

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ АНОМАЛИИ В ЗОНАХ КРИТМАССОВОГО РИСКА

© 2011 г. Е. Д. Высотский, А. В. Михайлов

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

Приведены результаты исследований динамики температурных градиентов на периферии ядерно-опасных скоплений, расположенных в юго-восточном квадранте помещения 305/2 в зонах проплавления подреакторной плиты. Оценены характеристики источника тепла и приграничного слоя, отделяющего его от неразрушенной части подреакторной плиты. Сделан вывод о том, что количество топлива в скоплении, оцениваемое в 20 т, способно за счет остаточного тепловыделения поддерживать существующее термодинамическое равновесие с окружающими теплопроводящими средами.

Ключевые слова: топливосодержащие материалы, остаточное тепловыделение, градиент температуры, теплопроводность, изотермическая поверхность.

Методика исследований

Источником температурных полей в подреакторной плите (ПП) шахты реактора является ядерно-опасное скопление, локализованное в зоне критмассового риска – КМЗ 1 [1, 2]. Многолетние наблюдения за температурой на разном удалении от зоны проплавления подреакторной плиты в помещении 305/2 свидетельствуют о медленном остывании скопления топливосодержащих материалов (ТСМ).

В настоящее время температура вокруг ядерно-опасного скопления в зоне проплавления ПП измеряется с помощью двух независимых систем «Финиш-И» (Ф-И) и «Финиш-Р» (Ф-Р). Выборка данных для исследования динамики и градиентов температуры в ПП и шахте реактора была сформирована из результатов измерений, полученных в период 2007 - 2010 гг. с помощью 33 датчиков из состава Ф-И и четырех датчиков из состава Ф-Р (рис. 1). В нумерации датчиков Ф-Р после их собственного порядкового номера в скобках указан номер измерительного канала. Динамика среднесуточной температуры окружающей среды вокруг объекта «Укрытие» анализировалась по данным метеостанции, расположенной в Чернобыле.

В теплофизической модели КМЗ были приняты следующие допущения:

источник тепла сконцентрирован в нижней части зоны проплавления бетона ПП и представляет собой плоский цилиндр объемом 17 м^3 , высотой 0,9 м и диаметром 2,5 м [2];

источник тепла со всех сторон окружен теплопроводящей средой, состоящей из нескольких слоев, существенно отличающихся по толщине и теплофизическим свойствам друг от друга;

теплопроводность материалов каждого слоя, одинакова по его толщине и не зависит от направления относительно источника тепла;

тепловой режим источника тепла – квазистатический: нагрев постоянный и равномерный по объему. Количество тепла, выделяемое в единицу времени и передаваемое в окружающую среду через единицу площади поверхности источника тепла, одинаково во всех направлениях и пропорционально массе топлива, среднегодовое удельное остаточное тепловыделение которого составляет 0,27 кВт/т урана.

В основу методики исследования тепловых потоков на периферии КМЗ была положена реализация принципа непрерывности теплопередачи на границе двух сред (теорема Фурье). Для расчета интеграла тепла, излучаемого источником тепла, использовались стандартные понятия изотермических поверхностей и градиентов температур в теплопроводящих средах [3, 4]. Характеристики тепловых потоков определялись по градиентам температур вокруг источника тепла для восьми азимутальных направлений.

