

УДК 621.039.76

ЛОКАЛИЗАЦІЯ ЯДЕРНО-ОПАСНИХ СКОПЛЕНІЙ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРІАЛІВ**Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, В. А. Краснов***Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль*

Представлены результаты анализа экспериментальных данных и модельных расчетов, позволивших выявить и локализовать в подреакторной плите две зоны проплавления, в которых находятся скопления топливосодержащих материалов с концентрацией топлива более 40 % и наблюдается постоянное присутствие воды. Предварительные оценки массовых и геометрических параметров скоплений дают основания считать их зонами критмассового риска.

Введение

Основная масса данных по измерениям температурных и нейтронных полей, создаваемых скоплениями топливосодержащих материалов (ТСМ), была получена в период 1988 - 1990 гг. В это время в шахту реактора и подреакторные помещения было пробурено несколько десятков скважин. Фактически в каждой скважине по глубине проходки проводились измерения распределений температуры, плотности потока нейтронов (ППН) и мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения. Эти данные, а также данные видеонаблюдений и пробоотборов позволили установить расположение и оценить массовые и геометрические параметры скоплений ТСМ, находящихся на периферии подапаратного помещения 305/2. Юго-восточный квадрант помещения 305/2 - место образования и истока лавовых потоков, оценочные величины массы топлива в которых составляли от 50 до 100 т урана [1], оказался наименее исследованным. Сюда не смогли пройти по причине отсутствия технологии выемки высокоактивных кернов скважины, пробуренные в бетоне подреакторной плиты (ПП). Здесь же были зарегистрированы критический инцидент 1990 г. и нейтронные аномалии 1996 и 2000 гг. [2]. С 1990 г. в этой части помещения 305/2 наблюдается нестабильность нейтронной активности и на ПП фиксируется постоянное присутствие воды. И, наконец, результаты расчетного моделирования нейтронных полей, основанного на представлении скоплений ТСМ в виде черной керамики с процентным содержанием урана 5 - 10 %, абсолютно разошлись с данными натуральных измерений. Это послужило основанием для полного пересмотра существующего представления о возможном размещении и состоянии топлива в подапаратном помещении 305/2.

Ниже представлены результаты анализа конфигурации буровых проходок, пространственных распределений и динамики изменения параметров тепловых и ядерно-физических процессов, позволивших локализовать в массиве подреакторной плиты два скопления ТСМ с концентрацией топлива более 40 %. Такие скопления идентифицируются как зоны критмассового риска, так как вероятность возникновения в них самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) менее 10^{-5} событий в год не может быть гарантирована.

В процессе исследований систематизированы, верифицированы и использованы все данные по температурным и нейтронным измерениям, полученные в период 1988 - 2006 гг. Динамика изменения тепловых и нейтронных параметров определялась по данным системы «Финиш» [5].

Конфигурация буровых проходок

На рис. 1 приведена конфигурация проходок в ПП, служащей фундаментом колодца шахты реактора и нижним перекрытием помещения 305/2. Плита фактически представляет собой железобетонный монолит толщиной 1,7 м, расположенный между отметками +8.000 - +10.000 в строительных осях 45 - 49, И - Н. На плите размещены бетонный крест фундамента опоры реактора (схема «С») и две полукруглые бетонные тумбы опор нижнего бака биологической защиты (схема «Л»).

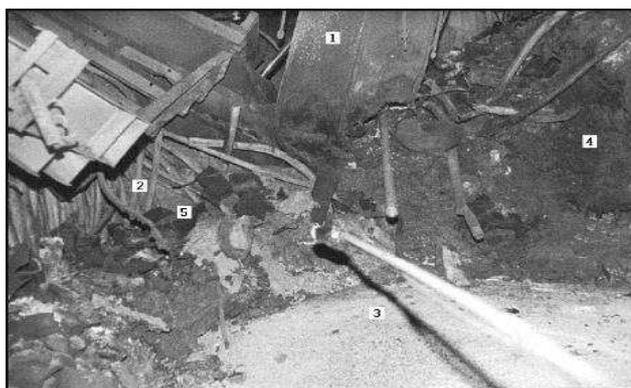


Рис. 2. Юго-восточный квадрант помещения 305/2. Район расположения Зоны 1.



Рис. 3. Юго-восточный квадрант помещения 305/2. Район расположения Зоны 2.

Температура в подреакторной плите

Изначально направление поисков местонахождения топлива, оставшегося внутри блока, основывалось на результатах измерений температурных распределений и тепловых потоков в доступных помещениях, примыкающих к колодцу шахты реактора. Источником тепла могло быть только остаточное тепловыделение (ОТВ) продуктов деления ядерного топлива.

Основная масса данных по измерениям температурных распределений в скважинах, пробуренных в массиве ПП, была собрана и систематизирована на основании протоколов измерений. Измеренные значения верифицированы и пересчитаны к единой дате - ноябрю 1988 г., по характеристикам реального спада температуры в «горячих» точках ПП.

