

А. В. Михайлов, А. А. Дорошенко

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

РЕЗУЛЬТАТЫ УТОЧНЕНИЯ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДРЕАКТОРНОЙ ПЛИТЫ И СУММАРНОГО ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ ЗОНЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЯДЕРНО-ОПАСНЫХ СКОПЛЕНИЙ В ПОМЕЩЕНИИ 305/2 ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» ЧАЭС

Подведены итоги многолетних исследований динамики температуры на периферии ядерно-опасных скоплений (ЯОС), локализованных в зоне глубокого проплавления подреакторной плиты в юго-восточном квадранте помещения 305/2 объекта «Укрытие» ГСП ЧАЭС. Проанализированы данные измерений, полученные автоматизированными системами контроля за период 1989 - 2015 гг. Дана математическая оценка обнаруженных трендов и температурных градиентов на пути рассеяния тепла из зоны ЯОС в окружающую среду. На основе последних результатов измерений проведено уточнение ранее полученных данных. Масса урана, сконцентрированного в зоне ЯОС, оценена с учетом вклада в интегральное тепловыделение дополнительного внутреннего источника тепла, частично компенсирующего падение мощности остаточного тепловыделения отработавшего топлива.

Ключевые слова: авария на ЧАЭС, топливосодержащие материалы, ядерноопасные скопления, температура, источники тепла, остаточное тепловыделение.

Введение

Непрерывный контроль температуры на периферии ядерно-опасных скоплений (ЯОС) в юго-восточном квадранте помещения 305/2 объекта «Укрытие» ГСП ЧАЭС проводился с ноября 1988 г. по 2015 г. включительно. Датчики температуры входили в состав измерительных каналов информационно-измерительной системы «Финиш» (ИИС «Финиш») в дополнение к детекторам нейтронов и мощности экспозиционной дозы [1]. В 2016 г. ИИС «Финиш» была выведена из эксплуатации. На протяжении периода ее работы сеть мониторинга состояния ЯОС претерпевала изменения как по числу одновременно работающих каналов, так и организационно (разделение на автономные системы). В настоящее время в помещениях объекта «Укрытие» функционирует система контроля ядерной безопасности (СКЯБ ИАСК), в составе которой датчики температуры не предусмотрены. В 2017 г. было принято решение на базе оборудования, входившего в состав ИИС «Финиш», создать экспертную исследовательскую систему, одной из функций которой является контроль температуры на периферии ЯОС [2].

В предыдущие годы предпринимались попытки проанализировать накопленный банк данных и оценить параметры источника тепла, сконцентрированного в зоне ЯОС [3 - 7]. После установки нового безопасного конфайнмента (НБК) 4-го блока ЧАЭС в проектное положение на пути переноса и рассеяния в окружающую среду тепла, генерируемого отработавшим топливом, появился дополнительный теплоизолятор в виде многослойной конструкции кровли. Возникла ситуация, неизбежным следствием которой является изменение температурно-влажностного режима внутри объекта «Укрытие». Для своевременного выявления тенденции в изменении состояния ЯОС необходимо знание закономерностей, которые наблюдались до создания НБК. При таких условиях является актуальным проведение расширенного анализа по всему объему данных, полученных вплоть до выведения из эксплуатации ИИС «Финиш», и уточнение ранее сделанных выводов и прогнозов.

Источники данных и метод исследований

Период исследований охватывал промежуток времени с ноября 1988 г. по декабрь 2015 г. включительно. Источниками данных о температуре подреакторной плиты (ПП) на отметках +8,00 - +9,30, в шахте реактора на отметке +12,00 и центральном зале (ЦЗ) на отметках +30,00 - +34,50 были:

электронный архив данных ИИС «Финиш» за 1988 - 1993 гг.;

электронный архив данных ИИС «Финиш» за 1994 - 1998 гг.;

записи в электронной базе данных ИИС «Финиш-И» (Ф-И) за период 1999 - 2015 гг. (в 1998 г. после модернизации ИИС «Финиш» была разделена на две отдельные системы контроля: исследовательскую - «Финиш-И» и регламентную ГСП ЧАЭС - «Финиш-Р»);

данные о результатах измерений ИИС «Финиш-Р» (Ф-Р) за период 1999 - 2013 гг. в виде стандартных протоколов (распечатки данных) и электронной базы данных за период 2013 - 2015 гг.

