

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДРЕАКТОРНОЙ ПЛИТЫ НА ФОНЕ СПАДА ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВА В ЗОНАХ КРИТМАССОВОГО РИСКА

Представлены методика и результаты восстановления и анализа долговременной динамики температуры подреакторной плиты в зонах локализации ядерно-опасных скоплений. Показано, что на фоне спада остаточного тепловыделения топлива текущая температура в зонах локализации может поддерживаться только за счет дополнительного источника тепла. Предложено объяснение природы его происхождения и оценен его вклад в мощность суммарного тепловыделения. Установлено, что источником тепла, частично компенсирующим падение остаточного тепловыделения топлива, может быть только энергия вынужденного деления, рост которой обусловлен возрастающей интенсивностью выхода нейтронов (α, n)-реакций на легких ядрах топливосодержащих материалов при накоплении ^{241}Am .

Ключевые слова: динамика температуры, топливосодержащие материалы, остаточное тепловыделение, ядерно-опасные скопления, нейтроны.

Введение

Измерения температуры, мощности экспозиционной дозы и нейтронной активности по глубине исследовательских скважин, пробуренных в бетоне подреакторной плиты (ПП), в комплексе с результатами пробоотбора позволили локализовать местоположение двух зон, в пределах которых могут находиться топливосодержащие материалы (ТСМ) с концентрацией урана от 50 % и более. Такие скопления были идентифицированы как зоны критмассового риска (КМЗ) [1 - 3].

В июне 1990 г. информационно-измерительной системой (ИИС) «Финиш» на периферии КМЗ 1 была зарегистрирована мощная нейтронная аномалия, которая продолжалась в течение 6 сут. Превышение плотности потока нейтронов над фоном составило более двух порядков. Детальное восстановление динамики аномалии показало, что самоподдерживающаяся цепная реакция (СЦР) возникла в процессе залива остывающего скопления водой, а ее самогашение произошло в результате переувлажнения критической массы. Инцидент 1990 г. был идентифицирован как повторная критичность [2 - 3]. Для водно-урановых систем с низкообогащенным топливом надкритичность достигается в определенном диапазоне оптимального увлажнения. В настоящее время скопление ТСМ в КМЗ 1 находится за вторым значением критичности. Наличие воды, поступающей в объект «Укрытие» с атмосферными осадками и конденсационной влагой, удерживает ее в подкритическом состоянии [3].

После возведения нового безопасного конфайнмента изменение режима поступления воды в объект «Укрытие» и рост температуры могут привести к возвратной критичности ТСМ [3]. Тепловыделение топлива, сконцентрированного в КМЗ, и действие законов термодинамики, обеспечивающих непрерывное охлаждение источника тепла и рассеивание в окружающую среду генерируемой тепловой энергии, определяют конфигурацию тепловых полей в бетоне ПП [4].

До последнего времени считалось, что доминирующим источником тепла, определяющим тепловой режим ПП вокруг ядерно-опасных скоплений, является остаточное тепловыделение (ОТВ) топлива. В то же время, начиная с 1996 г., в динамике температуры ПП на ее периферии отсутствует устойчивый тренд на ее понижение [1], что противоречит процессам постепенного остывания ТСМ в соответствии с законом спада ОТВ топлива.

Ниже на основании долговременной оценки динамики температуры ПП показано, что тепловой режим бетона вокруг КМЗ определяется дополнительным внутренним источником тепла, которым может быть энергия вынужденного деления, мощность которой увеличивается со временем.

Объекты и методика исследований

Контроль температуры в ПП и шахте реактора проводится с ноября 1988 г. На рис. 1 показана схема размещения температурных датчиков исследовательской (Ф-И) и регламентной (Ф-Р) ИИС в проекции относительно границ КМЗ на высотную отметку (отм.) +9.0.

Объектом исследований являлась временная реализация температуры для: бетона ПП на отм. от +8.0 до +9.1; воздуха в шахте реактора на отм. +12.0 и центральном зале (ЦЗ) на отм. +34.5; атмосферного воздуха (окружающей среды) за пределами объекта «Укрытие». Период исследований охватывал промежуток времени с ноября 1988 г. по декабрь 2013 г. включительно. Источниками данных были:

записи в электронной базе данных ИИС «Финиш» (формат *.DAY, результаты измерений);
данные на бумажных носителях (стандартные протоколы-распечатки) о результатах измерений ИИС «Ф-Р»;

электронный архив данных ИИС «Финиш» в виде файлов формата *.db со среднесуточными значениями по результатам измерений в 1994 - 1998 гг.;

электронный архив данных ИИС «Финиш» для отдельных скважин в виде файлов формата *.xls со среднесуточными значениями по результатам измерений в 1988 - 1993 гг.;

данные из журналов наблюдений за метеорологической обстановкой метеостанции в Чернобыле за 1990 - 2013 гг.