На рис. 4 и 5 приведены распределения температур в проходках западных скважин и южных скважин в массиве ПП. Проекция расположения Зон 1 и 2 на строительные оси выделена на рисунках штриховкой, в метрах указана глубина проходки. Наличие больших градиентов в распределениях температур наблюдается только в зонах проплавления. Градиенты температур в скважинах 3.9.К и 3.9.Е возрастают в Зоне 1 с 5 до 50 °С/м. Ближе всего к эпицентру очага тепловыделения находится забой скважины 3.9.Е. Температура в скважине 3.9.Ф показывает распространение очага тепловыделения вдоль оси 47 вплоть до пролома в южной стене помещения 305/2. Западные границы Зоны 1 прослеживаются на рис. 6 по температурному «пузырю» между осями И - К.

Что касается Зоны 2, то здесь мы имеем распределения температур только в двух южных скважинах Ю.9.А и Ю.9.Б и одной западной 3.9.Н. Хотя скважины Ю.9.А и 3.9.Н находятся на достаточном удалении от зоны проплавления, температурные «пузыри» на распределении определенно указывают на наличие источника тепловыделения в Зоне 2 (оси К - Л, ряд 45 - 46).

Градиент температур, возрастающий с 5 до 30 °С/м в скважине Ю.9.В подтверждает наличие источника тепловыделений в Зоне 2.

Для наглядной оценки температурного поля в подреакторной плите была построена картограмма изотерм (рис. 6). Из-за ограниченного количества точек измерения часть точек для картограммы была получена путем экстраполяции. При экстраполяции использовались значения температурных градиентов, полученных при измерениях в западных скважинах на участках ПП со схожими условиями теплосъема. Эпицентры очагов тепловыделений располагаются в тех частях ПП, которые не прикрываются четвертью схемы «ОР». Эпицентр Зоны 1 (И+3; 46+3) располагается в открытой части юго-восточного квадранта помещения 305/2, напротив южных откатных ворот. Эпицентр Зоны 2 (К+3; 46-1,5) попадает в зазор

между стеной тумбы опоры бака биологической защиты и схемой «ОР» и уходит под тумбу, выплавляя ее у основания (см. рис. 3).

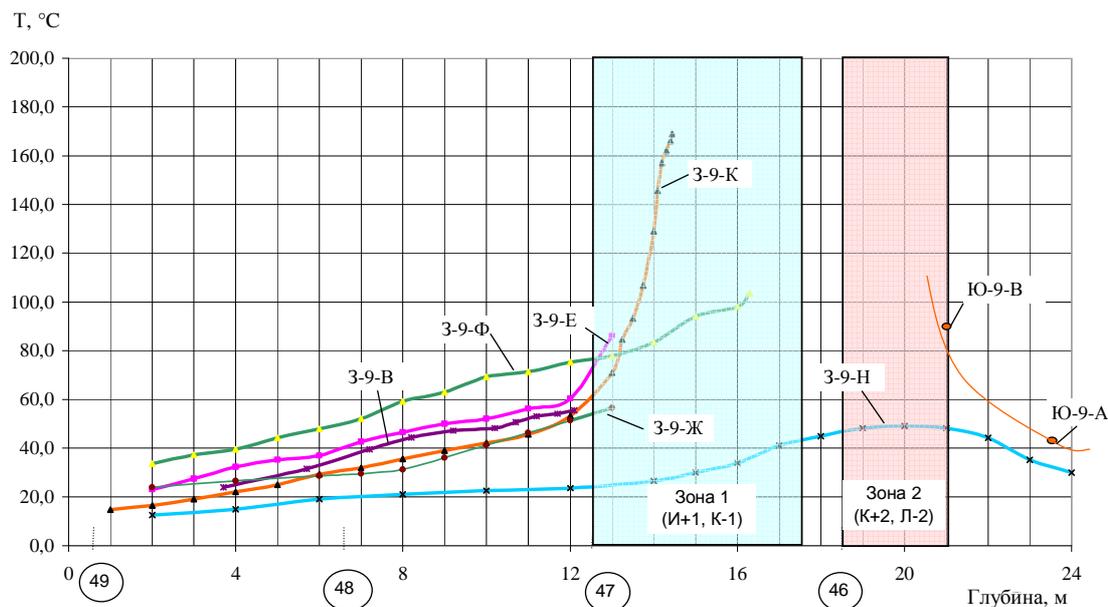


Рис. 4. Распределение температур в западных скважинах помещения 305/2 в ноябре 1988 г.

