ключников А.А. и др. Модель распределения плотности потока нейтронов в объеме топливосодержащих материалов помещения 305/2 объекта «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2005. – Вып. 2. - С. 55 - 60.*
9. *Высотский Е.Д., Ключников А.А., Краснов В.А. Локализация ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. - 2007. – Вып. 7. – С. 66 — 75.*
10. *Высотский Е.Д., Ключников А.А., Щербин В.Н., Шостак В.Б. Нейтронно-физические характеристики ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2009. - Вып. 12. - С. 93 - 102.*
11. *Заключение экспертной комиссии о причинах аномального события помещения 304/3 объекта «Укрытие» в июле 1990 г. / ИБРАЭ РАН. – М., 1992. - 67 с.*
12. *Фролов В. В. Аномальный инцидент 27 - 30 июня 1990 г. в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. – 1996. - Т. 80, вып. 3. - С. 216 - 219.*
13. *Техническое обоснование ядерной безопасности объекта "Укрытие" (ТОЯБ) / ИАЭ им. И. В. Курчатова. – Москва, 1990. – 130 с. – (Архив МНТЦ «Укрытие», № 1605).*
14. *Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации: (Заключит. отчет о НИР) / МНТЦ «Укрытие» НАН Украины; отв. исполн. А. А. Боровой – Арх. № 3836. - Чернобыль, 2001. – 337 с.*
15. *Модельные и экспериментальные исследования эффективности нейтронного контроля топливо-содержащих материалов в зонах критмассового риска: (Заключит. отчет о НИР) / ИПБ АЭС НАН Украины. – Инв. № 3950. - Чернобыль, 2006.*
16. *Исследование ядерно-физических параметров и разработка методов и способов контроля и управления подкритичностью в зонах критмассового риска: (Заключ. отчет о НИР) / ИПБ АЭС НАН Украины. - Инв. № 3998. - Чернобыль, 2010. - 127 с.*
17. *Исследование нейтронно-физических и физико-химических характеристик ядерно-опасных скоплений и разработка способов подавления их параметров критичности: (Заключ. отчет о НИР) / ИПБ АЭС НАН Украины. - Инв. № 4021. - Чернобыль, 2015. - 127 с.*
18. *Высотский Е. Д., Михайлов А. В. Концептуальная модель «дóмненной» версии образования ядерно-опасных скоплений на 4-м блоке ЧАЭС // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2013. - Вып. 21. – С. 99 - 106.*
19. *Дорошенко А. А., Михайлов А. В. О результатах восстановления динамики температуры ядерного топлива 4-го блока ЧАЭС на активной стадии аварии // Ядерна фізика та енергетика. – 2015. - Т. 16, № 4. – С. 352 - 361.*
20. *Ядерно-опасные скопления топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» / Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, А. В. Михайлов и др. // Висновки і рекомендації. Матеріали Міжнар. научн.-практ. конф. «Двадцять п'ять років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього» (Київ, 20 - 21 квітня 2011 р.). – К.: КІМ, 2011. - Ч. 2. – С. 33 - 37.*
21. *Высотский Е.Д., Годун Р.Л. Нейтронная активность скоплений лавообразных топливосодержащих материалов на 4-м блоке ЧАЭС // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. - 2015. - Вып. 25. - С. 108 – 114.*

22. Шостак В. Б., Щербин В. Н., Олейник Е. Е. Определение величин параметров модели, описывающей ядерноопасное скопление топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. – 2014. – Вып. 22. – С. 98 - 110.
23. Бабенко В. О., Павлович В. М. Изучение возможности возникновения, развития и свойств самоподдерживающейся цепной ядерной реакции в топливосодержащих массах объекта «Укрытие» // Щоріч. наук. конф. Ін-ту ядерних дослідж. НАН України, 1 - 5 лютого 2016 р., Київ, ІЯД НАН України.

Є. Д. Висотський, Р. Л. Годун, А. О. Дорошенко, В. О. Краснов

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

ЯДЕРНА БЕЗПЕКА ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ ВАЖКОЇ АВАРІЇ НА ЧАЕС

Наводиться визначення ядерної безпеки як гарантії відсутності або виключення можливості виникнення критичності. Показано, що джерелом ядерної небезпеки на об'єкті "Укриття" є скупчення паливовмісних матеріалів із можливо критичною перезволоженою композицією, гарантія збереження підкритичності якої у процесі зневоднення штатними системами об'єкта не забезпечується. Запропоновано першочергові заходи мінімізації ризиків виникнення самопідтримуючої ланцюгової реакції в ядерно-небезпечному скупченні при втраті води в умовах нового безпечного конфайнмента.

Ключові слова: ядерна безпека, паливовмісні матеріали, критичність.

Ye. D. Vysotskij, R. L. Godun, A. A. Doroshenko, V. A. Krasnov

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine

NUCLEAR SAFETY DURING THE ELIMINATION OF THE SEVERE CONSEQUENCES OF THE CHERNOBYL ACCIDENT

We present the definition of nuclear security as a guarantee of the absence or exclusion of the possibility of criticality. It is shown that the source of nuclear danger in the object "Ukrytiya" (UO) is the cluster of fuel-containing materials with the opportunity of critically overmoistened composition. The preservation guarantee of subcriticality during dehydration by UO systems is not ensured. We propose priority measures to minimize the risks of self-sustained chain reaction in the dangerous nuclear cluster during the loss of water in the conditions of the New Safe Confinement.

Keywords: nuclear safety, fuel-containing materials, criticality.