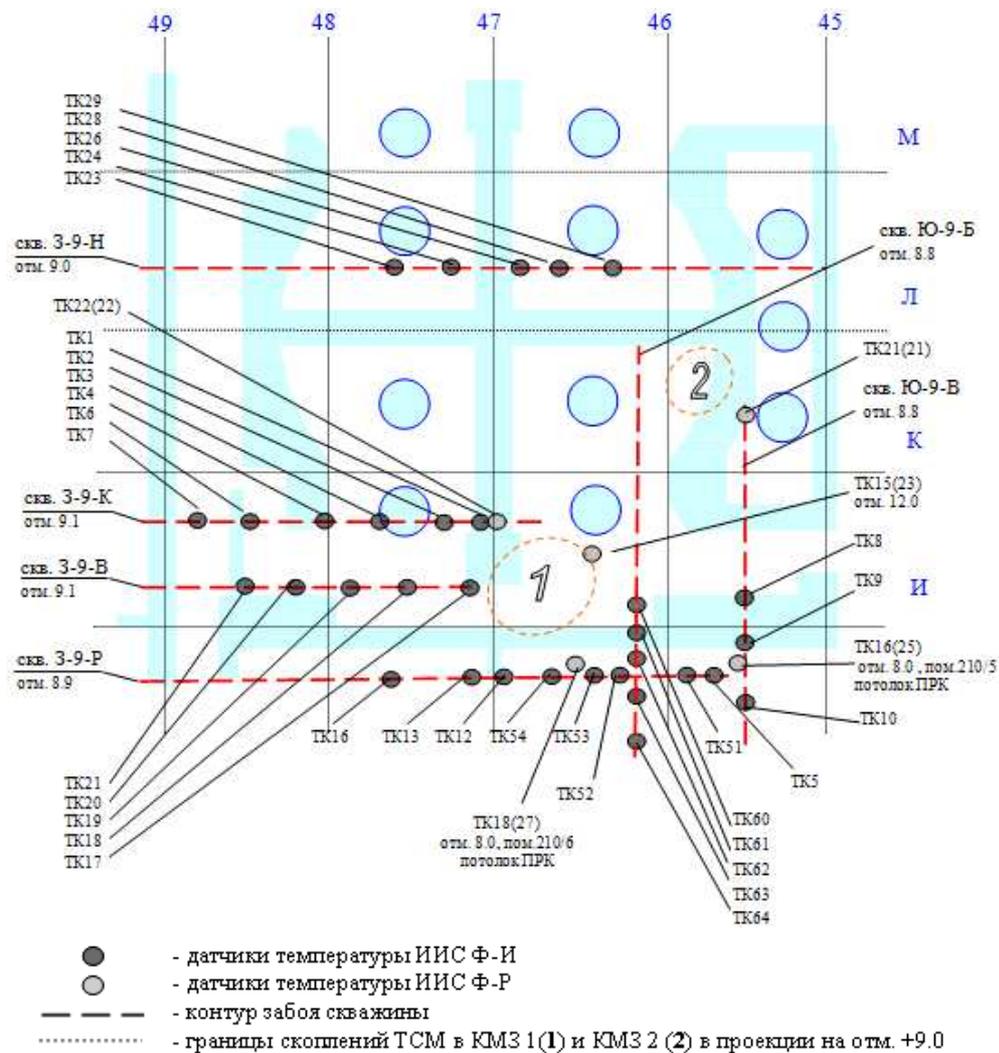


Рис. 1. Размещение точек контроля температуры ПП (на 10 февраля 2010 г.).

В качестве базовых точек при исследовании динамики температуры ПП были выбраны места установки датчиков, которые представительно отображают различные условия формирования тепловых потоков вокруг КМЗ за долговременный период контроля. На предварительном этапе анализа данных использовались также сведения работы [5]. Границы скопления ТСМ для КМЗ 1 и 2 определялись с использованием тех же принципов построения изотермических поверхностей, которые были использованы нами ранее [4].

Все особенности динамики и градиентов температуры на различном удалении от границ КМЗ анализировались на предмет их формирования под влиянием таких факторов, как:

- периодическое затопление скважин водой;
- изменение температурного режима помещений объекта «Укрытие» в результате принудительного обогрева;
- сезонные колебания температуры атмосферного воздуха (окружающей среды);
- ОТВ топлива, локализованного в КМЗ;
- изменение тепловыделяющих свойств собственно самих ТСМ как результат ядерно-физических превращений в материалах, входящих в состав КМЗ.