© А. В. Михайлов, А. В. Дорошенко, 2017

Источником данных о температуре атмосферного воздуха (окружающей среды) за пределами объекта «Укрытие» за период 1990 - 2015 гг. послужили записи в журналах наблюдений метеостанции в Чернобыле.

В качестве потенциальных источников тепла, формирующих температурный режим бетона ПП, рассматривали зоны ЯОС, которые в литературе [3 - 6] также называют критмассовыми зонами (КМЗ) или зонами критмассового риска (скопления с высокой вероятностью наличия критической массы топлива для возникновения самоподдерживающейся цепной реакции деления). Вокруг скоплений топливосодержащих материалов (ТСМ) с высоким содержанием урана (поз. 1 и 2 на рис. 1) были выбраны установочные координаты датчиков ИИС Ф-И и ИИС Ф-Р, показания которых на протяжении всего периода наблюдений представительно отображали различные условия рассеяния тепла от источника его образования в окружающую среду.

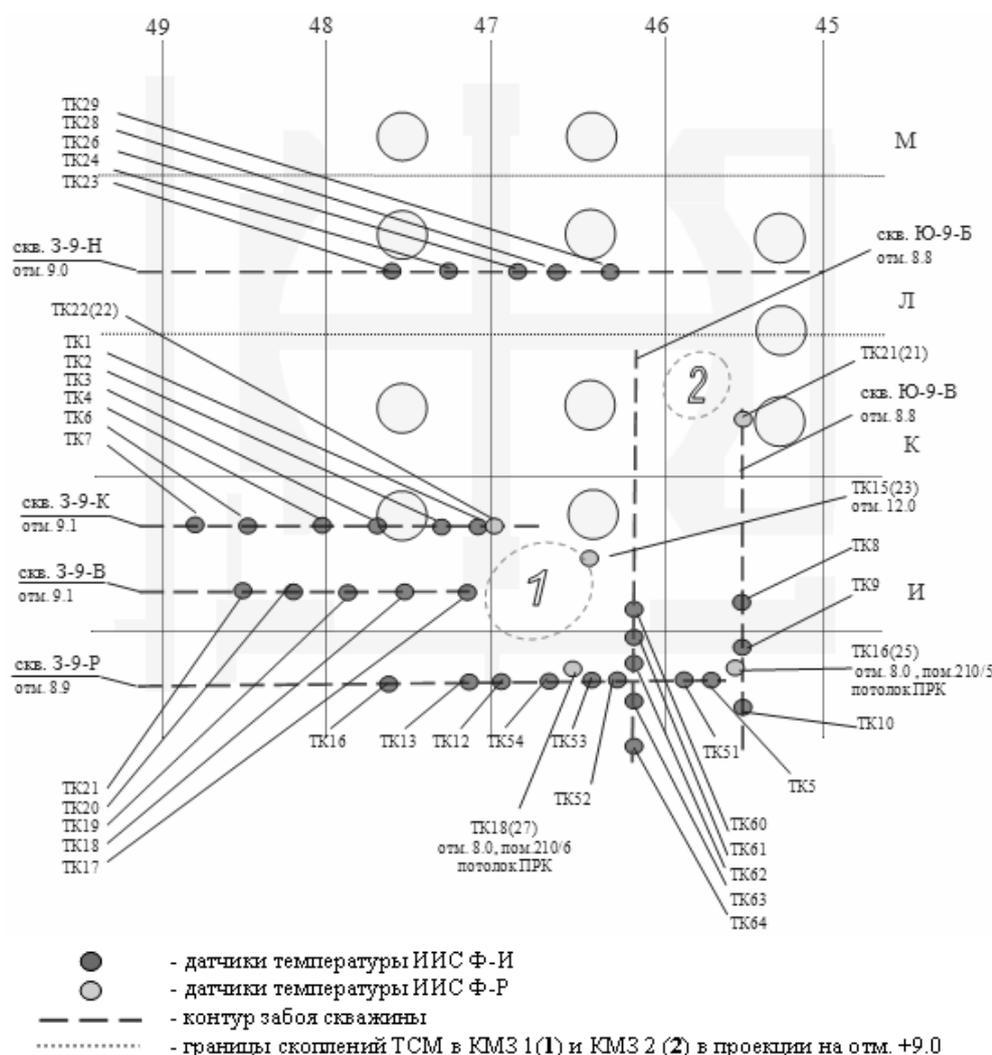


Рис. 1. Проекция точек контроля температуры на периферии ядерно-опасных скоплений (на отметку +9,00).