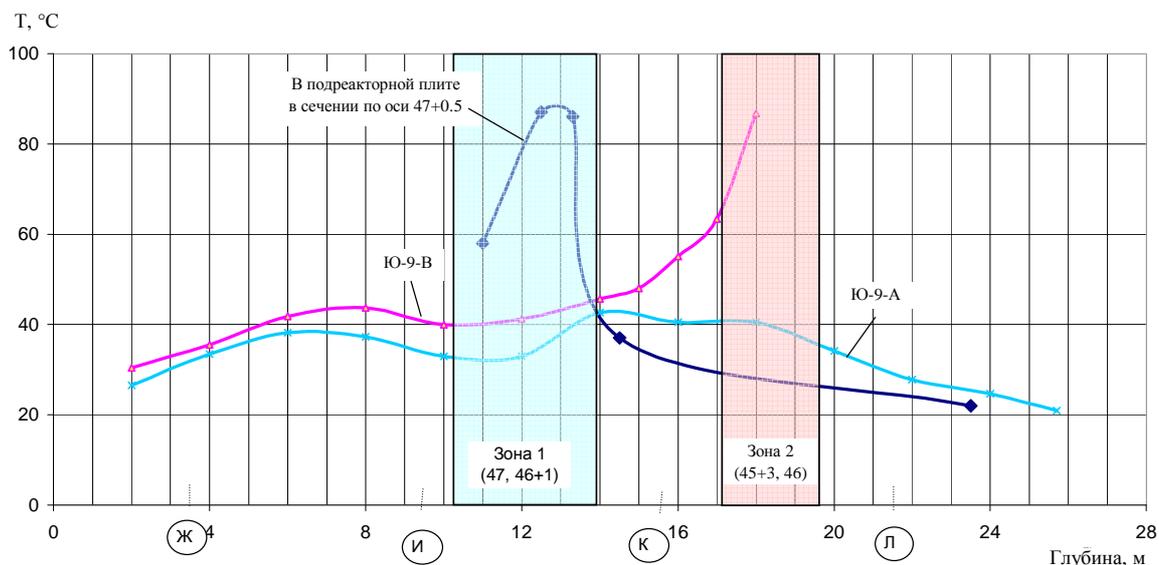


Рис. 5. Распределение температур в южных скважинах Ю.9.А, Ю.9.В и в подреакторной плите в ноябре 1988 г.

Динамика спада температуры в «горячих» зонах и на периферии ПП контролируется системой «Финиш» с 1988 г. На рис. 7 приведена схема расположения точек установки стационарных датчиков температуры в скважинах 3.9.В, 3.9.К и Ю.9.В, а также датчиков температуры на нижней поверхности ПП (потолок парораспределительного коридора (ПРК)) вдоль ее южного края. Временные реализации динамики спада температур (рис. 8) в «горячей» точке Зоны 1 (канал 22) и на ее периферии (каналы 6 и 27) показывают, что разница температур в Зоне 1 и на ее периферии, которая составляла в период 1988 - 1989 гг. более 100 °С, упала к 1991 г. до 30 °С и в настоящее время, когда прошло более 15 лет, составляет порядка 20 °С, т.е. здесь существует мощный источник тепловыделения.

В Зоне 2 (канал 21) относительно ее периферии (канал 25) разница температур в 1988 г. составляла более 50 °С, к 1991 г. снизилась до 10 °С, в настоящее время составляет порядка 5 °С (рис. 9). Незначительное постепенное отставание пиков сезонных колебаний температуры на периферии ПП от температуры в зонах проплавления означает, что общий

температурный режим плиты определяют сезонные колебания, а температура в Зоне 1 и 2 поддерживается ОТВ. Пики и характер сезонных колебаний временных реализаций совпадают. Температура на периферии фактически с 1996 г. не имеет тренда на понижение. Отсюда следует, что источники тепловыделения не влияют на температуру на периферии ПП и ее изменение зависит только от общего температурного режима во внутренних помещениях объекта «Укрытие».

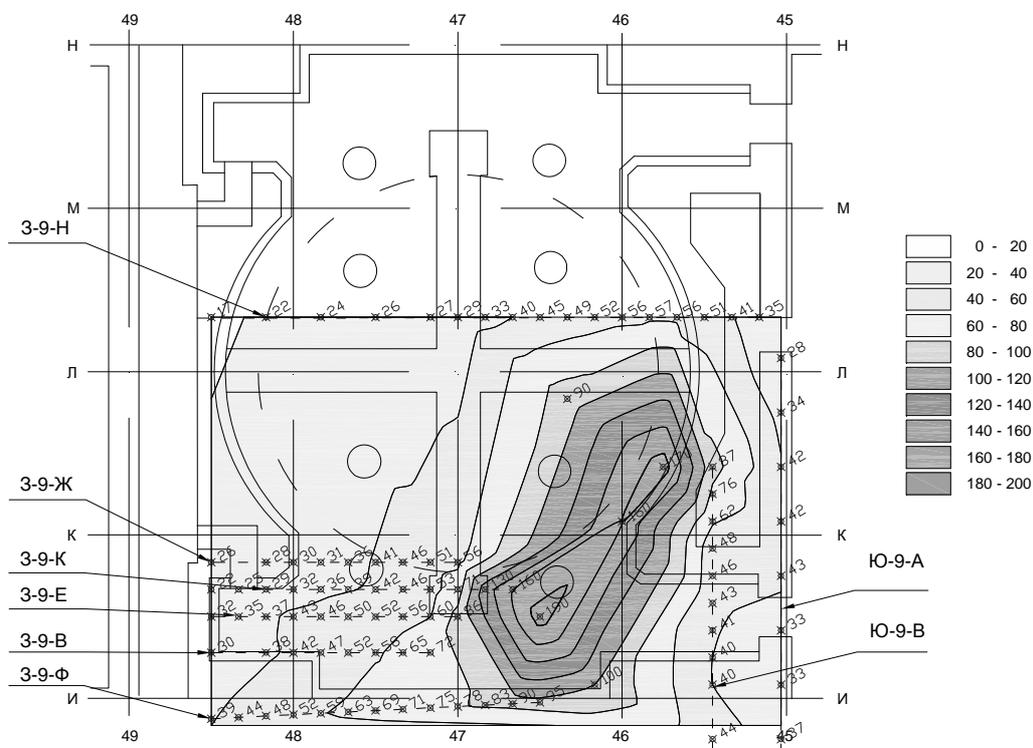


Рис. 6. Распределение температуры в подреакторной плите в ноябре 1988 г. (отм. 9.1 м)