Для датчиков, установленных в скважинах, периодически заливаемых водой, определялись временные промежутки, когда в показания измерительного канала вносились скачкообразные искажения («всплески»), обусловленные ее влиянием. Для таких выборок данных амплитуда «всплесков» нивелировалась до совпадения со значениями, характерными для плавного изменения температуры, свойственной бетону ПП [4].

Влияние принудительного обогрева помещений объекта «Укрытие» на тепловой режим ПП оценивалось для скважин, в которых датчики наиболее приближены к его устью. Период времени 2008 - 2013 гг., выбранный для анализа, охватывает события как до, так после начала эксплуатации отопительно-вентиляционных агрегатов. Оценка влияния окружающей среды на тепловой режим ПП проводилась на основе результатов корреляционно-регрессионного анализа среднегодовых показателей температуры. Для решения поставленных задач использовались стандартные функции программного пакета EXCEL MICROSOFT Office OS Windows 7.

Расчет временных характеристик ОТВ топлива проводился с использованием данных [6], учитывающих обеднение оставшегося в блоке топлива продуктами деления во время аварии.

Результаты и обсуждение

На предварительном этапе анализа данных были определены периоды времени, когда для того или иного датчика в скважине по тем или иным причинам отсутствовали результаты измерений (окна). Был проведен регрессионный анализ для выборок данных измерений, представляющих наиболее стабильные (с точки зрения постоянства установочных координат и наличия различного рода искажений в показаниях) точки контроля. На рис. 2 представлены результаты анализа, полученные для данных 1991, 1998 и 2009 гг., и уравнения регрессии $Y = f(x)$, описывающие функциональную зависимость температуры бетона от расстояния (L) до границ скоплений ТСМ в КМЗ. Высокая степень достоверности аппроксимации данных (R^2) позволила использовать полученные результаты для восстановления целостной картины долговременной динамики температуры бетона ПП вокруг КМЗ.

Результаты регрессионного анализа показали, что длительное время (до 1998 г.) в бетоне сохранялись высокие градиенты температуры, которые обеспечивали интенсивный теплосъем с поверхности ТСМ и рассеивание в окружающую среду тепловой энергии, генерируемой в КМЗ (см. рис. 2). К 2009 г. влияние тепловыделения ТСМ снизилось до такой степени, что на удалении более 8 м от границ КМЗ температура ПП изменяется незначительно. Наблюдаемое распределение температур формируется в результате непрерывного процесса теплопередачи, который запускается за счет разницы температуры ТСМ в КМЗ и атмосферным воздухом. Бетон ПП и остальная часть здания объекта «Укрытие», включая шахту реактора и ЦЗ, являются лишь промежуточными средами, рассеивающими избыточную энергию в окружающую среду.

В табл. 1 приведена характеристика существующих градиентов температуры. Полученные данные свидетельствуют о том, что независимо от сезонных колебаний по абсолютному значению наблюдается четкая картина устойчивых градиентов температуры между окружающей средой, ЦЗ, шахтой реактора и бетоном ПП. Температура в ЦЗ с календарным сдвигом в один месяц практически полностью повторяет температуру окружающей среды. Для бетона ПП и потолка парораспределительного коридора (ПРК), наблюдается синхронность динамики с минимумом температуры в марте - апреле, а максимумом - в сентябре - октябре. В итоге календарный сдвиг температуры ПП вблизи КМЗ от температуры в ЦЗ и шахте реактора составляет два месяца, а от окружающей среды - три месяца. В итоге формируется температурный режим, который мы наблюдаем вокруг ядерно-опасных скоплений.

На рис. 3 представлены результаты ретроспективной оценки долговременной динамики температуры бетона для различных условий формирования теплового режима ПП. Полученные данные свидетельствуют о том, что в отличие от приграничных к КМЗ участков ПП, температура которых продолжает медленно падать, на периферии наметилась тенденция к поддержанию температуры на одном и том же уровне. Исключение составляет нижняя часть ПП - потолок ПРК, где наметилась тенденция к росту температуры.

