



НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
МІЖГАЛУЗЕВИЙ  
НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР  
"УКРИТТЯ"

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE  
INTERDISCIPLINARY  
SCIENTIFIC AND TECHNICAL CENTRE  
"SHELTER"



MNTTs

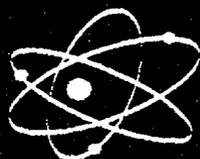
UA9800049

Препринт 97-3

П.И.Ананич, В.Н.Герасько, С.И.Гульник, С.Г.Мандик,  
С.Н.Сикорин, Н.А.Тетерева, В.Н.Щербин

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ  
ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ СИСТЕМЫ ПЫЛЕ-  
ПОДАВЛЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ ОБЪЕКТА "УКРЫТИЕ"

29-21



ЧОРНОБИЛЬ 1997

**Расчетные исследования по обоснованию ядерной безопасности при работе системы пылеподавления в помещениях объекта "Укрытие" / Ананич П.И., Герасько В.Н., Гульник С.И. и др. - Чернобыль, 1997. - 23 с. - (Препр./ НАН Украины. Межотрасл. науч. - техн. центр "Укрытие"; 97-3).**

Проанализированы исходные данные и выбраны модели топливосодержащих масс в центральном зале и подреакторных помещениях объекта "Укрытие". Изложены принципы проведения анализа и приведены результаты расчетных исследований по обоснованию ядерной безопасности при работе системы пылеподавления.

Табл. 23. Список лит.: с. 20 (36 назв.).

**The calculation investigation on base of the nuclear safety with the work of dusterpression system in the room of "Shelter" / Ananich P.I., Gerasko V.N., Gulnik S.I. et al. - Chernobyl, 1997. - 23 p. - (Prepr./ National Academy of Sciences of Ukraine. Interdisciplinary scientific and technical centre "Shelter"; 97-3).**

Were made the analyses of the data and chosen the models of the fuel mass in the central hall and underreactor room of object "Ukrytie". Present the principles of the analyses and the results of calculation on base of the nuclear safety with the work of dusterpression system.

23 tabs., 36 refs.

Утверждено к печати научно-техническим советом  
Межотраслевого научно-технического центра "Укрытие" НАН Украины

## **1. Модели топливосодержащих масс, использовавшиеся при анализе ядерной безопасности работы системы пылеподавления**

Для получения исходных данных, необходимых для анализа ядерной безопасности при работе системы пылеподавления, были изучены имеющиеся материалы с результатами исследований топливосодержащих масс (ТСМ) в центральном зале (ЦЗ) и подреакторных помещениях (ПП) объекта "Укрытие". За основу были взяты работы [1 - 17], в которых обобщены результаты исследований ТСМ, в том числе и новая информация, накопившаяся за последние годы.

На момент аварии 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) в его активной зоне находилось 190,3 т урана. Кроме того, в бассейне выдержки отработавшего топлива размещалось около 19,4 т урана (облученное топливо) и в ЦЗ - около 2,3 т урана (свежее топливо).

Исследования, проведенные в разрушенных помещениях, показали, что топливо после аварии находится в четырех модификациях: в виде фрагментов активной зоны, т.е. в том виде, в котором оно было загружено в реактор; в диспергированном виде, как пыль и аэрозоли; в переплавленном состоянии, т.е. в виде лавообразных ТСМ; в виде водных растворов солей урана. К настоящему времени было обнаружено всего несколько десятков технологических каналов (ТК) из 1659, находившихся в реакторе. Количество топлива в этой модификации не известно. Количество топлива, находящегося в диспергированном виде, составляет около 15 т урана. О количестве топлива в лавообразных ТСМ в настоящее время имеется два мнения. По первому мнению [2,10,12,14], в лавообразных ТСМ находится около 60 %, по второму [4,15-17] - около 10 % загрузки реактора на момент аварии. В водных растворах содержится несколько килограммов урана. Оставшаяся часть топлива, если считать, что выброс урана за пределы 4-го блока ЧАЭС не превысил 4 % загрузки на момент аварии [18], должна находиться в ЦЗ и других помещениях верхних этажей объекта "Укрытие".

На основе рассмотренных материалов были составлены модели размещения ТСМ в ЦЗ и ПП. При выборе моделей ТСМ ограничились минимальным количеством принципиально реализуемых композиций, отражающих состояние ТСМ по имеющейся на сегодняшний день информации.

Ниже приведены описания созданных моделей. Имеющуюся в ЦЗ структуру разбивали на три слоя: нижний - бетонный пол ЦЗ; средний - композиция, содержащая ТСМ; верхний - засыпка из песка. Предполагаем, что бетонный пол в ЦЗ не разрушен. Толщина пола составляет 1 м. Средний слой представлялся в виде композиций (вариантов структуры): 1) решетка активной зоны реактора РБМК (технологические каналы в графитовой кладке); 2) решетка ТК реактора РБМК в засыпке из песка; 3) решетка тепловыделяющих сборок (ТВС) реактора РБМК в засыпке из песка; 4) решетка твэлов реактора РБМК в засыпке из песка; 5) гомогенная смесь топлива реактора РБМК с песком. Для композиций 1 и 2 рассматривались два варианта состава ТК: в каналах сохраняются неизменными число, состав и расположение твэлов; в результате разрушения твэлов топливом высыпалось внутрь канала и заполнило его. Высоту этого слоя принимали равной 342,8 см, так как при выбросе ТВС из активной зоны наиболее вероятен разрыв кассет в месте их конструктивного соединения.

Основные параметры ТК, ТВС и твэлов реактора РБМК принимаем в соответствии с работами [19 - 21].