На временных реализациях температурных каналов 22 и 6 (см. рис. 8), датчики которых установлены в обсадной трубе скважины 3.9.К, прослеживается характерная «гребенка» кратковременных подъемов и спадов температуры. Из скважины регулярно наблюдается стоки воды, интенсивность которых связана с режимом ее поступления на объект от атмосферных осадков, конденсата и работы штатной системы пылеподавления (СПП). В то же время на реализациях, полученных с температурных каналов 27 и 25, датчики которых располагаются в заведомо сухих точках - потолок ПРК, эта гребенка отсутствует. Причиной появления кратковременных выбросов температуры является вода. Холодная вода, попадая в Зону 1, нагревается и вытекает по обсадной трубе. Датчики каналов 6, 7 и 22, установленные в этой трубе, реагируют на температуру потока (рис. 10).

Температура в «горячей» точке (канал 22) при поступлении воды незначительно понижается, а на периферии существенно повышается. Перепады температур зависят от интенсивности и длительности истока воды из скважины 3.9.К. Механизм появления подогретой воды в скважине 3.9.К может быть только один. В объеме зоны проплавления постоянно присутствует вода, которая разогрета ОТВ. Постоянный уровень воды находится ниже высотной отметки, на которой пробурена скважина 3.9.К и стока из нее нет. При поступлении холодной воды в объемы Зоны 1 уровень ее повышается, а температура незначительно падает. Если уровень воды в зоне достигает высотной отметки, на которой пробурена скважина, то образуется сток подогретой воды, на которую без задержки реагируют датчики периферийных температурных каналов 6 и 7, установленные в скважине (см. рис. 10).

Источником тепловыделения поддерживающего температуру в ПП в Зонах 1 и 2 может быть только значительные скопления ТСМ с большой концентрацией урана.

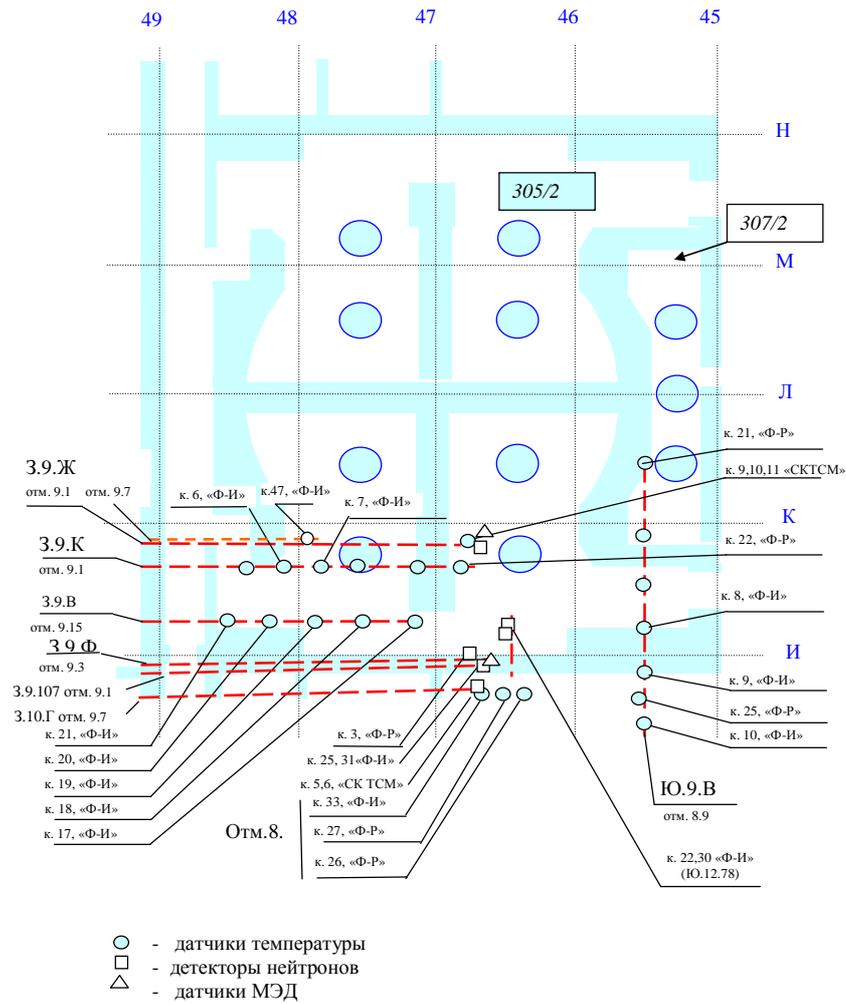


Рис. 7. Точки контроля в подректорной плите помещения 305/2.