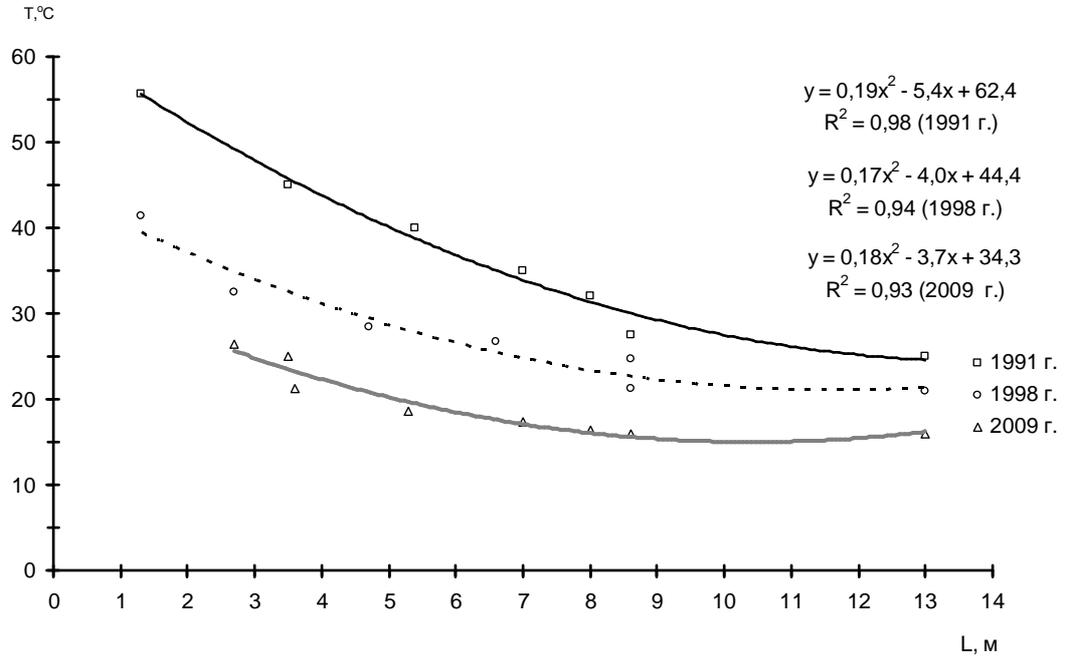


Рис. 2. Зависимость температуры бетона от расстояния до границы КМЗ 1.

Таблица 1. Результаты оценки градиентов температуры по данным за 2008 - 2013 гг.

Сравниваемые точки контроля	Среднее значение градиента, °С
Окружающая среда - ЦЗ*	+0,05 (± 15 %) **
ЦЗ - шахта реактора (отм. +12.0)	+3,0 (± 45 %)
ЦЗ - ПП на удалении 3 - 4 м от КМЗ 1 (отм. +9.1)	+15,8 (± 15 %)
ЦЗ - ПП на удалении 2 - 3 м от КМЗ 2 (отм. +8.8)	+9,7 (± 20 %)
ЦЗ - ПП на удалении 8 - 13 м от КМЗ 1 (отм. +8.8 - 9.1)	от +7 до +11 (± 20 %)
ЦЗ - ПРК (отм. +8.0)	+9,9 (± 15%)
ПП (отм.+8.9) на удалении ~5 м от КМЗ 1 – ПРК (отм. +8.0)	-0,3 (± 10 %)
ПП (отм.+8.8) на удалении ~8 м от КМЗ 1 – ПРК (отм. +8.0)	-1,8 (± 10 %)

* На отм. +34.5.

** В скобках указана варибельность параметра.

Таблица 2. Результаты корреляционно-регрессионного анализа данных

Случайная величина		Коэффициент корреляции, r	Уравнение регрессии $Y = f(x)$	Достоверность аппроксимации, R^2
Y	X			
Температура на потолке ПРК (пом. 210/6, отм. +8.0)	Температура окружающей среды	0,73	$0,98x + 9,7$	0,53
Температура бетона вблизи границы КМЗ 1 (1 - 3 м, отм. +9.1)		-0,27	$-2,1x + 55,6$	0,07
Температура бетона вблизи границы КМЗ 1 (3 - 4 м, отм. +9.1)		-0,35	$-1,7x + 40,7$	0,12
Температура бетона вблизи границы КМЗ 2 (2 - 3 м, отм. +8.8)		-0,25	$-1,3x + 30,1$	0,06
Температура бетона на удалении 7 - 8 м		0,24	$0,7x + 11,1$	0,06

от границы КМЗ 1 (отм. +9.1)			
Температура бетона на удалении 10 – 13 м от границы КМЗ 1 (отм. +9.1)	-0,23	$-0,7 x + 26,5$	0,05