Изучение динамики температуры вокруг границ ЯОС проводили с учетом:

периодического появления системных искажений в показаниях измерительных датчиков, установленных в скважинах, из-за поступления подогретой воды из зоны, контактирующей непосредственно с внешней поверхностью ТСМ с высоким содержанием урана;

влияния принудительного обогрева помещений объекта «Укрытие» на показания датчиков, которые наиболее близко расположены к устью скважин, выходящих в зону обогрева;

сезонных колебаний температуры бетона ПП.

Расчет временных характеристик удельной мощности остаточного тепловыделения (ОТВ) топлива с момента аварии на 4-м блоке ЧАЭС проводился с использованием данных [8] и учета обеднения фрагментов перегретого топлива, входящего в состав ТСМ, продуктами деления.

Для точек контроля, которые периодически оказывались под влиянием поступления в скважины подогретой воды (подтопления), определялись временные промежутки, на протяжении которых в показания датчиков вносились скачкообразные искажения («всплески»). Для таких периодов наблюдений (выборки данных), аналогично приему, использованному в [5], амплитуда «всплесков» нивелировалась до совпадения со значениями, характерными для плавного сезонного характера изменения температуры, свойственной бетону объекта «Укрытие» при отсутствии воды.

Для сравнительного анализа временных зависимостей температуры бетона ПП на разном удалении от границ ЯОС значения среднегодовых показателей были приведены (нормированы) к величинам, рассчитанным для 1991 г. На полученную картину были наложены аналогично нормированные данные для временных характеристик мощности ОТВ топлива и среднегодовых показателей температуры окружающей среды.

Наличие или отсутствие влияния дополнительного источника тепла (ДИТ) на температуру бетона ПП в точке контроля определялось путем сравнения формы временных зависимостей и наблюдаемых долговременных трендов. Количественная оценка мощности ДИТ определялась по величине надфоновой составляющей в интегральное тепловыделение за пределы ТСМ. В качестве «фона» рассматривалась расчетная форма тренда временной характеристики ОТВ топлива.

Для решения поставленных задач использовались стандартные функции программы Excel Microsoft Office 2003.

Результаты и обсуждение

Детальный анализ данных статистической обработки результатов измерений температуры бетона ПП, металлической обшивки потолка парораспределительного коридора (ПРК), воздуха в шахте реактора, в ЦЗ и окружающей среде позволил получить подробную информацию о закономерностях ее изменения. Были выявлены устойчивые во времени тренды и оценены среднегодовые значения градиентов температуры на различном удалении от границ ЯОС на пути переноса и рассеяния тепла от его источника в окружающую среду.

На полученную картину закономерностей формирования температурного режима в различных точках контроля вокруг ЯОС (см. рис. 1) были наложены данные расчета временных характеристик мощности ОТВ отработавшего топлива реактора РБМК-1000 и среднегодовые показатели температуры окружающей среды.

В работах [5, 6] достаточно детально изложены результаты анализа долговременной динамики температуры на периферии ЯОС и особенности ее проявления в период 1988 - 2013 гг. В настоящей работе были сделаны акценты на уточнение уже известных закономерностей формирования теплового режима ПП, установленных ранее.

Как видно на рис. 2, в период до установки НБК в проектное положение в помещениях объекта «Укрытие» продолжали наблюдаться следующие устойчивые тенденции:

динамика температуры вблизи границ ЯОС характеризуется неуклонным снижением среднегодовых показателей на фоне роста температуры на потолке ПРК и окружающей среды;

падение температуры вблизи границ КМЗ 1, в которой сконцентрировано наибольшее количество топлива в составе ТСМ, имеет явно меньшую скорость, чем вокруг КМЗ 2, для которой форма динамики близка к временной характеристике ОТВ отработавшего топлива;

температура на потолке ПРК (металлической обшивке плиты перекрытия) характеризуется неуклонным ростом среднегодовых значений и по форме тренда достаточно близка к аналогичному показателю для окружающей среды с положительным коэффициентом корреляции;

наблюдается четкая закономерность сезонных колебаний температуры на различном удалении от границ ЯОС. Для бетона ПП минимальные значения температуры характерны в марте - апреле, а максимальные - в сентябре - октябре. Календарный сдвиг температуры ПП вблизи границ ЯОС от температуры в ЦЗ составляет два месяца, а от окружающей среды - три месяца. Температура в ЦЗ практически полностью повторяет температуру окружающей среды, отставая на один месяц.