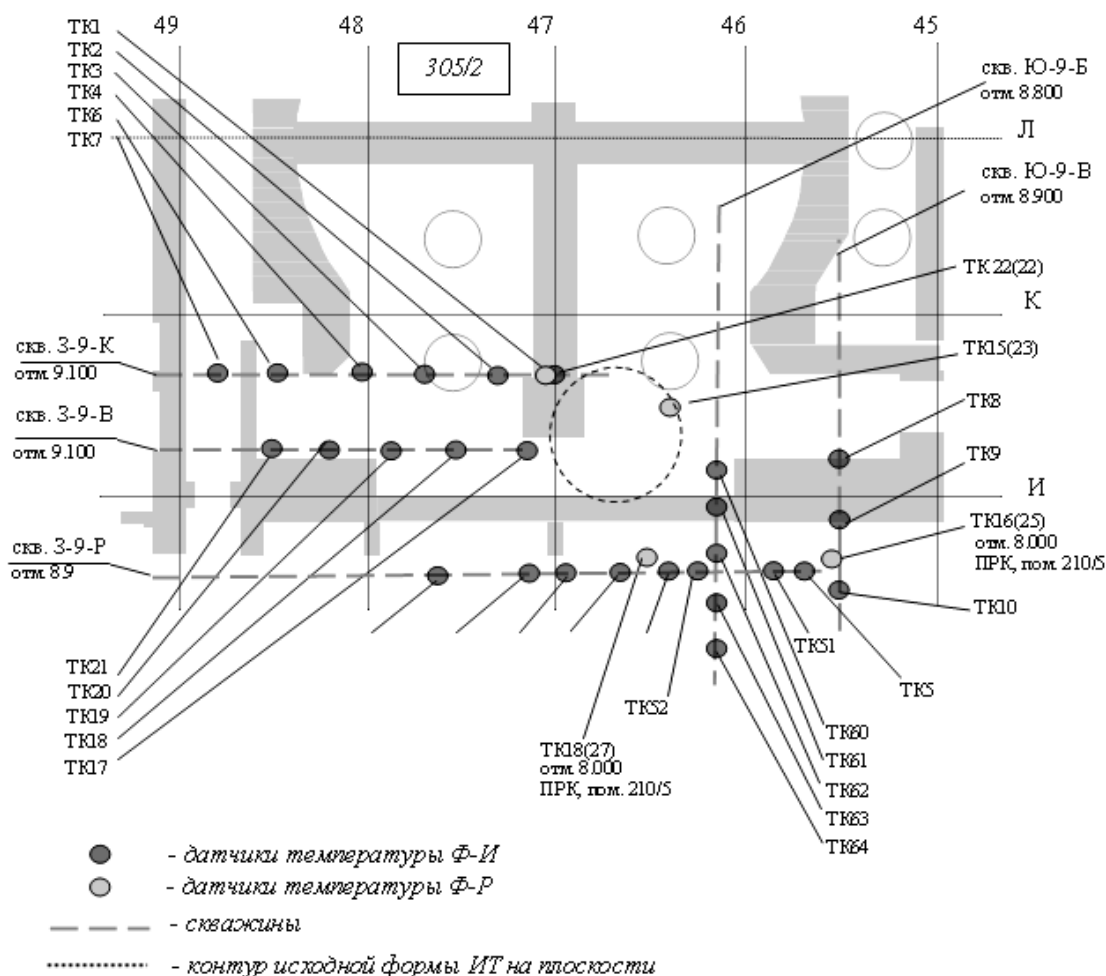


Рис. 1. Размещение в скважинах точек контроля температуры ПП вокруг источника тепла (ИТ). Проекция установочных координат на плоскость отметки 9.100.

Температура ПП и окружающей среды

Для целей сравнительного анализа в качестве характеристики температуры ПП вблизи скопления ТСМ была выбрана точка контроля ТК17 как наиболее близкая к его границе и не заливаемая подогретой водой из зоны проплавления (рис. 1). Для характеристики температуры на потолке парораспределительного коридора (ПРК) использовалась точка контроля ТК18(27). Температура в шахте реактора (на отметке 34.500) оценивалась по показаниям датчика ТК55.

Полученные данные свидетельствуют о том, что на протяжении всего периода наблюдений независимо от сезонных колебаний по абсолютному значению наблюдается четкая картина устойчивых градиентов температуры между окружающей средой, шахтой реактора и бетоном ПП (рис. 2). Средние значения градиентов за 2007 – 2010 гг. составили: «окружающая среда – шахта» - 0,2 °С; «окружающая среда - бетон ПП» - 16,2 °С; «бетон ПП - потолок ПРК» - минус 6,9 °С. Температура в шахте с календарным сдвигом в 1 мес практически полностью повторяет температуру окружающей среды. При этом минимум температуры внутри шахты достигается в январе - феврале, а максимум - в июле - августе. Для бетона ПП и потолка 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 шахте реактора составляет 2 мес, а от окружающей среды – 3 мес.