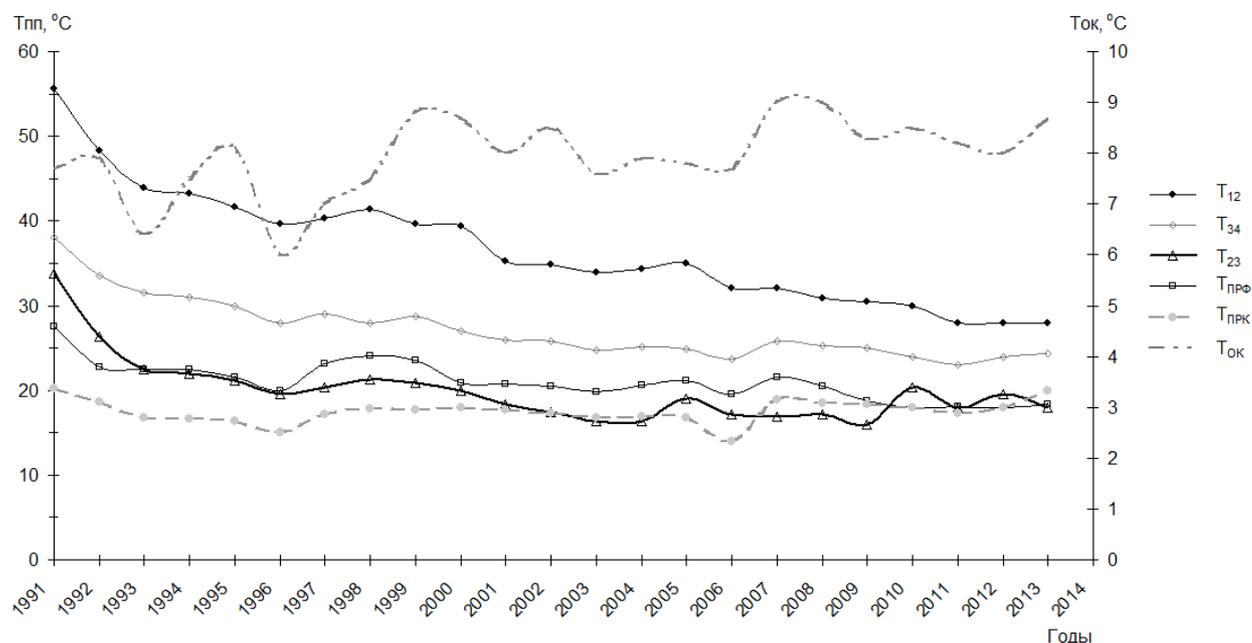


Рис. 3. Динамика температуры ПП ($T_{ПП}$) на различном удалении от границ КМЗ на фоне колебаний температуры окружающей среды ($T_{ОК}$): T_{12} и T_{34} – температура на удалении, соответственно, 1 - 2 и 3 - 4 м от границ КМЗ 1 (отм. +9.1); T_{23} – температура на удалении 2 - 3 м от границ КМЗ 2 (отм. +8.8); $T_{ПРФ}$ – температура на удалении более 8 м от границ КМЗ 1 (отм. +9.1).

Результаты корреляционно-регрессионного анализа, представленные в табл. 2, иллюстрируют полученные результаты о степени зависимости температуры ПП от температуры окружающей среды. Как видно из данных табл. 2, только для температуры на потолке ПРК коэффициент корреляции положительный и наиболее близок к значению 1. Значение показателя достоверности линейной аппроксимации подтверждает наличие слабой тенденции к росту температуры на потолке ПРК (металлической обшивке) с ростом температуры окружающей среды, который наблюдается в последние годы. Для остальных точек ПП данные, приведенные в табл. 2 (значения коэффициентов корреляции $|r| \leq 0,35$ и практически нулевые значения R^2) дают основание считать, что окружающая среда в целом не оказывает какое-либо существенное влияние на температуру бетона ПП.

Результаты оценки влияния непрерывного обогрева помещений объекта «Укрытие» на тепловой режим ПП показали, что его воздействие ощущается только вблизи устьев скважин, выходящих в помещения, смежные с зонами обогрева. В целом обогрев помещений может приводить к систематическому повышению температуры на периферийных участках от 0,5 до 2,0 °С.

На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что наблюдаемые временные реализации температуры ПП на разном удалении от КМЗ не связаны с изменениями температуры окружающей среды и/или непрерывным обогревом помещений объекта «Укрытие», а формируются под влиянием дополнительного источника тепла (ДИТ), который находится внутри КМЗ.

Для анализа формы временных зависимостей температуры бетона на разном удалении от границ КМЗ и удобства их сравнения среднегодовые показатели были нормированы на значение, рассчитанное для 1991 г. На полученную картину были наложены данные расчета временных характеристик мощности ОТВ топлива и среднегодовые показатели температуры окружающей среды. На рис. 4 представлена иллюстрация реализации такого подхода к анализу данных для точек, расположенных наиболее близко к границам КМЗ.

Как видно из рис. 4, динамика температуры вблизи КМЗ 1 и КМЗ 2 на фоне спада ОТВ топлива существенно отличается. Снижение температуры вблизи КМЗ 1 на протяжении всего периода наблюдений имеет явно меньшую скорость, чем падение мощности ОТВ топлива. К тому же в последние годы проявилась тенденция не только к стабилизации, но и незначительному росту темпера-

туры вблизи КМЗ 1. Для КМЗ 2 спад температуры до 2004 г. происходил даже с большей скоростью, чем падение ОТВ топлива (см. рис. 4), а затем также наметилась тенденция к росту температуры.