В таблице представлены характеристики оцененных градиентов температуры на различном удалении от границ ЯОС в представительных точках контроля за различные периоды времени.

Сравнительный анализ данных, полученных ранее, с данными последнего периода наблюдений позволили выявить следующие тенденции:

градиенты температуры, формирующие каналы рассеяния тепла непосредственно от границ ЯОС в шахту реактора и ЦЗ, значительно (в 1,6 раза) снизились по сравнению с предыдущим периодом наблюдений. На удаленной периферии ПП падение значений менее существенно (8 - 15 %);

тенденция к постепенному росту температуры в ПРК отразилась на увеличении градиента между ПРК и ПП по абсолютному значению. Причем чем ближе к границам ЯОС, тем это различие более существенное. В то же время отмеченная тенденция для ПРК стала несколько опережать тренд к росту температуры окружающей среды (на 10 %);

между окружающей средой и полом ЦЗ градиент температуры практически не изменился; резкое увеличение градиента температуры отмечено только непосредственно в шахте реактора (отметки +12,00 и +34,50), причины этого явления остаются пока непонятыми.

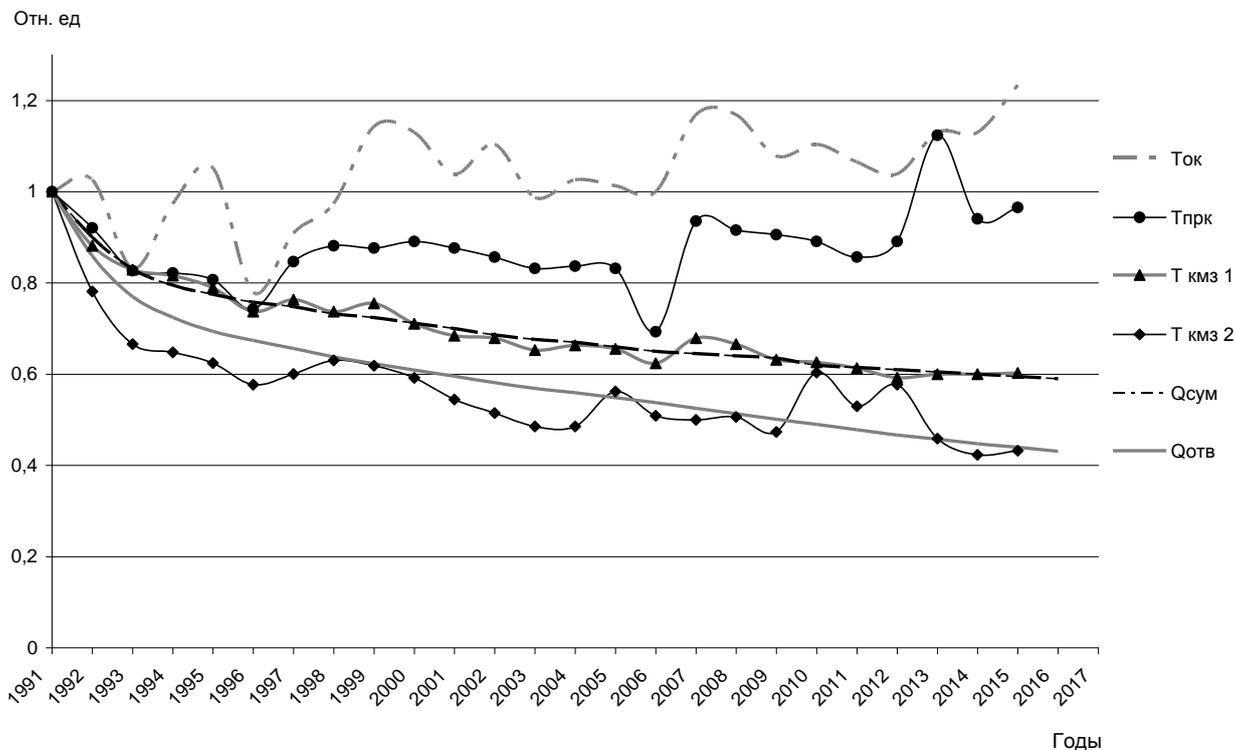


Рис. 2. Динамика нормированной температуры подреакторной плиты ($T_{\text{КМЗ}1}$ – на удалении 3-4 м от границы КМЗ 1; $T_{\text{КМЗ}2}$ – на удалении 2-3 м от границы КМЗ 2; $T_{\text{прк}}$ - на потолке ПРК) на фоне динамики удельной мощности ОТВ топлива ($Q_{\text{отв}}$) и колебаний температуры окружающей среды ($T_{\text{ок}}$); $Q_{\text{сум}}$ - оценка временного тренда для мощности суммарного тепловыделения из КМЗ 1.