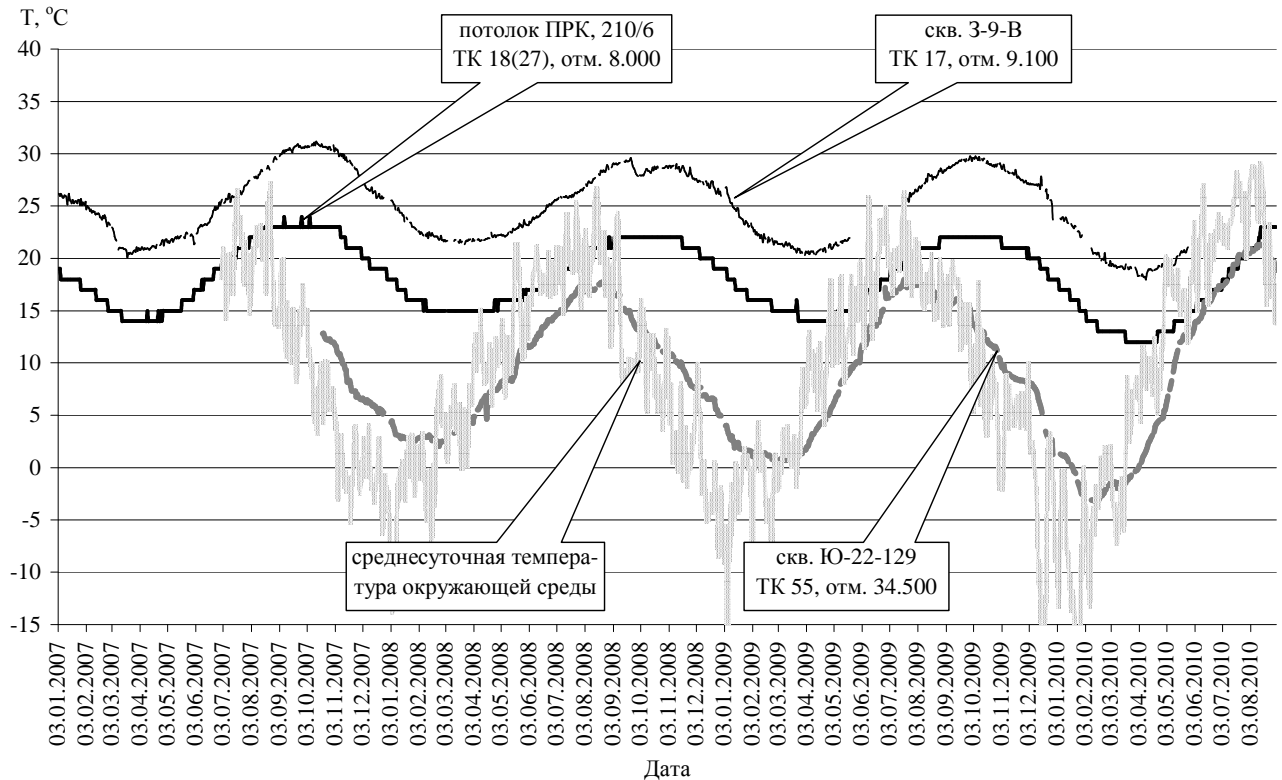


Рис. 2. Динамика температуры в объекте «Укрытие» на разных высотных отметках в сравнении со среднесуточной температурой окружающей среды.

Таким образом, действие законов термодинамики обеспечивает непрерывный тепло-съем с поверхности источника тепла и рассеивание в окружающую среду тепловой энергии, генерируемой в КМЗ, препятствуя тем самым постепенному ее накоплению и повышению температуры скопления за счет остаточного тепловыделения топлива. Наблюдаемые градиенты температуры между ПП, шахтой реактора и окружающей средой обеспечивают тепло-передачу, формируя в итоге температурный режим, наблюдаемый на периферии ядерно-опасного скопления.

Характеристика динамики температуры ПП

Динамика температуры бетона ПП исследовалась по сечению скважин, в которых установлены измерительные датчики. Градиенты температур оценивались между соседними точками контроля и среднегодовыми значениями температур, характерными за период 2007 - 2010 гг. для точек на разном удалении от КМЗ.

Анализ данных измерений показал, что динамика среднесуточной температуры ПП вокруг источника тепла на фоне устойчивой тенденции к повторяемости чередования минимумов и максимумов температуры в одни и те же календарные периоды может иметь особенности двух типов:

динамика А с плавным характером изменения температуры в радиальном направлении (рис. 3);

динамика Б с наличием бессистемных пилообразных «выбросов» большой амплитуды от 4,3 до 8,3 °С (среднее 5,4 °С), одновременно наблюдаемых по всей длине скважины (рис. 4).

Временные зависимости типа Б обусловлены периодическим затоплением скважин подогретой водой, поступающей из области, имеющей более высокую температуру, чем бетон. Такой областью при отсутствии других источников тепла может быть только скопление

ТСМ. При движении по скважине вода остывает и ее температура падает. Падение температуры оценивается значениями в интервале от 0,8 до 1,2 °С/м.