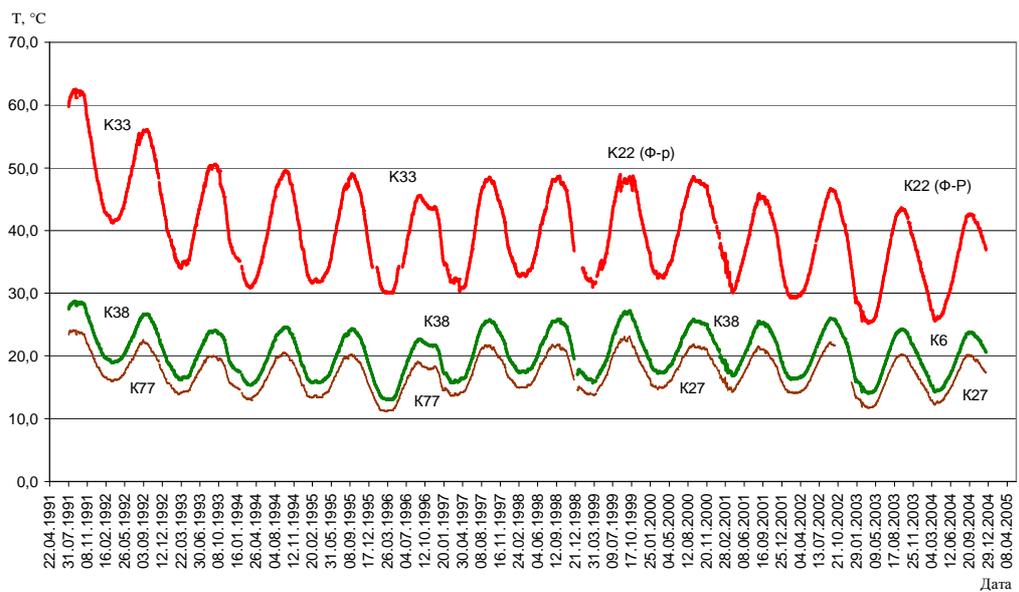


Рис. 8. Сквжина 3.9.К. Динамика показаний температурных каналов К22 (К33), К6 (К38) и К27 (К77).

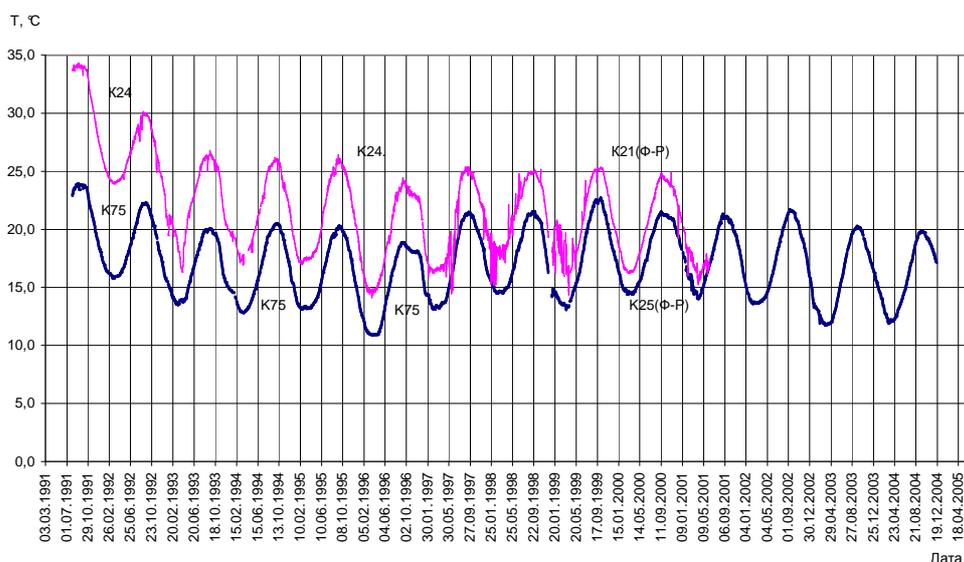


Рис. 9. Сквaziна Ю.9.В. Динамика показаний температурных каналов К25 (К75), К21 (К24) с 1991 г. по 2004 г.