REFERENCES

1. *Technical* evaluation of use the list of regulatory acts and technological normative documents on nuclear and radiation safety for the "Ukrytie" object. Essay No. 023611-KNK, GKYaRU, 2001, 13 p. (Rus)
2. *On general* principles of further operation and decommissioning the Chornobyl NPP and transformation of the removed Unit4 of this NPP into the ecologically safe system / Law of Ukraine. No 309-XIV dated 11.12.1998. // Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy. – 1999. - № 4. - P. 33. (Ukr)
3. *On Nuclear* Energy and Radiation Safety / Law of Ukraine № 39/95-VR dated 08.02.1995 // Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy. - 1995. - № 12. – P. 81. (Ukr)
4. *IAEA Safety* Glossary. Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection. - Vena: IAEA, 2007. - 295 p. (Rus)
5. *Civil* protection. Terminological dictionary; ed. Yu. L. Vorob'eva. - Moskva: Flajst. Inform.-izd. centr «Geopolitika», 2001. (Rus)
6. *Nuclear* safety ensure of the «Ukrytie» object // Report ChNPP, arh. No 216 - OU. - Slavutich, 2009. (Rus)
7. *Expert* opinion for report «Analysis for technical safety of «Ukrytie» object and predictive assessments of the situation. Kiev: SSTC NRS, 1996. - 40 p. - (OU arh. No. 1188 dated 03.02.97). (Rus)
8. *Babenko V.A., Vysotskij E.D., Klyuchnikov A.A. et al.* Model of neutron flux density distribution in the volume of fuel-containing materials in premise 305/2 of «Ukrytie» object // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). - 2005. - Iss. 2. - P. 55 - 60. (Rus)
9. *Vysotskij E.D., Klyuchnikov A.A., Krasnov V.A.* Localization of nuclear-hazardous fuel-containing materials // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). - 2007. - Iss. 7. - P. 66 - 75. (Rus)
10. *Vysotskij E.D., Klyuchnikov A.A., Scherbin V.N., Shostak V.B.* Neutron-physical characteristics of nuclear-hazardous clusters in fuel-containing materials // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). - 2009. - Iss. 12. - P. 93 - 102. (Rus)

11. *Opinion of the expert commission on the causes of the anomalous event in premise 304/3 of «Ukrytie» object in July 1990 / NSI RAS. - Moskva, 1992. - 67 p. (Rus)*
12. *Frolov V.V. Anomalous incident 27 – 30, June 1990 in the «Ukrytie» object at Chernobyl NPP // Atomnaya energiya. - 1996. - T. 80. - Iss. 3. - P. 216 - 219. (Rus)*
13. *Technical justification for nuclear safety of «Ukrytie» object (TJNS) / Kurchatov Institute of Atomic Energy. - Moskva, 1990. - 130 p. - (Arh. ISTC «Ukrytie», No. 1605). (Rus)*
14. *Analysis for technical safety of «Ukrytie» object and predictive assessments of the situation: Research Report (final) / ISTC «Ukrytie» NAS of Ukraine; respons. executor A. A. Borovoj - Arh. No. 3836. - Chernobyl, 2001. - 337 p. (Rus)*
15. *Simulation study and pilot researches of neutron control efficiency of the fuel-containing materials at areas with critical mass risk // Research Report (final) / ISP NPP NAS of Ukraine. - Inv. № 3950. – Chernobyl, 2006. (Rus)*
16. *Study of nuclear physical parameters and development of approaches and methods of control and management the subcriticality at areas with critical mass risk // Research Report (final) / ISP NPP NAS of Ukraine. - Inv. No. 3998. - Chernobyl, 2010. - 127 p. (Rus)*
17. *Study of neutron-physical and physicochemical parameters of nuclear dangerous accumulations and development of techniques of suppression of their criticality parameters // Research Report (final) / ISP NPP NAS of Ukraine. - Inv. No. 4021. - Chernobyl, 2015. - 127 p. (Rus)*
18. *Vysotskij E.D., Mihajlov A.V. Conceptual model of «blast-furnace» version of the nuclear dangerous accumulations' generation in the Unit 4 of ChNPP // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly). - 2013. - Iss. 21. - P. 99 - 106. (Rus)*
19. *Doroshenko A.A., Mihajlov A.V. On the results of restoring the dynamics of the temperature of nuclear fuel of the Unit 4 ChNPP in the active phase of the accident // Yaderna fizika ta energetika. – 2015. - Vol. 16, № 4. - P. 352 - 361. (Rus)*
20. *Nuclear dangerous accumulations of fuel-containing materials in the «Ukrytie» object / E. D. Vysotskij, A. A. Klyuchnikov, A. V. Mihajlov et al. // Resumes and recommendations. Materials of International theoretical and practical conference «Twenty five years of Chornobyl catastrophe. Safety of future» (Kyiv, 20 - 21 April, 2011). - Kyiv: KIM, 2011. - Part 2. - P. 33 - 37. (Rus)*
21. *Vysotskij E.D., Godun R.L. Neutron activity of lava-like accumulations of fuel-containing materials in the Unit 4 ChNPP // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly). - 2015. - Iss. 25. - P. 108 - 114. (Rus)*
22. *Shostak V.B., Scherbin V.N., Olejnik Eu.Eu. Determination of values parameters of the model describing the nuclear-dangerous accumulation of fuel-containing materials in the «Ukrytie» object // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly). - 2014. - Iss. 22. - P. 98 - 110. (Rus)*
23. *Babenko V.O., Pavlovich V.M. Study the possibility of the emergence, development and properties of a self-sustaining chain reaction in fuel-containing mass of the «Ukrytyta» object // Annual scientific conference of Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine, 1 - 5 Feb. 2016, Kyiv, INR NAS of Ukraine. (Ukr)*

Надійшла 20.02.2017
Received 20.02.2017