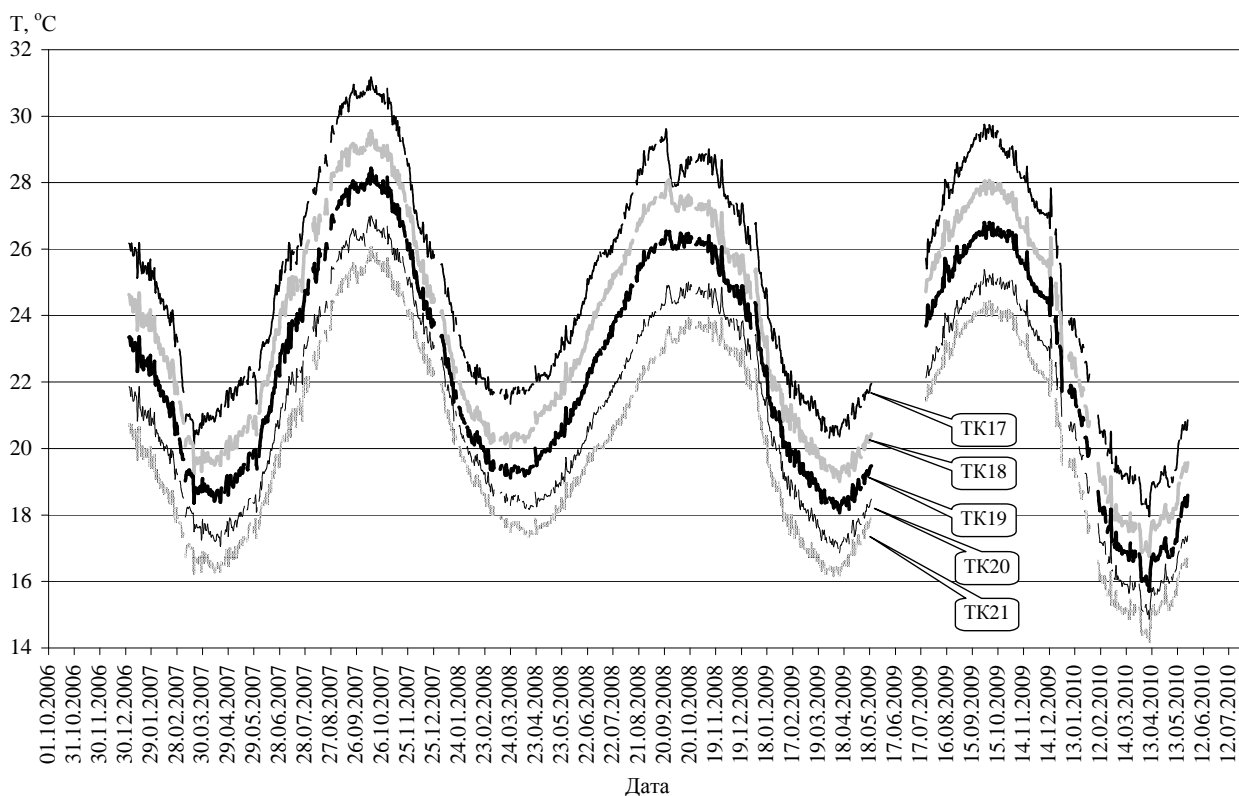


Рис. 3. Пример динамики температуры ПП в сухой скважине (динамика по типу А).