Среднегодовые градиенты температуры между представительными точками контроля на пути рассеяния тепла из КМЗ в окружающую среду

Сравниваемые точки контроля	Среднее значение градиента*, °C	
	2008 - 2013 гг.	2013 - 2015 гг.
Окружающая среда - ЦЗ (пол, отметка +34,50)	+0,05 (± 15 %)	-0,30 (± 12 %)
ЦЗ - шахта реактора (отметка +12,00)	+3,0 (± 45 %)	+9,6 (± 12 %)
ЦЗ - ПП на удалении 3-4 м от КМЗ 1 (отметка +9,10)	+15,8 (± 15 %)	+10,0 (± 12 %)
ЦЗ - ПП на удалении 2-3 м от КМЗ 2 (отметка +8,80)	+9,7 (± 20 %)	+6,1 (± 14 %)
ЦЗ - ПП на удалении 8 - 13 м от КМЗ 1 (отметки +8,80 - +9,10)	от +7 до +11 (± 20 %)	от +6,5 до +9,4 (± 25 %)
ЦЗ - ПРК (отметка +8,00)	+9,9 (± 15%)	+10,8 (± 25 %)
ПРК (отметка +8,00) - ПП (отметка +8,90) ~ 5 м от КМЗ 1	-0,3 (± 10 %)	-1,3 (± 13 %)
ПРК (отметка +8,00) - ПП (отметка +8,80) ~ 8 м от КМЗ 1	-1,8 (± 10 %)	-3,3 (± 12 %)

* В скобках указана вариабельность среднего значения.

На рис. 2 представлена уточненная в соответствии с последними данными временная характеристика мощности ДИТ, влияние которого на суммарное тепловыделение из зоны ЯОС (КМЗ 1) было установлено ранее [6]. Согласно гипотезе, предложенной в работе [7], причиной этого явления может быть только тепло вынужденного деления, генерируемого в результате (α, n)-реакций на легких ядрах матрицы ТСМ в зоне локализации ЯОС. Как видно на рис. 3, влияние ДИТ на тепловой режим ПП

выражается в поддержании более высокого уровня тепловыделения из зоны ЯОС (КМЗ 1) по сравнению с расчетным значением, характерным только для ОТВ топлива, а также для КМЗ 2 (см. рис. 2). В то же время, как показано в работе [7], динамика мощности внутреннего источника нейтронов, а следовательно, и тепла вынужденного деления зависит от массовой доли топлива в ТСМ. Подобное обстоятельство позволяет найти объяснение более выраженному влиянию ДИТ на суммарное тепловыделение из КМЗ 1 по сравнению с КМЗ 2 на фоне неуклонного падения интегрального теплосодержания ТСМ.