Считая, что влияние ДИТ на тепловой режим ПП выражается в частичной компенсации падения ОТВ топлива, а его происхождение обусловлено изменением тепловыделяющих свойств собственно самих ТСМ в КМЗ, была проведена оценка временных характеристик его мощности. На рис. 5 представлены результаты предварительной оценки мощности ДИТ для КМЗ 1, где наблюдается его наиболее выраженное влияние на температуру бетона. Полученные данные позволяют сделать одно-

значный вывод: вклад ДИТ в суммарное тепловыделение имеет тенденцию к постепенному росту.

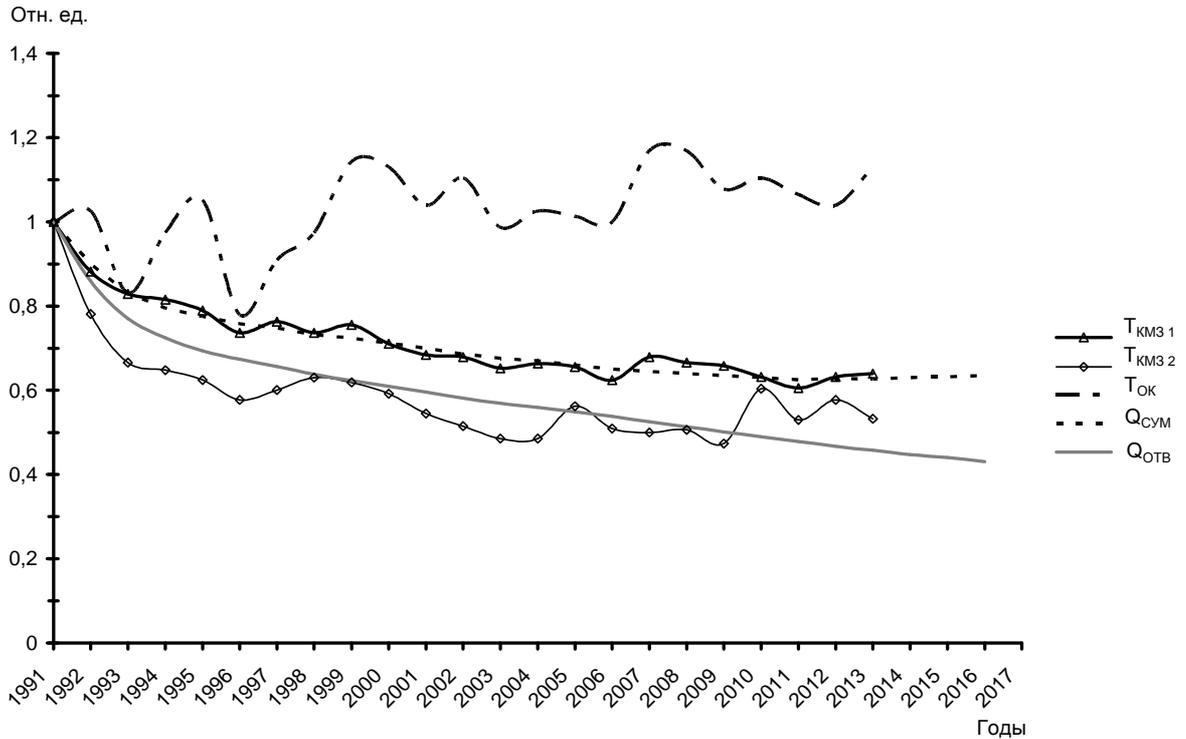


Рис. 4. Динамика температуры ПП вблизи границ КМЗ на фоне временных характеристик мощности ОТВ топлива ($Q_{\text{ОТВ}}$) и колебаний температуры окружающей среды ($T_{\text{ОК}}$): $T_{\text{КМЗ 1}}$ – температура вблизи границы КМЗ 1; $T_{\text{КМЗ 2}}$ – температура вблизи границы КМЗ 2; $Q_{\text{СУМ}}$ – оценка динамики мощности суммарного тепловыделения из КМЗ 1.