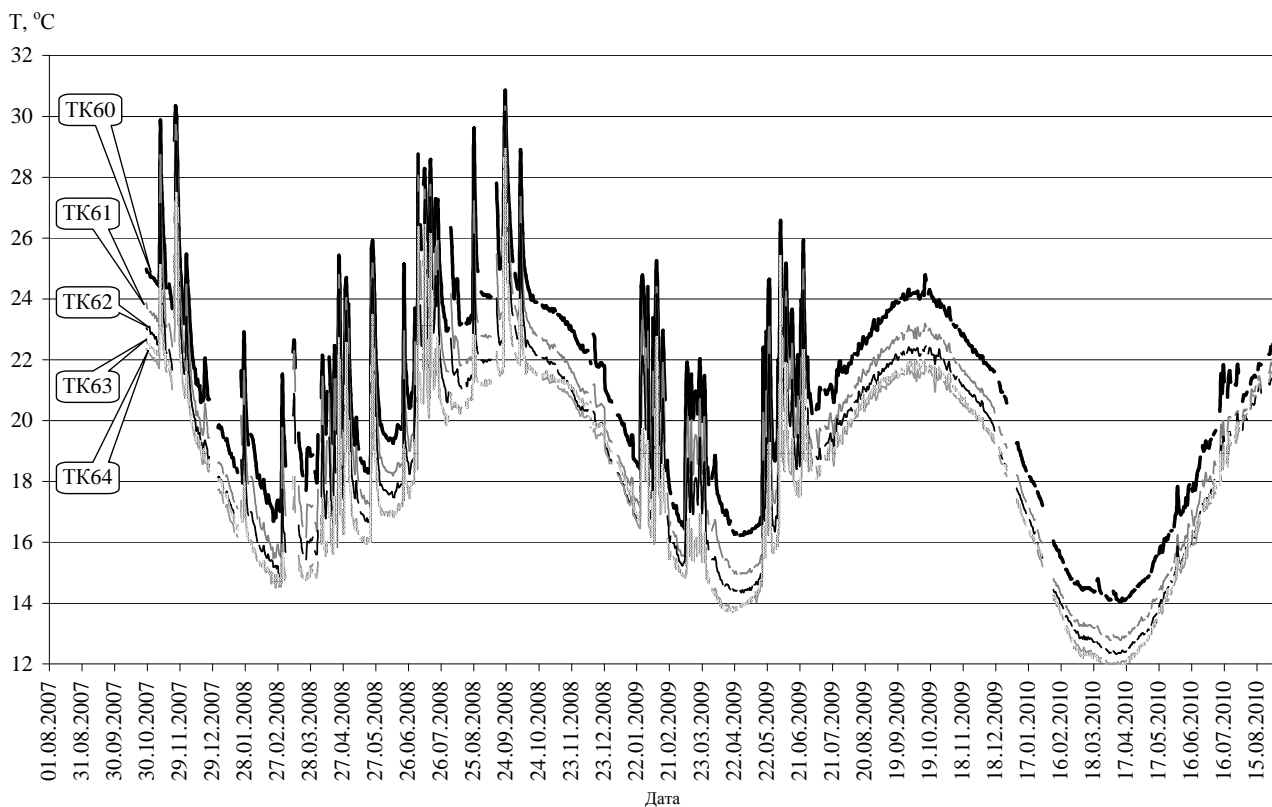


Рис. 4. Пример динамики температуры ПП при затоплении скважины водой (динамика по типу Б).

Детальный анализ данных, полученных для точек контроля температуры по сечению скважин, показал, что в радиальном направлении относительно границ скопления ТСМ наблюдается четкая картина устойчивых градиентов температур с малой вариабельностью средних значений (от 4,2 до 7,2 %) независимо от сезонных колебаний температуры по абсолютному значению. Зависимость температуры бетона от расстояния в радиальном направлении имеет плавно спадающий характер по мере удаления от источника тепла. Падение температуры с расстоянием находится в интервале значений: от 0,60 до 1,68 °С/м – для западного и юго-западного направлений; от 0,65 до 1,34 °С/м – для восточного направления; от 0,42 до 1,54 °С/м - для юго-восточного и южного направлений. Более быстрое падение температуры наблюдается в пределах 2 м от источника тепла, более медленное – на удалении от 6 до 10 м.

Полученные результаты вполне согласуются с теорией непрерывности тепловых потоков в однородной среде при переходе от одной изотермической поверхности к другой, имеющей большую площадь при удалении от источника тепла. При этом закономерность падения температуры с расстоянием нарушается только для датчиков, наиболее удаленных от периферии скопления (более 10 м), и только в определенные календарные сроки. Это вызвано тем, что в эти периоды времени влияние на точки контроля радиальных потоков тепла от ТСМ снижается настолько, что начинают доминировать другие источники тепла, находящиеся поблизости от них. К их числу относятся и принудительный обогрев помещений, который регулярно используется в объекте «Укрытие».

Оценка степени равномерности теплового излучения по вертикали была проведена для двух групп датчиков, имеющих близкие координаты в горизонтальной плоскости на разных высотных отметках (см. рис. 1). Было получено, что на протяжении всего периода наблюдений данные в группах демонстрируют высокую степень сходимости (табл. 1, рис. 5) и свидетельствуют о том, что точки контроля на отметках 8.000 и 8.900 принадлежат одной изотермической поверхности.

Таблица 1. Среднегодовые температуры в двух группах сравниваемых точек контроля, °С

Период	Группа 1			Группа 2		
	ТК53	ТК54	ТК18(27)	ТК9	ТК10	ТК16(25)
2007	-	-	18,9	16,4	17,7	17,9
2008	20,3 ¹⁾	20,4 ¹⁾	19,5 ¹⁾	16,5	16,9	17,5
2009	18,6	18,6	18,3	16,5	16,8	17,3
2010 ²⁾	15,5	15,7	15,8	13,6	13,7	14,8
2007 - 2010 гг.	18,4	18,4	18,0	16,0	16,6	17,0

¹⁾ За период апрель - декабрь 2008 г. после включения датчиков ТК53 и ТК54.

²⁾ За период январь - август 2010 г.

На основании полученных данных можно утверждать:

в бетоне вокруг ТСМ наблюдаются устойчивые во времени градиенты температур, обеспечивающие необходимые термодинамические условия для непрерывного теплосъема с изотермической поверхности мощного и стабильного источника теплового излучения;

динамика температуры по типу Б, выявленная для скважин на отметке 8.800, является доказательством того, что источник тепла находится в воде, уровень которой находится не ниже этой отметки;

наличие «всплесков» в динамике температуры и сезонные колебания их амплитуды по абсолютному значению являются доказательством того, что уровень воды в зоне размещения источника тепла постоянно пополняется за счет атмосферных осадков, температура которых адекватна температуре окружающей среды соответствующего календарного периода;

амплитуда «всплесков» температуры может рассматриваться как индикатор температуры вблизи изотермической поверхности источника тепла, а ее абсолютное значение отно-

сительно плавной огибающей температуры бетона может служить консервативной оценкой существующего градиента температуры в слое разрушенного бетона приграничного к внешней поверхности скопления ТСМ.