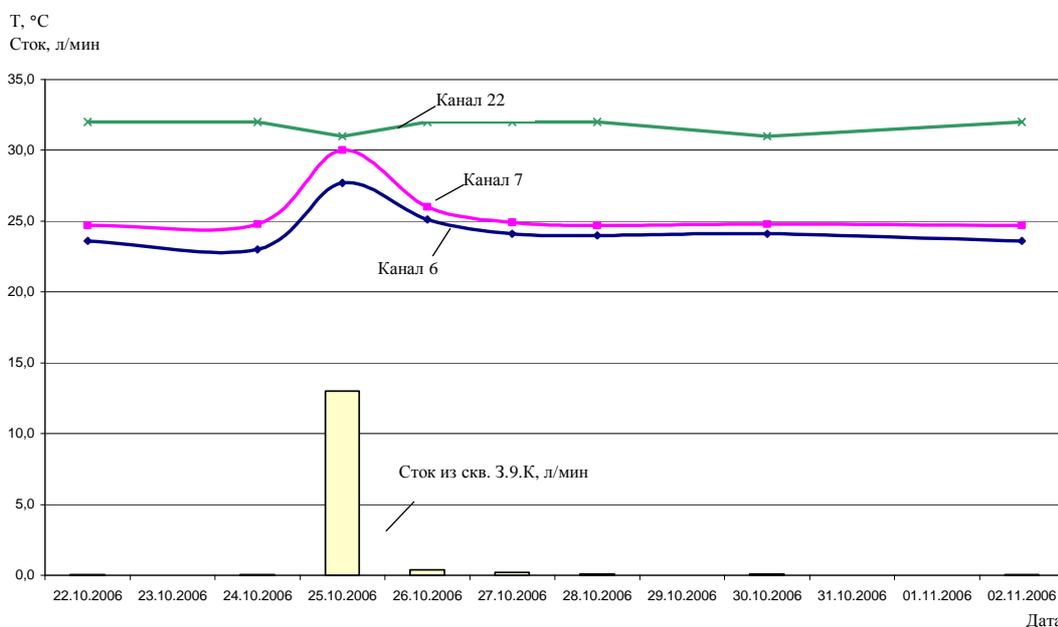


Рис. 10. Динамика температуры по каналам 6, 7 ИИС «Финиш», канала 22 ИИС «Финиш-Р» и стока воды из скважины 3.9.К.

Нейтронная активность

Измерение распределений ППН в массиве ПП были выполнены только в проходках западных скважинах на отметке +9.100. Измерения проводились в период 1988 - 1989 гг. Тогда высокая температура (более 100 °С) исключала возможность попадания воды в зоны проплавления. Детекторы нейтронов вводились в скважины и продвигались от ее устья на всю доступную глубину. Результаты измерений были представлены в виде распределений измеренных величин скорости счета детектора I; кадмиевого отношения R_{cd} ; расчетного значения интегральной плотности потока нейтронов Φ в зависимости от расстояния до устья скважины $L(m)$.

Резкое увеличение плотности нейтронного потока до $1000 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и более при уже-сточении спектра (уменьшение кадмиевого отношения от 3 до 1) наблюдалось во всех западных скважинах при выходе их на границу зоны проплавления (Зона 1). Это означало,

что в зоне находятся ТСМ с большой концентрацией UO_2 , так как источником нейтронов могло быть только топливо.

С целью получения предварительной оценки массовой концентрации топлива в ТСМ Зоны 1 были проанализированы гипотетические модели структуры скопления ТСМ в юго-восточном квадранте помещения 305/2 [4]. Результаты расчетов программой ANISN по этим моделям плотностей потоков нейтронов Φ , кадмиевых отношений R_{cd} и плотностей деления по U^{235} были сопоставлены с данными, полученными при измерениях в массиве ПП. Полагая, что процесс разрушения и проплавления бетона жидким топливом развивался одинаково в вертикальном и горизонтальном направлениях, наиболее близкой к реальной можно считать структуру, содержащую равномерные слои деструктированного бетона (ДБ) и слои гомогенной и/или гетерогенной (с топливными таблетками) смеси лавообразных ТСМ (ЛТСМ).

Элементный состав ЛТСМ в модели: кремний (Si) – 29,8; кислород (O) – 43,2; металлы – кальций (Ca), натрий (Na), алюминий (Al), цирконий (Zr), магний (Mg), железо (Fe), калий (K) – от 1 до 5 %. Массовое содержание UO_2 в ЛТСМ полагалось в пределах 10÷24 % массы; слои ДБ содержали 25÷75 % ЛТСМ. Гетерогенная структура строилась только в слоях ЛТСМ. Выгорание топлива составляло 11,5 МВт·сут/кг (урана). Изотопный состав топлива был представлен: U^{238} – 98,66; U^{235} – 0,98; Pu^{239} – 0,26; Pu^{240} – 0,10. Плотность бетона принималась равной 2,15 г/см³.

Генерируемое в объемах ЛТСМ удельное число нейтронов (5,8 н/г· UO_2 ·с) и их спектр определялось спонтанным делением изотопов Cm^{244} и Pu^{240} . Вклад других реакций не учитывался. Изменения размножающих свойств композиций моделировалось добавлением воды при заданном условии, что пористость структуры – 40 %.

На рис. 11 приведены рассчитанные распределения абсолютных значений плотностей потоков нейтронов Φ и кадмиевых отношений R_{cd} , для сухой гомогенной композиции с массовым содержанием UO_2 10 и 24 %, а также для гетерогенной. Распределения приведены по глубине материальной модели, составляющей 2,5 м, и привязаны к координатам западных скважин в месте их выхода в юго-восточный квадрант помещения 305/2 (ряд 46, или 12 м от устьев скважин). На расчетные распределения наложены значения R_{cd} и ППН, полученные при измерениях в скважинах 3.9.К, 3.9.Е и 3.9.Ж, которые выходят на западную границу Зоны 1. Ход экспериментальных распределений R_{cd} и Φ показывает: в зоне проплавления может находиться только гомогенная композиция из ТСМ; массовое содержание топлива в этой композиции может превышать 30 % уже на границах зоны; ожидаемое массовое содержание топлива в Зоне 1, превышающее 40 %, однозначно определяет ее как зону критмассового риска (КМЗ 1).