Графитовая кладка реактора РБМК собрана из блоков сечением 250 x 250 мм с плотностью графита 1,65 г/см<sup>3</sup>. Блоки по вертикальной оси имеют сквозные отверстия диаметром 114 мм, предназначенные для размещения ТК.

Часть ТК, размещенная в активной зоне, изготовлена из циркониевого сплава Zr + 2,5 % Nb и представляет собой трубу диаметром 88 мм с толщиной стенки 4 мм. На трубу надеты графитовые кольца толщиной 10 мм. Внутри канала устанавливается тепловыделяющая кассета, представляющая собой две последовательно соединенные ТВС диаметром 79 и длиной 3500 мм каждая. Конструктивный зазор между ТВС составляет около 20 мм. ТВС состоит из 18 стержневых твэлов, которые крепятся с помощью стальных дистанционирующих решеток на центральной трубе, изготовленной из циркониевого сплава размером 15 x 1,25 мм. Внутри нее проходит либо несущий стержень диаметром 12 мм, либо несущая труба размером 12 x 2,5 мм из циркониевого сплава. Твэл представляет собой трубку наружным диаметром 13,6 с толщиной стенки 0,825 мм из циркониевого сплава Zr+1 % Nb, заполненную таблетками диаметром 11,5 мм из двуоксида урана плотностью до 10,5 г/см<sup>3</sup> с обогащением 2 % по <sup>235</sup>U. Высота топливного столба 3428 мм. Твэлы

разбиты на две группы по 6 и 12 штук в каждой, причем центры твэлов каждой группы находятся на расстоянии 16 и 31 мм соответственно от оси симметрии ТК. Масса урана в ТК 114,7 кг.

Гетерогенные структуры для композиций 1 - 4 представляли в виде квадратной решетки в диапазоне от плотной упаковки указанных элементов до некоторого шага между ними. Гомогенную структуру 5 также рассматривали в пределах от чистого топлива до некоторого отношения объемных долей топлива и песка. В процессе выполнения расчетов для указанных структур определялся оптимальный (по величине коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде) шаг расстановки элементов в решетке или оптимальное соотношение компонентов в гомогенной среде.

Верхний слой представляли в виде засыпки из песка плотностью  $1,3 \text{ г/см}^3$  (с учетом пористости 35 % об.) [19,22]. Толщину слоя принимали равной 1 м.

При расчете размножающих систем конечных размеров в качестве бокового отражателя рассматривался слой песка толщиной 1 м.

В подреакторных помещениях опасность представляет скопление топлива в помещении 305/2. Критичность (в том числе эффективный коэффициент размножения нейтронов 0,95) при заливе лавообразных ТСМ (ЛТСМ) водой в других помещениях недостижима [23 - 25].

Модель размещения ЛТСМ в помещении 305/2 строилась для юго-западного и юго-восточного квадрантов.

Учитывалось, что плотность ЛТСМ в значительной степени определяют газовые пустоты и материал ЛТСМ неоднороден по высоте (по пористости, содержанию включений и т.д.). Считалось, что в слое ЛТСМ могут содержаться также непереплавленные фрагменты твэлов, причем как в квазигомогенной, так и в гетерогенной структурах.

В юго-западном квадранте ЛТСМ по высоте разбивалась равномерно на три слоя, плотности которых указаны в табл.1 [25]. Высота ЛТСМ составляла 0,8 м. Массовое содержание топлива в ЛТСМ составляло 10 % мас. (гомогенная смесь) [10,12]. Нуклидный состав ЛТСМ представлен в табл.2 [10,12]. Считалось, что бетонный пол в этом квадранте неструктурирован (кроме слоя тепловой изоляции). Полагалось, что над ЛТСМ располагается слой бетона толщиной 0,5 м ("свежий" бетон). Также рассматривался вариант с размещением в первом и втором слоях трехслойных ЛТСМ в квазигомогенной смеси непереплавленных топливных таблеток, состав системы указан в табл.3.

В юго-восточном квадранте ЛТСМ по высоте разбивались равномерно на три слоя, плотности которых указаны в табл.4 [25]. Высота ЛТСМ составляла 0,8 м (без смеси ТСМ с бетоном). Массовое со-

Таблица 1. Плотность ЛТСМ в юго-западном квадранте помещения 305/2

Слой *	1	2	3
Плотность**, г/см <sup>3</sup>	2,8	2,2	1,6

- \* Нумерация слоев начинается от пола.
- \*\* Плотность определена при массовом содержании в ЛТСМ топлива 10 %.

Таблица 2. Нуклидный состав ЛТСМ в юго-западном квадранте помещения 305/2

Нуклид	B *	O	Na	M g	Al	Si
Содержание, % мас.	0,07	37,13	4,0	4,0	3,5	30,9
Нуклид	K	Ca	Fe	Zr	U+Pu **	
Содержание, % мас.	1,26	4,7	0,84	4,8	8,8	

- \* При проведении расчетов наличие B в ЛТСМ не учитывалось.
- \*\* Массовое содержание в ЛТСМ топлива 10 %.

Таблица 3. Состав ТСМ в юго-западном квадранте помещения 305/2 при размещении в ЛТСМ топливных таблеток

Слой *		1	2	3
Состав, % об.	ЛТСМ	84,5	92,3	100
	таблетки	15,5	7,7	0

- \* Нумерация слоев начинается от пола.

Таблица 4. Плотность ЛТСМ в юго-восточном квадранте помещения 305/2

Слой *	1	2	3
Плотность**, г/см <sup>3</sup>	2,2	2,0	1,8

- \* Нумерация слоев начинается от деструктурированного бетона (смеси ЛТСМ и бетона).
- \*\* Плотность определена при массовом содержании в ЛТСМ топлива 5 %.