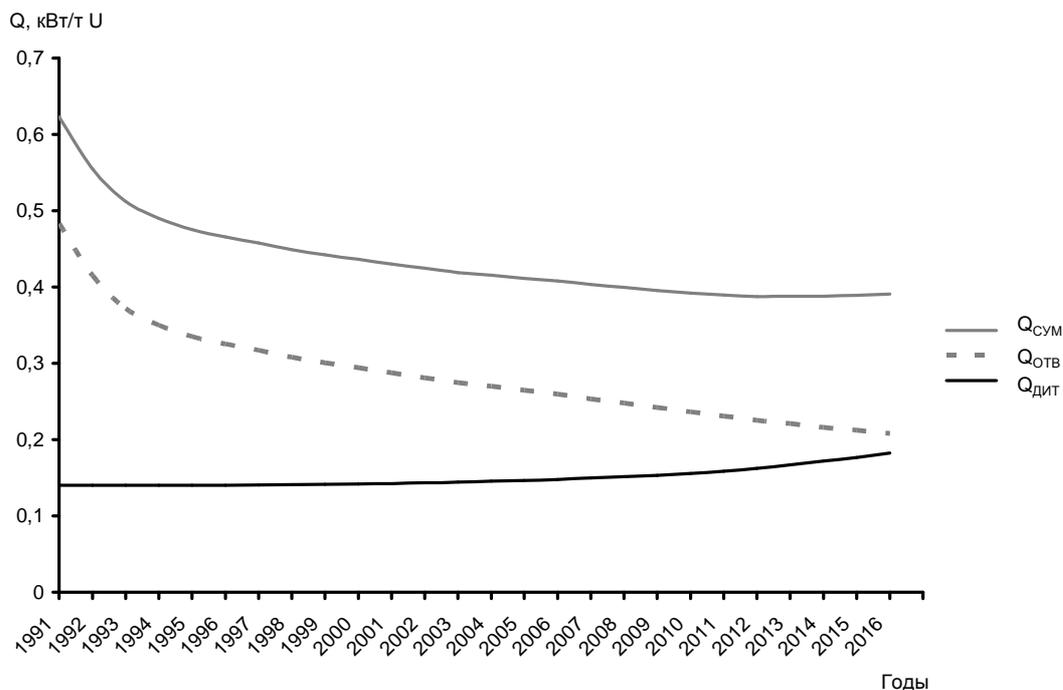


Рис. 5. Оценка временных характеристик мощности дополнительного источника тепловыделения ($Q_{ДИТ}$), частично компенсирующего падение ОТВ топлива. Обозначения $Q_{СУМ}$ и $Q_{ОТВ}$ соответствуют рис. 4. В первом приближении его мощность по сравнению с 1991 г. увеличилась почти в два раза (см. рис. 5). Для ТСМ со временем наблюдается аналогичный рост суммарной α -активности [6]. При этом падение числа нейтронов, образующихся при спонтанном делении ^{244}Cm и $^{240,242}\text{Pu}$, компенсируется значительным их ростом в результате нарастания α -активности ^{241}Am и последующей цепочки (α, n)-реакций на легких ядрах химических элементов (O, Si, Al, Mg, Na), входящих в состав ТСМ. Таким образом, увеличение мощности ДИТ может быть обусловлено только ростом удельной нейтронной активности и энергии вынужденного деления, что в итоге приводит к росту теплосодержания ТСМ.

Следует отметить, что детальный анализ и оценка влияния энергии вынужденного деления на суммарное тепловыделение из КМЗ является предметом дальнейших исследований.

Заключение

1. Воссоздана целостная картина динамики температуры ПП на различном удалении от границ КМЗ за период 1991 - 2013 гг.
2. Установлена тесная функциональная зависимость температуры бетона от расстояния до границ КМЗ и закономерность ее изменения со временем.
3. Показана роль температуры окружающей среды и дополнительного обогрева помещений объекта «Укрытие» в формировании теплового режима ПП. Проведена оценка градиентов температуры, которые обеспечивают функционирование механизма непрерывного теплосъема с поверхности ТСМ и рассеивание в окружающую среду тепловой энергии, генерируемой в КМЗ.
4. Выявлено наличие дополнительного внутреннего источника тепла, частично компенсирующего падение ОТВ топлива и определяющего текущую температуру бетона ПП.
5. Предложено объяснение природы дополнительного источника тепловыделения и дана предварительная оценка его вклада в мощность суммарного тепловыделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высотский Е.Д., Ключников А.А., Краснов В.А. Локализация ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2007. – Вип. 7. – С. 66—75.
2. Высотский Е.Д., Ключников А.А., Щербин В.Н., Шостак В.Б. Нейтронно-физические характеристики ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов // Там же. – 2009. - Вип. 12. – С. 93 – 102.