совпадение данных по температуре в точках, отстоящих от границы источника тепла на примерно одном и том же расстоянии, но относящихся к разным высотным отметкам (8.000 и 8.800 - 8.900), свидетельствует о том, что внешняя изотермическая поверхность скопления ТСМ является цилиндрической и существенно не отличается от наших модельных представлений о КМЗ.

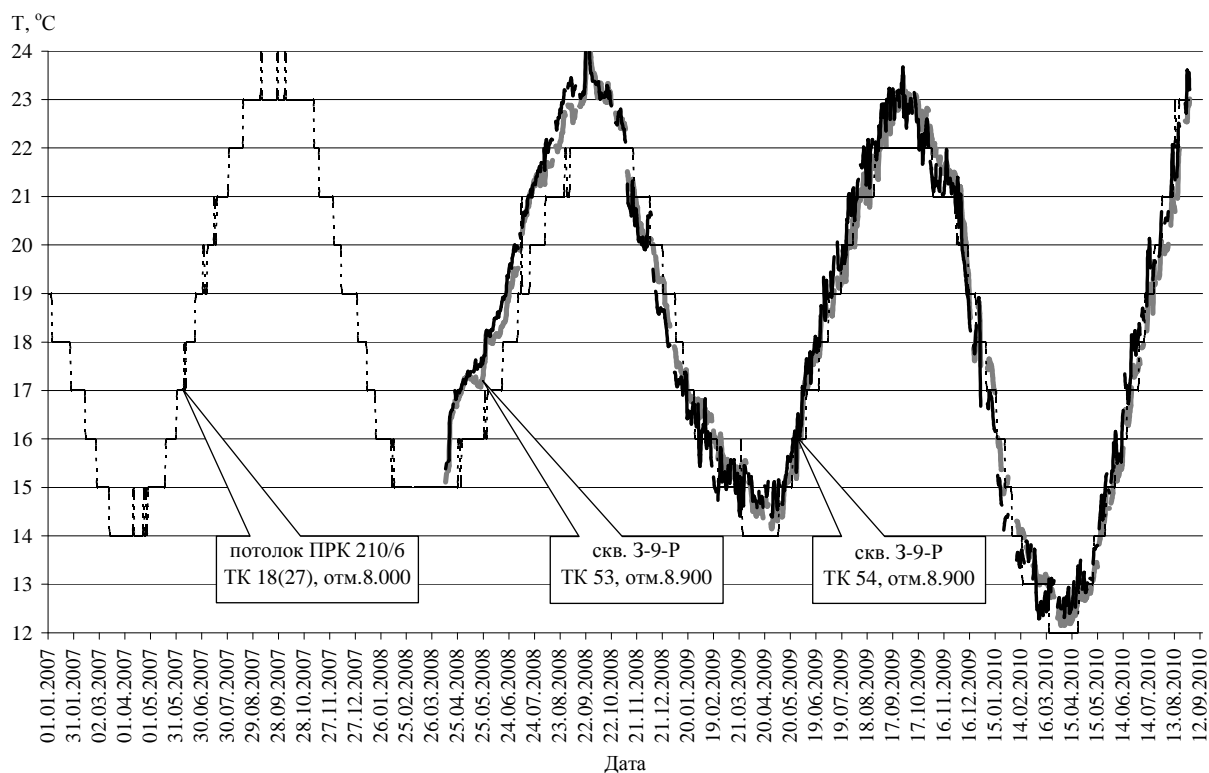


Рис. 5. Пример совпадения температур в точках контроля, отстоящих от границы источника тепла на одинаковых расстояниях в радиальном и вертикальном направлениях.

Температура приграничного слоя

В качестве «приграничного слоя» рассматривался слой из термически деструктурированного бетона, пропитанного водой и который непосредственно контактирует с внешней поверхностью источника тепла. Прогноз температуры в приграничном слое производился в предположении, что его средняя температура совпадает с температурой воды, которая заполняет свободное пространство, просачивается в скважины и вносит скачкообразные искажения в показания измерительных датчиков (динамика по типу Б). На основании результатов оценки амплитуды «всплесков» было принято, что температура приграничного слоя выше температуры бетона ПП в среднем на 5,4 °С, а максимально - на 8,3 °С.

Степень корректности полученных прогнозных значений температуры в приграничном слое была оценена в период активного проявления «всплесков» и размещения точки контроля ТК22(22) в положении наиболее близком к границе скопления (май - октябрь 2008 г.). На рис. 6 видно, как температура в ТК60 при попадании в скважину Ю-9-Б подогретой воды стремится на острие «всплеска» к значению температуры в ТК22(22).