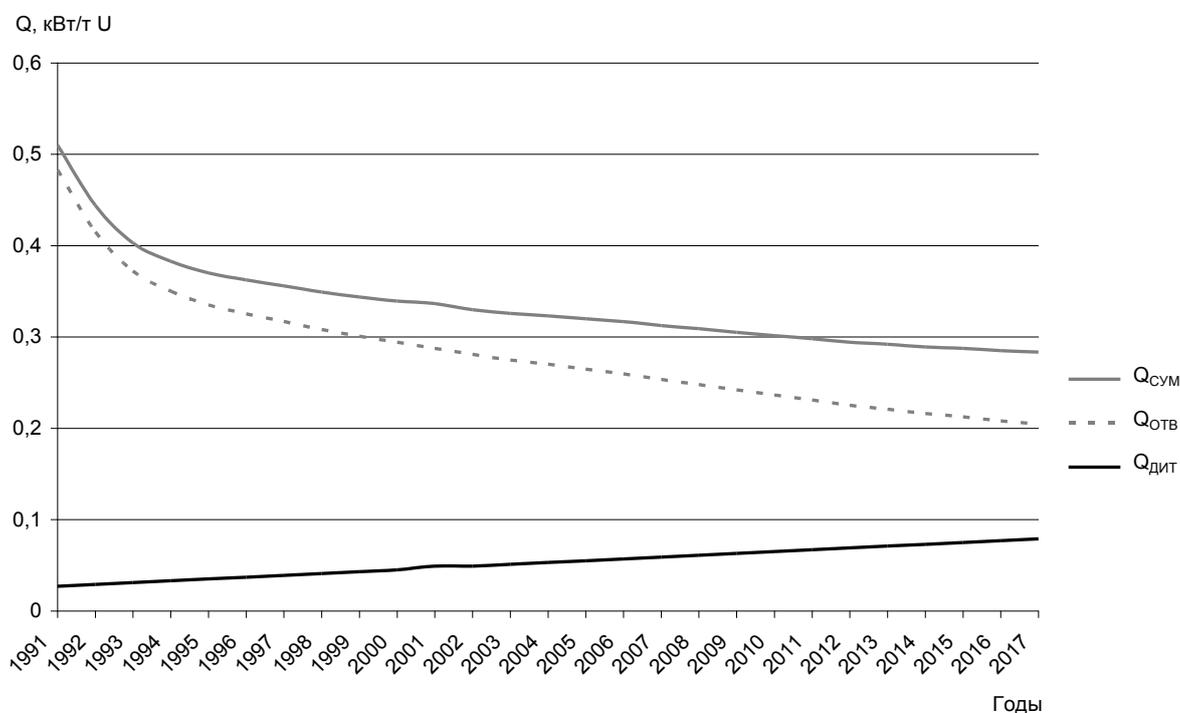


Рис. 3. Временные характеристики дополнительного источника тепла ($Q_{ДИТ}$) на фоне динамики ОТВ отработавшего топлива ($Q_{ОТВ}$) и суммарного тепловыделения из зоны КМЗ 1 ($Q_{СУМ}$).

Наблюдения за более длительный период времени показали, что вклад ДИТ в суммарную мощность тепловыделения в 2,5 раза меньше, чем оценивалось нами ранее [6, 7], и может составлять не более 0,071 кВт/т урана (на 2016 г.). Наши предварительные количественные оценки массы урана, сконцентрированной в КМЗ 1 [5], были скорректированы в сторону ее уменьшения (до 18 ± 5 т). Поправка такого рода была обусловлена необходимостью учета вклада ДИТ в суммарное тепловыделение, которое ранее не учитывалось. Исходя из полученных данных и расчетного значения остаточного ОТВ отработавшего ядерного топлива (0,208 кВт/т), мощность источника тепла, скрытого под слоями черных лавообразных ТСМ и бетона заливки 1986 г. в юго-восточном квадранте помещения 305/2 на ноябрь 2016 г. оценивается в $5,1 \pm 1,4$ кВт/ч.

Полученные данные при подготовке материалов для работы [9] позволили более точно свести топливный баланс для помещения 305/2 (77 ± 15 т) и минимизировать расхождение с данными теплотометрических измерений (75 т [10]).