3. Ядерно-опасные скопления топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» / Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, А. В. Михайлов, В. Н. Щербин, В. Б. Шостак // Висновки і рекомендації: Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. «Двадцять п'ять років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього» (Київ, 20 - 21 квітня 2011 р.). – К.: КІМ, 2011. - Ч. 2. – С. 33 - 37.
4. Высотский Е.Д., Михайлов А.В. Температурные аномалии в зонах критмассового риска // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. – 2011. - Вып. 16. – С. 101 – 109.
5. Высотский Е.Д., Довыдьков А.И., Довыдьков С.А. и др. Анализ путей доступа к скоплениям топливосодержащих материалов в помещении 305/2 объекта «Укрытие». Ч. 2. Исследовательские скважины в подреакторном плите. – Чернобыль, 2011. – 36 с. – (Препр. / НАН Украины. ИПБ АЭС; 11-2).
6. 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.

Є. Д. Висотський, О. В. Михайлов, А. О. Дорошенко

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

ДИНАМІКА ТЕМПЕРАТУРИ ПІДРЕАКТОРНОЇ ПЛИТИ НА ФОНІ СПАДУ ЗАЛИШКОВОГО ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ ПАЛИВА В ЗОНАХ КРИТМАСОВОГО РИЗИКУ

Представлено методику і результати відновлення та аналізу довготривалої динаміки температури підреакторної плити в зонах локалізації ядерно-небезпечних скупчень. Показано, що на фоні спаду залишкового тепловиділення палива поточна температура в зонах локалізації може підтримуватися лише за рахунок додаткового джерела тепла. Запропоновано пояснення природи його походження і наведено попередню оцінку його вкладу в потужність сумарного тепловиділення. Установлено, що джерелом тепла, що частково компенсує падіння залишкового тепловиділення палива, може бути лише енергія вимушеного поділу, зростання якого обумовлене збільшенням інтенсивності виходу нейтронів (α, n)-реакцій на легких ядрах паливовмісних матеріалів при накопиченні ^{241}Am .

Ключові слова: динаміка температури, паливовмісні матеріали, залишкове тепловиділення, ядерно-небезпечні скупчення, нейтрони.

E. D. Vysotsky, O. V. Mikhailov, A. O. Doroshenko

Institute for NPP Safety Problems of UNAS, 36a, Kirova str., Chornobyl, 07270, Ukraine

DYNAMICS OF UNDER-REACTOR SLAB TEMPERATURE ON THE BACKGROUND OF FUEL AFTERHEAT DECREASE WITHIN CRITICAL MASS RISK ZONES

A procedure and restoration and analysis results of long-term dynamics of under-reactor slab temperature in localization zones of nuclear-hazardous clusters are presented. It is shown that on the background of fuel afterheat decrease, current temperature in localization zones could be maintained due to any additional heat source only. The explanation of the nature of an additional heat source is offered and the preliminary estimate of its contribution to the power of a total heat emission is given. It was stated that the induced fusion energy, whose growth is caused by increasing intensity of neutrons output of (α, n)-reactions on light nuclei of fuel-containing materials under ^{241}Am accumulation, could be a heat source compensating partially the afterheat decrease.

Keywords: dynamics of temperature, fuel-containing materials, afterheat, nuclear-hazardous cluster, neutrons.

REFERENCES

1. Vysotskii Ye.D., Kliuchnikov O.O., Krasnov V.O. Localization of nuclear-dangerous accumulations of fuel containing materials // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). - 2007. – Iss. 7. – P. 66 – 75. (Rus)
2. Vysotskii Ye.D., Kliuchnikov O.O., Shcherbin V.M., Shostak V.B. Neutron and physical characteristics of nuclear-dangerous accumulation of fuel containing materials // Ibid. – 2009. - Iss. 12. – P. 93 – 102. (Rus)
3. Nuclear-dangerous accumulations of fuel containing materials in Object "Shelter" / Ye. D. Vysotskii, O. O. Kliuchnykov, O. V. Mykhailov, V. M. Shcherbin, V. B. Shostak // Vysnovky i rekomendatsii: Materialy Mizhnar. nauk.- prakt. konf. «Dvadsat' piat' rokov Chornobyl'c'koi katastrofy. Bezpeka maibut'ogo» (Kyiv, 20 - 21 kvitnia 2011). – Kyiv: KIM, 2011. - Ch. 2. – P. 33 - 37. (Rus)
4. Vysotskii Ye.D., Mykhailov O.V. Temperature anomalies in zones of critical mass risk // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). – 2011. - Iss. 16. – P. 101 - 109. (Rus)
5. Vysotskii Ye.D., Dovydykov A.I., Dovydykov S.A. et al. Analysis of access paths to agglomeration of fuel-containing materials in object "Shelter" 305/2 room. Part 2. Research wells at under-reactor plate. – Chornobyl, 2011. – 36 p. – (Prepr. / NAS of Ukraine. IPB AES; 11-2). (Rus)

6. *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 / NAS of Ukraine. ISTC "Ukrytie". – Inv. № 2765. - Chernobyl, 1993. (Rus)*

Надійшла 20.02.2014
Received 20.02.2014