держание топлива в ЛТСМ считалось равным 5 % мас. (гомогенная смесь) [10,12]. Нуклидный состав ЛТСМ представлен в табл.5 [10,12]. Считалось, что бетонный пол в этом квадранте деструктурирован на глубину 1,2 м и содержит ЛТСМ. По высоте деструктурированный слой пола разбивался равномерно на три слоя, состав (объемные доли ЛТСМ и бетона) которых указан в табл.6 [25]. Также рассматривался вариант с

Таблица 5. Нуклидный состав ЛТСМ в юго-восточном квадранте помещения 305/2

Нуклид	B *	O	Na	Mg	Al	Si
Содержание, % мас.	0,04	43,02	4,2	2,4	4,8	29,8
Нуклид	K	Ca	Fe	Zr	U+Pu **	
Содержание, % мас.	1,24	5,5	1,4	3,2	4,4	

\* При проведении расчетов наличие В в ЛТСМ не учитывалось.

\*\* Массовое содержание в ЛТСМ топлива 5 %.

Таблица 6. Состав деструктурированного бетонного пола в юго-восточном квадранте помещения 305/2

Слой *		1	2	3
Состав, % об.	ЛТСМ	25	50	75
	бетон	75	50	25

\* Нумерация слоев начинается от недеструктурированного бетона.

размещением в слоях 1 и 2 ЛТСМ и в слое 3 деструктурированного бетона в квазигомогенной смеси непереплавленных топливных таблеток, состав системы указан в табл.7. Помимо гомогенной смеси топлива с другими материалами в составе ЛТСМ рассматривалась гетерогенная структура, когда в ЛТСМ располагалась регулярная решетка твэлов без оболочек (топливных таблеток). Такая структура строилась в слоях 1 и 2 ЛТСМ

Таблица 7. Состав ТСМ в юго-восточном квадранте помещения 305/2 при размещении в ЛТСМ топливных таблеток

Слой		Деструктурированный бетон			ЛТСМ		
		1	2	3	1	2	3
Состав % об.	таблетки	0	0	11,1	14,7	7,4	0
	ЛТСМ	25	50	63,9	85,3	92,6	100
	бетон	75	50	25	0	0	0

и в слое 3 деструктурированного бетона. В процессе выполнения расчетов для такой структуры определялся оптимальный (по величине коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде) состав (объемные доли твэлов и ЛТСМ или смеси ЛТСМ с бетоном). Состав такой системы представлен в табл.8.

Во всех рассмотренных моделях ТСМ в ЦЗ и ПП выгорание топлива составляло 11 Мвт · сут/кг. Кроме того, в моделях ТСМ в ЦЗ рассматривалось выгорание топлива 0 и 1,2 МВт · сут/кг. Использовав-

Таблица 8. Состав ТСМ в юго-восточном квадранте помещения 305/2 при размещении в ЛТСМ решетки из твэлов

Слой		Деструктурированный бетон			ЛТСМ		
		1	2	3	1	2	3
Состав, % об.	твэл	0	0	19,2	19,2	19,2	0
	ЛТСМ	25	50	55,8	80,8	80,8	100
	бетон	75	50	25	0	0	0

шийся изотопный состав топлива представлен в табл.9 [3,26,27]. Продукты деления не учитывались. Сказанное относится к топливу как в составе ЛТСМ, так и в непереплавленных таблетках. Сильное влияние на размножающие свойства ТСМ оказывают бор и гадолиний. Однако их наличие во внутренних слоях ТСМ не доказано, поэтому в расчетах они не включались в состав ТСМ (т.е. в состав песка в ЦЗ и ЛТСМ в ПП).

Таблица 9. Изотопный состав топлива

Изотоп	Содержание, % мас.		
	Свежее топливо	Выгорание топлива, МВт · сут / кг	
		1,2	11
$^{235}\text{U}$	2	1,88	1,01
$^{236}\text{U}$	—	0,02	0,17
$^{238}\text{U}$	98	98,05	98,47
$^{239}\text{Pu}$	—	0,05	0,24
$^{240}\text{Pu}$	—	—	0,08
$^{241}\text{Pu}$	—	—	0,02
$^{242}\text{Pu}$	—	—	0,01

Плотность бетона принималась равной  $2,15 \text{ г/см}^3$ . Нуклидный состав бетона, использовавшийся в расчетах приведен в табл.10 [28].

Изменение размножающих свойств ТСМ моделировалось посредством залива смесью 50 % об. воды и 50 % об. этиленгликоля. Считалось, что пористость песка составляет 35 % об., ЛТСМ - около 40 % об.

Таблица 10. Нуклидный состав бетона

Нуклид	Si	Al	Fe	Na	K
Содержание, % мас.	26,44	2,9	3,64	0,55	0,61
Нуклид	H	Mg	Ca	C	O
Содержание, % мас.	0,77	0,79	8,64	0,4	55,26

Для расчетных исследований размножающих систем в ЦЗ и ПП использовались следующие программы: КРАТЕР [29,30], РИТМ [31], WIMS [32].