Проведенные количественные оценки достоверности прогноза для 11 характерных точек («всплесков», см. рис. 6) показали, что только в одном случае данные прогноза разошлись с результатами измерений более чем на 3 °С. Для остальных событий совпадение находилось в интервале от минус 2,8 до плюс 0,7 °С.

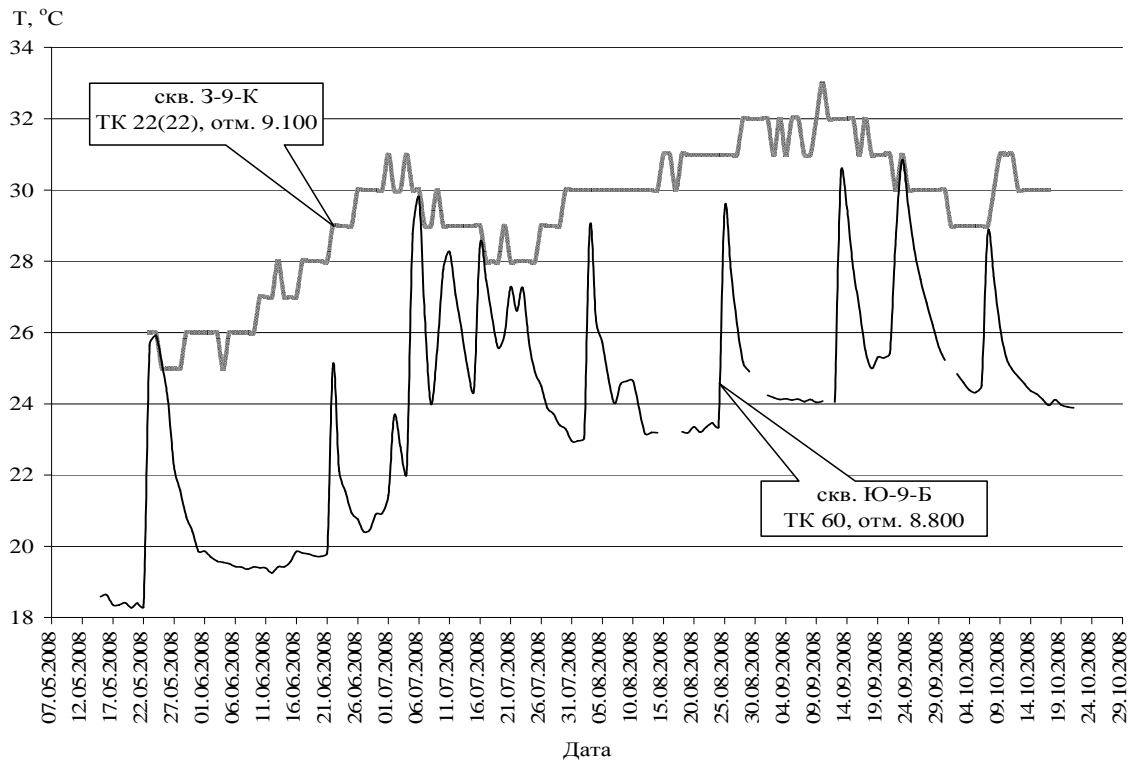


Рис. 6 Динамика температуры в затопленной водой скважине (ТК60) и приграничном слое (ТК 22(22)).

На основании полученных результатов можно предположить: приграничный слой между источником тепла и бетоном находится постоянно в воде и имеет температуру не ниже 35 °С;

наличие тенденции к падению амплитуды «всплесков» с понижением температуры окружающей среды является прямым следствием процесса разбавления горячей воды, в которую погружен источник тепла, водой из других водных скоплений в объекте «Укрытие», периодически сбрасываемой в помещение 305/2 и имеющей более низкую температуру.

Проведенные оценки температуры приграничного слоя были весьма консервативны и не учитывали нюансов теплопередачи в системе «пористое твердое тело - вода». Считалось, что амплитуда «всплеска» температуры в скважине, связанная с появлением воды, и есть средняя температура этого слоя. Поэтому вполне вероятно, что истинное значение температуры может быть выше.

Характеристики теплопроводящих слоев

Для оценки характеристик теплопроводящих слоев вокруг источника тепла были построены изотермические границы в форме тонкостенных цилиндрических поверхностей в бетоне, на границах «бетон - приграничный слой» и «приграничный слой - ТСМ». Значения теплофизических характеристик теплопроводящих сред принимались согласно [5] и данным табл. 2.