Заключение

1. Воссоздана целостная картина динамики температуры на различном удалении от границ ядерно-опасных скоплений в помещении 305/2 за период наблюдений 1991 - 2015 гг.
2. Уточнены ранее полученные оценки градиентов температуры и тренды ее изменения на периферии ядерно-опасных скоплений, которые наблюдались до создания НБК.
3. Получены более точные данные о влиянии дополнительного внутреннего источника тепла на суммарное тепловыделение из зоны ядерно-опасных скоплений, а также о массе топлива, сконцентрированного в месте глубокого прожога бетона подреакторной плиты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анализ путей доступа к скоплениям топливосодержащих материалов в помещении 305/2 объекта «Укрытие»*. Ч. 2. Исследовательские скважины в подреакторной плите / Е. Д. Высотский, А. И. Довыдьков, С. А. Довыдьков и др. – Чернобыль, 2011. – 36 с. – (Препр. / НАН Украины. ИПБ АЭС; 11-2).
2. *Програма науково-технічного супроводу на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК-ОУ*.
3. *Высотский Е. Д.* Локализация ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов / Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, В. А. Краснов // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2007. – Вип. 7. – С. 66 – 75.
4. *Нейтронно-физические характеристики ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов* / Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, В. Н. Щербин, В. Б. Шостак // Там же. – 2009. – Вип. 12. – С. 93 – 102.
5. *Высотский Е. Д.* Температурные аномалии в зонах критмассового риска / Е. Д. Высотский, А. В. Михайлов // Там же. – 2011. – Вип. 16. – С. 101 – 109.
6. *Высотский Е. Д.* Динамика температуры подреакторной плиты на фоне спада остаточного тепловыделения топлива в зонах критмассового риска / Е. Д. Высотский, А. В. Михайлов, А. А. Дорошенко // Там же. – 2014. – Вип. 22. – С. 76 – 84.
7. *Высотский Е. Д.* Нейтронная активность скоплений лавообразных топливосодержащих материалов на 4-м блоке ЧАЭС / Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун // Там же. – 2015. – Вип. 25. – С. 108 – 114.
8. *Оцененные данные по накоплению радионуклидов в активной зоне реактора 4-го блока ЧАЭС перед аварией: (Отчет о НИР) / МНТЦ «Укрытие» НАН Украины.* – Инв. № 2765. – Чернобыль, 1993.
9. *Михайлов А. В.* К вопросу о материальных и энергетических источниках образования топливосодержащих материалов во время аварии на 4-м блоке ЧАЭС / А. В. Михайлов // Ядерна фізика та енергетика. – 2016. – Т. 17, № 4. – С. 54 – 363.
10. *Пазухин Э. М.* Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования / Э. М. Пазухин // Радохимия. – 1994. – Т. 36, № 2. – С. 97 – 142.

О. В. Михайлов, А. О. Дорошенко

Институт проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобыль, 07270, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ УТОЧНЕННЯ ДИНАМІКИ ТЕМПЕРАТУРИ ПІДРЕАКТОРНОЇ ПЛИТИ ТА СУМАРНОГО ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ ІЗ ЗОНИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ СКУПЧЕНЬ У ПРИМІЩЕННІ 305/2 ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» ДСП ЧАЕС

Наведено підсумки багаторічних досліджень за динамікою температури на периферії ядерно-небезпечних скупчень (ЯНС), локалізованих у зоні глибокого проплавлення підреакторної плити в південно-східному квадранті приміщення 305/2 об'єкта «Укриття» ДСП ЧАЕС. Проаналізовано дані вимірювань, що були отримані автоматизованими системами контролю за період 1989 - 2015 рр. Наведено математичну оцінку виявлених трендів і температурних градієнтів на шляху розсіяння тепла із зони ЯНС у навколишнє середовище. На основі останніх результатів вимірювань проведено уточнення раніше отриманих даних. Масу урану, що сконцентрована в зоні ЯНС, оцінено з урахування внеску в інтегральне тепловиділення додаткового внутрішнього джерела тепла, частково компенсуючого падіння потужності остаточного тепловиділення палива.

Ключові слова: аварія на ЧАЕС, паливовмісні матеріали, ядерно-небезпечні скупчення, температура, джерело тепла, остаточне тепловиділення.

O. V. Mikhajlov, A. O. Doroshenko

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

UPDATE RESULTS ABOUT DYNAMICS OF UNDER-REACTOR SLAB TEMPERATURE AND TOTAL HEAT EXTRACTION FROM THE ZONE OF LOCALIZATION OF NUCLEARLY HAZARDOUS CLUSTERS IN ROOM 305/2 OF THE CHERNOBYL NPP OBJECT "UKRYTTYA"

Continuous temperature monitoring at periphery of nuclearly hazardous clusters (NHC) in Chernobyl NPP object "Ukryttya" southeast quadrant of room 305/2 was being carried out from November 1988 to 2015 with using "Finish" Information and Measurement System. During previous years, some attempts were made to analyze accumulated databank and to assess the parameters of heat source concentrated within NHC area. The creation of New Safe Confinement (NSC) of ChNPP Unit 4 has made prerequisites for changes in temperature-humidity regime within the object "Ukryttya", and, consequently, in NHC status. This work was carried out in order to clarify earlier conclusions concerning regularities of thermal regime formation around the NHC until NSC creation. This work was aimed at creating initial dataset for further evaluation of NHC state within NSC conditions. The methods of statistical analysis of data on temperature of sub-reactor slab (elevations +8.00 - +9.30) were used, in reactor shaft (elevation