Большинство результатов расчетов ТСМ было получено с помощью программы КРАТЕР. Однако строгий расчет ячейки реактора РБМК (ТК в графитовом блоке) и решеток ТК и ТВС в песке может быть проведен только в двухмерной геометрии. Поскольку в программе КРАТЕР такая возможность отсутствует, то рассматривалась эквивалентная цилиндрическая ячейка. Тестирование точности расчета ячеек ТК в графите, ТК и ТВС в песке, как сухих, так и залитых смесью воды с этиленгликолем, выполнено на основе сравнения с результатами расчетов по другим программам. Числа процессов на изотопах урана и плутония, коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде и концентрации поглотителей нейтронов в растворе вода - этиленгликоль, бравшиеся для сравнения, получались по программам РИТМ и WIMS, причем по программе WIMS рассчитывались оба варианта ячейки: двухмерная и эквивалентная. Различия между соответствующими результатами, рассчитанными по программе КРАТЕР, и величинами, полученными по программам РИТМ и WIMS, не превышают нескольких процентов, что служит основанием использования модели эквивалентной ячейки в расчетах гетерогенных структур ТСМ.

## **2. Принципы проведения анализа и результаты расчетных исследований по обоснованию ядерной безопасности работы системы пылеподавления**

При обосновании ядерной безопасности, т.е. установлении условий, когда исключается возможность возникновения СЦР в помещениях объекта "Укрытие", в соответствии с [33 - 36] принималось, что эффективный коэффициент размножения нейтронов в системе с ТСМ при работе системы пылеподавления (заливе скоплений ТСМ смесью воды с этиленгликолем) не должен превышать 0,95.

В качестве консервативной оценки эффективного коэффициента размножения нейтронов в скоплениях ТСМ использовались значения коэффициента размножения нейтронов для бесконечной среды. Однако полагалось, что эффективный коэффициент размножения нейтронов в сухих (т.е. не залитых смесью воды и этиленгликоля) скоплениях ТСМ не превышает 1, так как с момента завершения активной стадии аварии совокупность диагностических измерений указывает на подкритичность

всех скоплений ТСМ, находящихся в помещениях объекта "Укрытие". Такое условие позволило в ряде случаев уменьшить максимальные возможные размеры рассматриваемых композиций ТСМ. В некоторых случаях максимальные возможные размеры размножающих систем с ТСМ ограничивались также имеющимся на момент аварии на 4-м энергоблоке ЧАЭС количеством топлива с данной глубиной выгорания.

При расчете коэффициента размножения нейтронов определялось оптимальное (по величине этого коэффициента) соотношение делящегося материала и замедлителя нейтронов (в гетерогенной структуре - оптимальный шаг элементов решетки с делящимся материалом); учитывалось отражение нейтронов (в качестве отражателя рассматривался песок или бетон, которые при заливе смесью воды с этиленгликолем становятся физически бесконечными при толщине около 1 м); пренебрегалось наличием компонентов, поглощающих нейтроны (т.е. не учитывались имеющиеся в скоплениях ТСМ бор и гадолиний).

Расчеты проводились для топлива с выгоранием 0 (в ЦЗ имелось 20 свежих ТВС - 2,3 т урана), 1,2 (в активной зоне имелось 172 ТВС-19,7 т урана) и 11 МВт · сут/кг (среднее выгорание топлива в активной зоне). Принимались консервативные оценки максимального количества топлива: в ЦЗ - около 150 т урана (без учета около 20 т урана в бассейне выдержки отработавшего топлива) и в ПП (помещение 305/2) - около 100 т урана.

При поиске оптимального шага расстановки элементов в решетке или оптимального соотношения компонентов в гомогенной смеси объемная доля раствора (вода + этиленгликоль) в песке и ЛТСМ варьировалась от нуля до полного заполнения жидкостью пористости в названных средах.

Для обеспечения ядерной безопасности при работе системы пылеподавления в смесь воды с этиленгликолем вводились поглотители нейтронов. Концентрации поглотителей нейтронов в растворе 50 % об. воды + 50 % об. этиленгликоля подбирались для достижения коэффициента размножения нейтронов в рассматриваемых композициях с ТСМ 0,95 и 1,00 (в указанных пределах изменения коэффициента размножения нейтронов зависимость концентрации поглотителей от коэффициента размножения можно считать линейной). В качестве поглотителей нейтронов рассматривались борная кислота, сернокислый кадмий и азотно-кислый гадолиний.

Все расчеты проводились для температуры 20 °С (если температура рассматриваемых композиций окажется выше, то это приведет только к ухудшению размножающих свойств).

Результаты расчетов в обоснование обеспечения ядерной безопасности при работе системы пылеподавления представлены ниже.

## 2.1. Центральный зал

В табл.11 и 12 представлены результаты расчета композиции ТСМ на основе решетки ТК-графит, как сухой, так и залитой смесью воды с этиленгликолем (смесь воды с этиленгликолем заполняет пространство между твэлами в ТК). Указанная система оказалась оптимальной для

Таблица 11. Характеристики бесконечных решеток ТК - графит

Объемная доля раствора (вода+этиленгликоль) в ТК, %	Выгорание топлива, МВт·сут/кг	Шаг ТК по квадратной сетке, см	Коэффициент размножения нейтронов	Концентрация поглотителя нейтронов в растворе (вода + этиленгликоль) при коэффициенте размножения нейтронов 0,95/1,00, г/л		
				борная кислота	серно-кислый кадмий	азотно-кислый гадолиний
0	0	25	1,31	—	—	—
	11	25	1,17	—	—	—
46	0	25	1,25	7,9/6,2	9,1/7,2	1,17/0,92
	11	25	1,11	3,8/2,4	4,4/2,9	0,54/0,37

Таблица 12. Характеристики размножающих систем ТК - графит при шаге ТК по квадратной сетке 25 см

Характеристика	Размножающая система	
	Выгорание топлива МВт · сут/кг	
	1,2	11
Диаметр системы, мм	1770 *	2766 *
Высота системы, мм	3428	3428
Число ТК в системе, шт.	20	48
Эффективный коэффициент размножения нейтронов в системе при объемной доле раствора (вода + этиленгликоль) в ТК 6/46 % об.	1,00/1,03	1,00/1,01
Концентрация поглотителя нейтронов в растворе (вода + этиленгликоль) при эффективном коэффициенте размножения нейтронов в системе 0,95/1,00, г/л:		
борная кислота	2,2/0,7	1,3/0,13
серно-кислый кадмий	2,5/1,0	1,5/0,15
азотно-кислый гадолиний	0,29/0,11	0,19/0,02

\* Диаметр залитой раствором (вода + этиленгликоль) системы в критическом состоянии: выгорание топлива 1,2 МВт · сут/кг - 1610 мм; выгорание топлива 11 МВт · сут/кг - 2660 мм.