На рис. 12 представлены расчетные распределения Φ , кадмиевые отношения R_{cd}^5 и плотности деления $\langle \sigma_f^5 \rangle \Phi$ по U^{235} для той же гомогенной композиции с концентрацией UO_2 24 % мас., при отсутствии воды и при содержании воды равном 10 и 20%. Распределения даны в относительных значениях от параметров сухой композиции. Плотность деления по U^{235} $\langle \sigma_f^5 \rangle \Phi$ определяет счетность детектора нейтронов с «голой» камерой деления [4].

В сухой зоне счетность, по мере продвижения детектора в ДБ, вначале растет, а потом начинает волнообразно падать из-за деформации спектра в жесткую область. Интегральная величина Φ монотонно растет по мере продвижения в слои с большей концентрацией топлива. Характер распределения при равномерном заливе водой не меняется, но интегральный поток Φ в присутствии воды падает более чем вчетверо. Кривая $\langle \sigma_f^5 \rangle \Phi$ показывает, что детектор реагирует на появление воды в слоях ДБ снижением счета, а в слоях ТСМ повышением в 3 - 4 раза. Отсюда следует, что детекторы с «голыми» камерами деления, размещенные в бетоне, на периферии КМЗ будут неадекватно реагировать на изменения подкритичности контролируемого источника нейтронов. Что касается использования детек-

торов с утеплителем и их размещения, то этот вопрос требует отдельного исследования в рамках проблемы эффективности нейтронного контроля подкритичности в условиях «плохой» геометрии наблюдения.

На рис. 12 на расчетные кривые $\langle \sigma_f^5 \rangle \Phi$ наложены показания счетности детектора (3), полученные в скважине 3.9.Ж на выходе ее в юго-восточный квадрант.

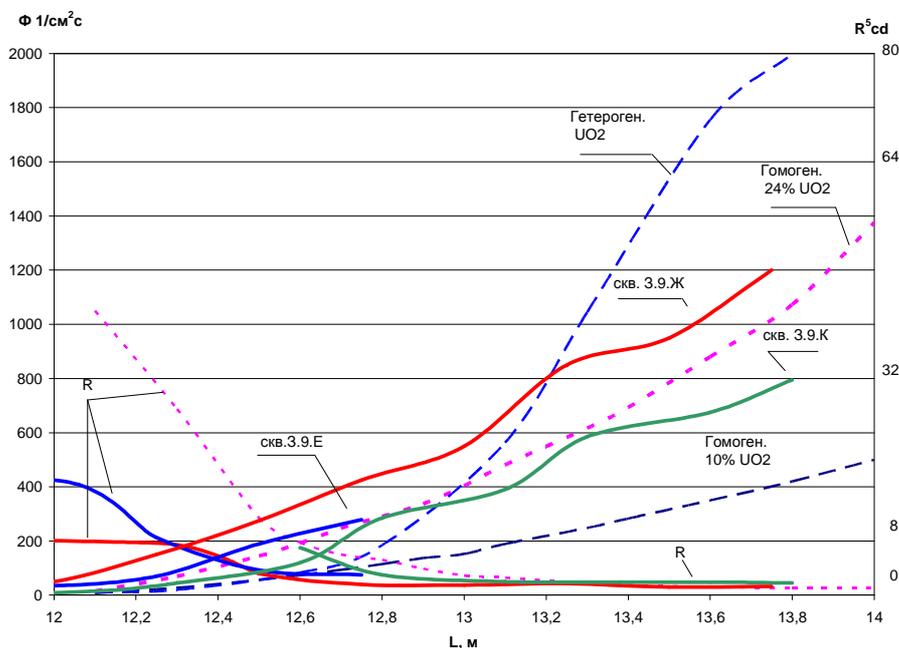


Рис. 11. Расчетные распределения абсолютных значений плотностей потоков нейтронов Φ и кадмиевых отношений R_{Cd} для сухой гомогенной композиции. Пунктиром обозначены расчетные данные, сплошной линией – экспериментальные данные.