+12.00), in Central Hall (elevation +30.00 - +34.50) and in air (environmental) temperature beyond object “Ukryttya” limits. The research period has covered the time interval from November 1988 before December 2015. To make a comparative analysis of time dependences of concrete temperature at different distances from NHC boundaries, mean annual values were given (normalized) to the values calculated for 1991 year. Analogously normalized data for temporary characterization of fuel afterheat and environmental mean annual temperature values were overlapped on obtained picture. The results obtained in this work made it possible creating an integral picture of temperature dynamics at different distances from NHC boundaries in room 305/2 during survey period from 1991 to 2015 years. Earlier obtained values of temperature gradients and its change’s trends at NHC periphery, which were observed before the NSC was installed in its design position, were refined. More accurate data were obtained on degree of impact of additional internal heat source onto total heat release from the NHC area (not more than 0.071 kW/t of uranium in 2016 year) and uranium mass concentrated in deep burn-through place of sub-reactor slab (up to 18 ± 5 tons). Based on the data obtained and design value of spent nuclear fuel afterheat (0.208 kW/t), total rate of heat source hidden under the layers of black lava-like fuel-containing masses and 1986 year concrete in southeast quadrant of room 305/2 was estimated at 5.1 ± 1.4 kW/h (as of November 2016).

Keywords: accident at the Chernobyl NPP, fuel-containing mass, nuclearly hazardous clusters, temperature, heat sources, residual afterheat.

REFERENCES

1. *Analysis of access paths to agglomeration of fuel-containing materials in object “Shelter” 305/2 room. Part 2. Research wells at under-reactor plate / Ye. D. Vysotskij, A. I. Dovydykov, S. A. Dovydykov et al. – Chernobyl, 2011. – 36 p. – (Prepr. / NAN Ukrainy, IPB AES; 11-2). (Rus)*
2. *Program of scientific and technical support at the stages of commissioning and operation of the NSC-OS. (Ukr)*
3. *Vysotskij Ye. D. Localization of nuclear-dangerous accumulations of fuel containing materials / Ye. D. Vysotskij, A. A. Kliuchnikov, V. A. Krasnov // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chernobyl). – 2007. – Iss. 7. – P. 66 – 75. (Rus)*
4. *Neutron and physical characteristics of nuclear-dangerous accumulation of fuel containing materials / Ye. D. Vysotskij, A. A. Kliuchnikov, V. N. Shcherbin, V. B. Shostak // Ibid. – 2009. – Iss. 12. – P. 93 – 102. (Rus)*
5. *Vysotskij Ye. D. Temperature anomalies in zones of critical mass risk / Ye. D. Vysotskij, A. V. Mikhailov // Ibid. – 2011. – Iss. 16. – P. 101 – 109. (Rus)*
6. *Vysotskij Ye. D. Dynamics of under-reactor slab temperature on the background of fuel afterheat decrease within critical mass risk zones / Ye. D. Vysotskij, A. V. Mikhailov, A. A. Doroshenko // Ibid. – 2014. – Iss. 22. – P. 76 – 84. (Rus)*
7. *Vysotskij Ye. D. Neutron activity of lava-like clusters of fuel-containing materials on the fourth Chernobyl unit / Ye. D. Vysotskij, R. L. Gogun // Ibid. – 2015. – Iss. 25. – P. 108 – 114. (Rus)*
8. *The estimated data on accumulation of radionuclides in an core of the reactor of the 4th block of the Chernobyl NPP Unit 4 before accident: (Report of Research Work) / MNTTs “Ukrytie” of UNAS. – Inv. № 2765. – Chernobyl, 1993. (Rus)*
9. *Mikhailov A. V. On material and energy sources of fuel-containing materials formation during Chernobyl NPP Unit 4 accident / A. V. Mikhailov // Yaderna fizika ta enerhytyka (Nucl. Phys. At. Energy). – 2016. – Vol. 14, No. 4 – P. 354 – 363. (Rus)*
10. *Pazukhin E. M. Lava-like fuel containing mass of the 4 Unit of the Chernobyl NPP: topography, physical and chemical properties, scenario of formation / E. M. Pazukhin // Radiokhimiya. – 1994. – Vol. 36, No. 2. – P. 97 – 142. (Rus)*

Надійшла 31.10.2017

Received 31.10.2017