решетки ТК-графит-песок, т.е. размещение между графитовыми блоками песка, в том числе залитого раствором (вода + этиленгликоль), приводит к уменьшению коэффициента размножения нейтронов. В качестве систем конечных размеров рассматривались решетки с выгоранием топлива 1,2 и 11 МВт · сут/кг.

В табл.13 и 14 приведены расчетные данные для композиции ТСМ на основе решетки ТК-песок - сухой и залитой смесью воды с этиленгликолем (смесь воды с этиленгликолем заполняет пространство между твэлами в ТК и пористость в засыпке из песка) с оптимальным шагом расстановки ТК. В качестве систем конечных размеров рассматривались решетки с выгоранием топлива 1,2 и 11 МВт · сут/кг.

В табл.15 и 16 представлены данные расчета композиции ТСМ на основе решетки ТВС-песок - сухой и залитой смесью воды с этиленгликолем с оптимальным шагом расстановки ТВС. В данной композиции песок заполняет как пространство между твэлами в ТВС, так и межкасетное пространство, смесь воды с этиленгликолем заполняет пористость в песке. В качестве систем конечных размеров рассматривались решетки с выгоранием топлива 0, 1,2 и 11 МВт · сут/кг.

В табл.17 и 18 представлены результаты расчета композиции ТСМ на основе решетки твэл-песок с оптимальным шагом расстановки твэлов - сухой и залитой смесью воды с этиленгликолем (смесь воды с этиленгликолем заполняет пористость в песке). В качестве систем конечных размеров рассматривались решетки с выгоранием топлива 0, 1,2 и 11 МВт · сут/кг.

В табл.19 и 20 представлены данные расчета композиции ТСМ на основе гомогенной смеси топлива с песком с оптимальным соотношением компонентов - сухой и залитой смесью воды с этиленгликолем (смесь воды с этиленгликолем заполняет пористость в песке). В качестве систем конечных размеров рассматривались решетки с выгоранием топлива 0, 1,2 и 11 МВт · сут/кг.

Проводились также расчеты композиций ТСМ на основе решеток ТК в графите и песке для случая, когда в результате разрушения твэлов топливо высыпалось внутрь канала и заполнило его, и данные расчеты показали, что реактивность таких систем ниже реактивности аналогичных систем, если в каналах сохраняются неизменными число, состав и расположение.

Таблица 13. Характеристики бесконечных решеток ТК - песок с оптимальным шагом расстановки ТК

Объемная доля раствора (вода+этиленгликоль) в ТК, %	Объемная доля раствора (вода + этиленгликоль) в смеси с песком, %	Выгорание топлива, МВт · сут/кг	Шаг ТК по квадратной сетке, см	Коэффициент размножения нейтронов	Концентрация поглотителя нейтронов в растворе (вода + этиленгликоль) при коэффициенте размножения нейтронов 0,95/1,00, г/л		
					борная кислота	сернокислый кадмий	азотнокислый гадолиний
0	0	0	33,7	0,75	—	—	—
		11	33,7	0,64	—	—	—
46	35	0	9,0	1,22	8,9/6,8	9,6/7,2	1,87/1,25
		11	9,0	1,07	3,8/2,0	3,9/2,3	0,57/0,34

Таблица 14. Характеристики размножающих систем ТК-песок при шаге ТК по квадратной сетке 9,0 см

Характеристика	Размножающая система	
	Выгорание топлива, МВт · сут/кг	
	1,2	11
Диаметр системы, мм	1873 *	5078 *
Высота системы, мм	3428	3428
Число ТК в системе, шт.	172	1264
Эффективный коэффициент размножения нейтронов в системе при объемной доле раствора ( вода + этиленгликоль ) в ТК 0/46 % об. и песке 0/35 % об.	0,43/1,17	0,35/1,06
Концентрация поглотителя нейтронов в растворе (вода + этиленгликоль) при эффективном коэффициенте размножения нейтронов в системе 0,95/1,00, г/л:		
борная кислота	7,5/5,3	3,4/1,7
сернокислый кадмий	8,4/5,6	3,7/1,9
азотнокислый гадолиний	1,16/0,87	0,52/0,27

\* Диаметр залитой раствором (вода + этиленгликоль) системы в критическом состоянии: выгорание топлива 1,2 МВт · сут/кг - 640 мм; выгорание топлива 11 МВт · сут/кг - 1200 мм.