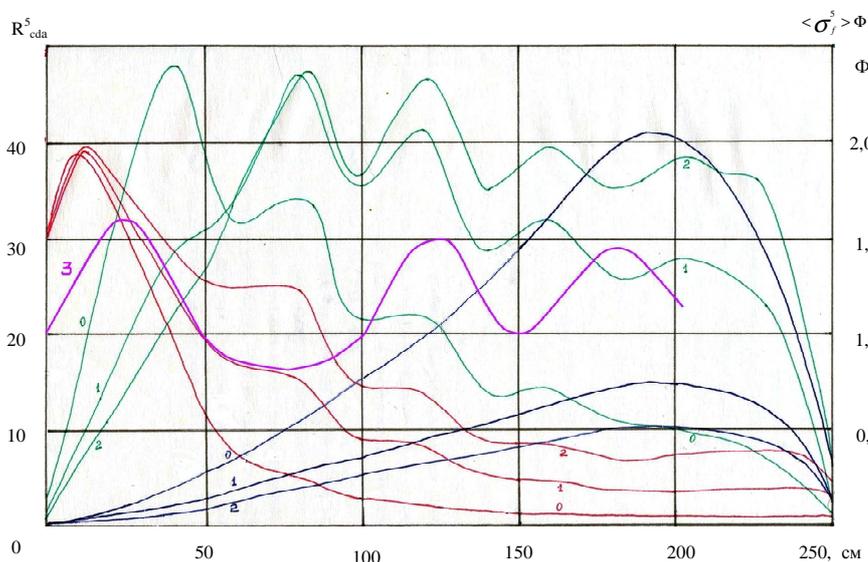


Рис. 12. Расчетные распределения Φ , кадмиевого отношения R_{Cd} , плотности деления $\langle \sigma_f^5 \rangle \Phi$ для гомогенной композиции с концентрацией UO_2 24 % мас.: 0 - при отсутствии воды; 1 - при содержании воды 10 %; 2 - равном – 20 %; 3 - счетность детектора в 3.9.Ж.

Ход экспериментальной кривой подтверждает правомочность принятия многослойной модели с равномерным убыванием массового содержания топлива в ДБ от центра к периферии зоны проплавления. Неравномерность убывания наблюдается только в части массива ПП, находящейся под фундаментным крестом в правой стороне от оси 47.

Это, очевидно, связано с изменением условий теплосъема в процессе проплавления. Удержание на одном уровне пиков счетности детектора при быстром падении кадмиевого отношения может быть только в случае, если по ходу скважины имеется нарастающая концентрация топлива, которая в центре КМЗ 1 может достигать 50 % мас. и более. Относительно КМЗ 2, то доступ в район Зоны 2 фактически отсутствует, и измерений нейтронных распределений в южных скважинах не проводилось, из-за их обсыпания.

Заключение

1. В условиях объекта «Укрытие» ядерную опасность может представлять существование локальных скоплений ТСМ, в которых массовое содержание топлива достигает 40 % и более, общая масса UO_2 превышает 10 т, а в объем скопления поступает и удерживается вода. Такие локальные скопления идентифицируются как зоны критмассового риска, так как вероятность возникновения в них СЦР менее 10^{-5} событий в год не может быть гарантирована.

2. Вероятность возникновения СЦР существует в юго-восточном квадранте подаппаратного помещения 305/2. Здесь на основании результатов исследования экспериментальных данных установлено наличие двух зон критмассового риска КМЗ1 и КМЗ2, которые располагаются в бетоне подреакторной плиты. Масса топлива в каждой КМЗ по предварительным оценкам может составлять от 10 до 30 т UO_2 при концентрации более 40 % мас. В углублениях фиксируется присутствие воды, уровень которой меняется в зависимости от интенсивности атмосферных осадков и/или конденсата. Имеется полный бетонный отражатель.

3. Ядерная безопасность объекта «Укрытие» не обеспечивается, так как сеть штатных детекторов нейтронного контроля, установленных по принципу перекрытия объемов скоплений ТСМ по помещениям, неэффективна и для целей обнаружения подкритических аномалий в установленных КМЗ в основном бесполезна. Нейтронная активность контролируется на периферии КМЗ1, для КМЗ2 нейтронный контроль отсутствует, и доступ к зоне ограничивается двумя южными скважинами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оценка количества топлива в скоплении ТСМ в подаппаратном помещении: (Отчет) / КЭ при ИАЭ № 11.07/26 от 29.04.90 г. - Чернобыль, 1990.*
2. *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. - 337с.*
3. *Киселев А. Н., Сурин А. И., Чечеров К. П.* Зафиксированные данные о развитии аварийных процессов на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС. Результаты послеварийного обследования // Бюллетень по атомной энергии. - 2006. - № 4 .
4. *Разработка предложений и рекомендаций по контролю и диагностике размножающих свойств ТСМ: (Отчет) / ИРП. - Арх. № 3235. - Минск, 1994.*
5. *Модельные и экспериментальные исследования эффективности нейтронного контроля топливосодержащих материалов в зонах критмассового риска: (Отчет) / ИПБ АЭС НАН Украины. - № 3950. - Чернобыль, 2006.*

Поступила в редакцию 26.02.07

26 ЛОКАЛІЗАЦІЯ ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ СКУПЧЕНЬ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

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

Представлено результати аналізу експериментальних даних і модельних розрахунків, що дали змогу виявити й локалізувати в підреакторній плиті дві зони проплавлення, в яких знаходяться скупчення паливовмісних матеріалів з концентрацією палива більше 40 % і спостерігається постійна присутність води. Попередні оцінки масових і геометричних параметрів скупчень дають підстави вважати їх зонами критмасового ризику.

26 LOCALIZATION OF NUCLEAR DANGEROUS ACCUMULATIONS OF FUEL-CONTAINING MATERIALS

E. D. Visotskiy, A. A. Kluchnikov, V. A. Krasnov

The results of experimental data and models calculations, allowing to expose and localize in a subreactor flag two burnout areas of in which the accumulations of FCM are with the concentration of fuel more than 40 % and there is the permanent presence of water, analysis are presented. The preliminary estimations of mass and geometrical parameters of accumulations ground to consider their areas of critical mass risk.