Основной целью было определить, при каких геометрических и теплопроводящих характеристиках сред, непосредственно контактирующих с наружной поверхностью скопления ТСМ, как источника тепла и температур, регистрируемых в контрольных точках системой «ФИНИШ», масса урана в скоплении не будет существенно отличаться от 20 т.

Характеристики приграничного слоя оценены для отметки 9.100 и двух значений температуры. Полученные результаты приведены в табл. 3 вместе со значением массы топлива в скоплении (M_U) и параметрами тепловых потоков (интегрального Q и удельного q), соответствующими его остаточному тепловыделению.

Таблица 2. Теплофизические характеристики теплопроводящих сред

Материал среды	Характеристика	Единица измерения	Числовое значение
Железобетон (плита перекрытия)	Теплопроводность	Вт/(м·К)	2,0
	Теплоемкость	Дж/(кг·К)	840
	Плотность	кг/м ³	2200 - 2400
Бетон высушенный (ПП)	Теплопроводность	Вт/(м·К)	1,5
	Теплоемкость	Дж/(кг·К)	840
	Плотность	кг/м ³	1600
Деструктурированный железобетон	Теплопроводность	Вт/(м·К)	0,5
	Теплоемкость	Дж/(кг·К)	840
	Плотность	кг/м ³	1600
Вода	Теплопроводность	Вт/(м·К)	0,6
	Теплоемкость	Дж/(кг·К)	4183
	Плотность	кг/м ³	998,2

Таблица 3. Характеристики приграничного слоя

Толщина, м	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Расчетный параметр	Температура, °С	
			T _{ср} = 35	T _{макс} = 38
0,10	0,60	M _ц , кг	20250	-
		Q, Вт	5467	-
		q, Вт/м ³	321	-
0,12	0,56	M _ц , кг	-	20360
		Q, Вт	-	5495
		q, Вт/м ³	-	323

Выводы

1. Тепловой режим ПП определяется наличием в юго-восточном квадранте подреакторного помещения 305/2 источника тепла, мощность которого эквивалентна остаточному тепловыделению топлива с не менее 20 т урана.
2. Источник тепла вместе с приграничным слоем удовлетворительно совпадает с плоским цилиндром, объем которого около 20 м³, диаметр 2,5 м, высота 0,9 м.
3. Источник тепла постоянно находится в воде, сброс которой происходит периодически через скважины при превышении ее уровня высоты отметок 8.800 – 9.100.
4. Температура воды, измеряемая датчиками в период сброса, соответствует средней температуре приграничного слоя, разделяющего источник тепла и неразрушенный бетон ПП.
5. Характеристики слоя приграничного к источнику тепла на отметке 9.100 соответствуют термически деструктурированному бетону, близкому по теплопроводящим свойствам к шлакобетону, пропитанному водой, и не противоречат данным исследования кернов из забоев скважин.

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. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. Изд.3-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 483 с.

4. Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических процессов: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1982. – 240 с.
5. Техническое обоснование ядерной безопасности объекта "Укрытие" (ТОЯБ) / ИАЭ им. И. В. Курчатова. - М., 1990. – 130 с. (Архив МНТЦ «Укрытие» НАН Украины, № 1605).

ТЕМПЕРАТУРНІ АНОМАЛІЇ В ЗОНАХ КРИТИЧНОГО РИЗИКУ

Є. Д. Висотський, О. В. Михайлов

Наведено результати досліджень динаміки температурних градієнтів на периферії ядерно-небезпечних скупчень, розташованих у південно-східному квадранті приміщення 305/2 в зонах проплавлення підреакторної плити. Оцінено характеристики джерела тепла та прикордонного шару, що відокремлює його від незруйнованої частини підреакторної плити. Зроблено висновок про те, що кількість палива в скупченні, що оцінюється в 20 т, здатне за рахунок залишкового тепловиділення підтримувати існуючу термодинамічну рівновагу з оточуючими теплопровідними середовищами.

Ключові слова: паливовмісні матеріали, залишкове тепловиділення, градієнт температури, теплопровідність, ізотермічна поверхня.

TEMPERATURE ANOMALIES IN ZONES OF CRITICAL MASS RISK

E. D. Vysotskiy, O. V. Mikhailov

The results of studies of the dynamics of temperature gradients on the periphery of dangerous nuclear clusters located in the southeast quadrant room 305/2 in the areas of penetration of the under-reactor slab. Evaluated the characteristics of the heat source and the boundary layer that separates it from not destroyed part of under-reactor slab. Concluded that the amount of fuel in the cluster, estimated at 20 tones, is capable of due to residual heat to maintain the existing thermodynamic equilibrium with the heat-conducting environments.

Keywords: fuel-containing materials, the residual heat, the temperature gradient, thermal conductivity, isothermal surface.

Поступила в редакцію 22.02.11