Таблица 15. Характеристики бесконечных решеток ТВС - песок с оптимальным шагом расстановки ТВС

Объемная доля раствора (вода+ этиленгликоль) в смеси с песком, %	Выгорание топлива, МВт · сут/кг	Шаг ТВС по квадратной сетке, см	Коэффициент размножения нейтронов	Концентрация поглотителя нейтронов в растворе (вода + этиленгликоль) при коэффициенте размножения нейтронов 0,95/1,00, г/л		
				борная кислота	сернокислый кадмий	азотнокислый гадолиний
0	0	31,9	0,77	—	—	—
	11	31,9	0,66	—	—	—
35	0	10,4	1,21	8,1/6,3	9,0/6,8	1,35/1,04
	11	10,4	1,07	3,3/1,9	3,9/2,2	0,54/0,30

Таблица 16. Характеристики размножающих систем ТВС - песок при шаге ТВС по квадратной сетке 10,4 см

Характеристика	Размножающая система		
	Свежее топливо	Выгорание топлива, МВт·сут /кг	
		1,2	11
Диаметр системы, мм	740	2170 *	5880 *
Высота системы, мм	3428	3428	3428
Число ТВС в системе, шт.	20	172	1264
Эффективный коэффициент размножения нейтронов в системе при объемной доле раствора (вода + этиленгликоль) в песке 0/35 % об.	0,34/0,98	0,45/1,16	0,38/1,06
Концентрация поглотителя нейтронов в растворе (вода+этиленгликоль) при эффективном коэффициенте размножения нейтронов в системе 0,95/1,00, г/л:			
борная кислота	0,6/ —	6,5/4,9	2,7/1,5
сернокислый кадмий	0,8/ —	7,3/5,2	3,1/1,7
азотнокислый гадолиний	0,10/ —	1,09/0,78	0,43/0,24

\* Диаметр залитой раствором (вода + этиленгликоль) системы в критическом состоянии: выгорание топлива 1,2 МВт·сут/кг - 820 мм; выгорание топлива 11 МВт·сут/кг - 1574 мм.

Таблица 17. Характеристики бесконечных решеток твэл - песок с оптимальным шагом расстановки твэлов

Объемная доля раствора (вода+этиленгликоль) в смеси с песком, %	Выгорание топлива, МВт·сут/кг	Шаг твэлов по квадратной сетке, см	Коэффициент размножения нейтронов	Концентрация поглотителя нейтронов в растворе (вода + этиленгликоль) при коэффициенте размножения нейтронов 0,95/1,00, г/л		
				борная кислота	сернокислый кадмий	азотнокислый гадолиний
0	0	8,3	0,77	—	—	—
	11	8,7	0,65	—	—	—
35	0	2,57	1,24	9,2/7,3	10,3/7,9	1,51/1,21
	11	2,57	1,10	4,2/2,5	4,7/2,8	0,64/0,40

Таблица 18. Характеристики размножающих систем твэл - песок при шаге твэлов по квадратной сетке 2,57 см

Характеристика	Размножающая система		
	Свежее топливо	Выгорание топлива, МВт · сут/кг	
		1,2	11
Диаметр системы, мм	778	2282 *	6186 *
Высота системы, мм	3428	3428	3428
Число твэлов в системе, шт.	720	6192	45504
Эффективный коэффициент размножения нейтронов в системе при объемной доле раствора (вода + этиленгликоль) в смеси с песком 0/35 % об.	0,35/1,02	0,47/1,19	0,38/1,08
Концентрация поглотителя нейтронов в растворе (вода+этиленгликоль) при эффективном коэффициенте размножения нейтронов в системе 0,95/1,00, г/л:			
борная кислота	2,0/0,5	7,7/5,8	3,7/2,1
серноокислый кадмий	2,2/0,6	8,6/6,5	4,0/2,5
азотнокислый гадолиний	0,29/0,05	1,43/0,90	0,58/0,33

\* Диаметр залитой раствором (вода + этиленгликоль) системы в критическом состоянии: свежее топливо - 736 мм; выгорание топлива 1,2 МВт · сут/кг - 748 мм; выгорание топлива 11 МВт · сут/кг - 1330 мм.

Таблица 19. Характеристики бесконечных сред топливо - песок с оптимальным соотношением компонентов

Объемная доля компонентов смеси топливо/песок, %	Объемная доля раствора (вода+этиленгликоль) в смеси с песком, %	Выгорание топлива, МВт · сут/кг	Коэффициент размножения нейтронов	Концентрация поглотителя нейтронов в растворе (вода + этиленгликоль) при коэффициенте размножения нейтронов 0,95/1,00, г/л		
				борная кислота	серноокислый кадмий	азотнокислый гадолиний
3,97	0	0	0,65	—	—	—
		11	0,48	—	—	—
17/83	35	0	1,19	7,3/5,5	7,8/5,9	1,26/0,92
		11	1,04	2,8/1,2	2,8/1,3	0,45/0,19

Таблица 20. Характеристики размножающих систем топливо-песок с объемным соотношением компонентов 17-83 % об.

Характеристика	Размножающая система		
	Свежее топливо	Выгорание МВт · сут 1,2	топлива, /кг 11
Диаметр системы, мм	1276 *	2614 *	5083 *
Высота системы, мм	1179	2415	4695
Масса урана в системе, т	2,3	19,7	145
Эффективный коэффициент размножения нейтронов в системе при объемной доле раствора (вода + этиленгликоль) в смеси с песком 0/35 % об.	0,44/1,06	0,55/1,15	0,43/1,03
Концентрация поглотителя нейтронов в растворе (вода+этиленгликоль) при эффективном коэффициенте размножения нейтронов в системе 0,95/1,00, г/л:			
борная кислота	3,8/1,9	7,4/5,1	2,4/0,83
сернокислый кадмий	4,2/2,1	7,65/5,54	2,9/0,98
азотнокислый гадолиний	0,65/0,32	1,22/0,87	0,32/0,11

\* Диаметр/высота залитой раствором (вода + этиленгликоль) системы в критическом состоянии: свежее топливо - 960/886,6 мм; выгорание топлива 1,2 МВт·сут/кг - 980/905 мм; выгорание топлива 11 МВт · сут/кг - 220/203,2 мм.

## 2.2. Подреакторное помещение 305/2

В табл.21 представлены данные расчета для композиции ТСМ на основе ЛТСМ - сухой и залитой смесью воды с этиленгликолем (смесь воды с этиленгликолем заполняет пористость в ЛТСМ).

В табл.22 представлены расчетные результаты для композиции ТСМ на основе квазигомогенной смеси топливных таблеток и ЛТСМ - сухой и залитой смесью воды с этиленгликолем (смесь воды с этиленгликолем заполняет пористость в ЛТСМ). Объемная доля топливных таблеток в ЛТСМ определялась, исходя из предполагаемого максимально возможного количества урана в юго-западном и юго-восточном квадрантах помещения 305/2, 25 и 75 т соответственно.

В табл.23 представлены расчетные данные для композиции ТСМ на основе гетерогенной структуры твэл-ЛТСМ с оптимальным шагом рас-

становки твэлов - сухой и залитой смесью воды с этиленгликолем (смесь воды с этиленгликолем заполняет пористость в ЛТСМ).

Во всех расчетах композиций ТСМ в помещении 305/2 выгорание топлива составляло 11 МВт · сут/кг.

Для всех рассмотренных в помещении 305/2 композиций ТСМ также рассчитывался залив ТСМ водой, эффект реактивности которого не превышает таковой при заливке ТСМ смесью воды с этиленгликолем.

Таблица 21. Характеристики размножающих систем ЛТСМ

Характеристика	Место расположения ТСМ - помещение 305/2	
	юго-западный квад- рант	юго-восточный квад- рант
Модель ТСМ	три слоя ЛТСМ; плотность - табл.1, состав - табл.2,9,10	три слоя ЛТСМ, три слоя разрушенно- го бетона с ЛТСМ; плотность - табл.4, состав - табл.5, 6, 9, 10
Размеры системы, мм:		
ширина	6000	6000
длина	6000	12000
высота	800	2000
Масса урана в системе, т	5,6	9,3
Выгорание топлива, МВт · сут/кг	11	11
Эффективный коэффициент размно- жения нейтронов в системе сухой / при заливке 100 % об. пористости в ЛТСМ раствором (вода + этиленгли- коль)	0,31 / 0,44	0,29 / 0,25

Таблица 22. Характеристики размножающих систем таблетки топлива-ЛТСМ

Характеристика	Место расположения ТСМ - помещение 305/2	
	юго-западный квад- рант	юго-восточный квад- рант
Модель ТСМ	три слоя ЛТСМ, (в двух слоях топ- ливные таблетки); плотность - табл.1, состав - табл.2,3,9,10	три слоя ЛТСМ, три слоя деструктиро- ванного бетона с ЛТСМ (в двух слоях ЛТСМ и одном слое деструктированного бетона с ЛТСМ топ- ливные таблетки); плотность - табл.4, состав - табл.5,7,9,10
Размеры системы, мм:		
ширина	6000	6000
длина	6000	12000
высота	800	2000
Масса урана в системе, т	25	75
Выгорание топлива, МВт · сут/кг	11	11
Эффективный коэффициент размноже- ния нейтронов в системе сухой / при заливе 100% об. пористости в ЛТСМ раствором (вода + этиленгликоль)	0,44 / 0,78	0,62 / 0,93

Таблица 23. Характеристики размножающих систем твэл-ЛТСМ

Характеристика	Место расположения ТСМ
	юго-восточный квадрант помещения 305/2
Модель ТСМ	три слоя ЛТСМ, три слоя деструктированного бетона с ЛТСМ (в двух слоях ЛТСМ и одном слое деструктированного бетона с ЛТСМ твэлы с шагом по квадратной сетке 2,32 см); плотность - табл.4, состав - табл.5, 8, 9, 10
Размеры системы, мм:	
ширина	6000
длина	6000
высота	2000
Масса урана в системе, т	62
Выгорание топлива, МВт · сут/кг	11
Эффективный коэффициент размножения нейтронов в системе сухой / при заливе 100 % об. пористости в ЛТСМ раствором (вода + этиленгликоль)	0,54/1,01
Концентрация поглотителя нейтронов в растворе (вода + этиленгликоль) при эффективном коэффициенте размножения нейтронов в системе 0,95/1,00, г/л:	
борная кислота	2,55/0,34
сернокислый кадмий	3,0/0,4
азотнокислый гадолиний	0,45/0,06

## Заключение

На основе полученных расчетных данных можно определить необходимые концентрации поглотителей нейтронов (борная кислота / серноокислый кадмий / азотнокислый гадолиний) в смеси 50 % об. воды + 50 % об. этиленгликоля для рассмотренных композиций ТСМ в ЦЗ и ПП, при которых эффективный коэффициент размножения нейтронов не превышает 0,95 при работе системы пылеподавления:

решетка ТК реактора РБМК в графитовых блоках - 2,2 / 2,5 / 0,29 г/л;

решетка ТК реактора РБМК в песке - 7,5 / 8,4 / 1,16 г/л;

решетка ТВС реактора РБМК в песке - 6,5 / 7,3 / 1,09 г/л;

решетка твэлов реактора РБМК в песке - 7,7 / 8,6 / 1,43 г/л;

гомогенная смесь топлива реактора РБМК с песком - 7,4 / 7,65 / 1,22 г/л;

решетка твэлов реактора РБМК в ЛТСМ - 2,55 / 3,0 / 0,45 г/л.

Таким образом, для обеспечения ядерной безопасности при работе системы пылеподавления необходимая концентрация борной кислоты, серноокислого кадмия, азотнокислого гадолиния в смеси 50 % об. воды + 50 % об. этиленгликоля составляет 7,7 , 8,6 и 1,43 г/л соответственно.

## Список литературы

1. Состояние 4-го блока ЧАЭС и ядерного топлива, находящегося в нем (по результатам исследований 1988 - 1989 гг.). - М., 1990. - 72 с. - (Препр./ИАЭ им. И.В.Курчатова).
2. Техническое обоснование ядерной безопасности объекта "Укрытие" (ТОЯБ): (Отчет)/ ИАЭ им. И.В.Курчатова. - М., 1990. - 160 с.
3. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС (Краткий справочник). - М., 1990. - 21 с. - (Препр./ИАЭ им. И.В.Курчатова; № 5268/3).
4. Экспериментальные исследования лавообразных топливосодержащих масс (ТСМ) на 4-м блоке ЧАЭС (по результатам исследований 1986 - 1991 гг.). - М., 1992. - 120 с. - (Препр. / ИАЭ им. И.В.Курчатова; № 5533/3).
5. Техническое обоснование радиационной безопасности объекта "Укрытие" (ТОРБ объекта "Укрытие"): (Отчет)/ КЭ при ИАЭ им. И.В.Курчатова, ИРЭП АНБ; инв. №11.07/329. - Чернобыль; Минск, 1992.
6. Описание объекта "Укрытие" и требования к его преобразованию: Исходные данные для выполнения конкурсной работы на проект и технические решения по преобразованию объекта "Укрытие" Чернобыльской АЭС в экологически безопасную систему. - Киев: Наук. думка, 1992.
7. Систематизация информации по характеристикам ТСМ, находящихся в различных помещениях объекта "Укрытие": (Отчет)/ МНТЦ "Укрытие" АН Украины; арх.№ 2709,- Чернобыль, 1993.
8. Оцененные данные по накоплению радионуклидов в активной зоне реактора 4-го блока ЧАЭС перед аварией: (Отчет)/ МНТЦ "Укрытие" АН Украины, ИНИН УОвл ; арх. № 2765 - Чернобыль, 1993.
9. Оценка и обработка результатов исследований по местоположению и физико-химическим свойствам топливосодержащих масс (ТСМ) объекта "Укрытие" - 4-го блока ЧАЭС. Оценка данных по анализам проб ТСМ для различных помещений "Укрытия". - (Отчет)/ МНТЦ "Укрытие" АН Украины; арх. № 2821. - Чернобыль, 1993.
10. Лавообразные топливосодержащие массы (ТСМ) объекта "Укрытие". - Киев, 1993. - 44 с. - (Препр./АН Украины Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова; № 93-17).
11. Комплекс технических средств, оборудования и сооружений для разведки технического состояния строительных конструкций и высокоактивных отходов объекта "Укрытие" и преобразование объек-

та в экологически безопасную систему: Пояснительная записка. Том 9. Ядерная и радиационная безопасность при работах на объекте "Укрытие". "Чернобыль" . ПЗ9. - Чернобыль, 1994. - 64 с. - (КБ "Южное"; МНТЦ "Укрытие" АН Украины; арх. № 3173 ).

12. Изучение физико-химических свойств топливосодержащих материалов объекта "Укрытие": (Отчет)/ МНТЦ "Укрытие" АН Украины, НПО "Радиевый институт"; арх. № 3196) - Санкт-Петербург, Чернобыль, 1994.

13. Основные научно-технические результаты, полученные ОЯРБ в 1994 г.: (Отчет)/ МНТЦ "Укрытие" АН Украины; арх. № 3259. - Чернобыль, 1994.

14. Пазухин Э.М. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования // Радиохимия. - 1994. Т. 36, вып. 2,- С.97 - 142.

15. Результаты дополнительных исследований мест скопления лавообразных топливосодержащих масс на 4-м блоке Чернобыльской АЭС. - М., 1994. - 60 с. - (Препр./ РИЦ "Курчатовский институт"; № 5783/3).

16. Киселев А.Н. Сколько же ядерного топлива находится в лавообразной топливосодержащей массе 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС ? // Атомная энергия. - 1995. Т. 78, вып.4.- С.256 - 259.

17. Kiselev A.N., Checherov K.P. Lava-like fuel-containing masses in unit-4 Chernobyl NPP/ : Book of abstracts. Sixth Annual scientific and technical conference of the Nuclear society "International cooperation for nuclear development", 3-7 July 1995. - Kiev, Ukraine. - 1995. - Vol.2. - P.306 - 314.

18. Авария на ЧАЭС и ее последствия - информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ, Вена, 25 - 29 авг. 1986 г. - (Доклад/ ГКАЭ СССР).

19. Доллежалъ Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. - М.: Атомиздат, 1980.

20. Summary report on the post-accident review meeting on the chernobyl accident: Report by the international nuclear safety advisory group. - Vienna, 1986. - 106 p. - (Report/ IAEA; N 75-INSAG-1).

21. Чернобыльская авария. Дополнение к INSAG-1: Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности. - Вена, 1993 г. - 146 с. - (Доклад/ МАГАТЭ; N 75-INSAG-7).

22. Таблицы физических величин: Справочник/ Под ред. И.К.Кикоина. - М.: Атомиздат, 1976.

23. Подготовка материалов для новой редакции "Технического обоснования ядерной безопасности и технического обоснования ра-

диационной безопасности объекта "Укрытие". - 105 с.; (Отчет)/ МНТЦ "Укрытие" АН Украины, ИНИ УВОЛ. - Чернобыль, 1993.

24. Рабочие материалы технического обоснования ядерной безопасности (ТОЯБ) объекта "Укрытие": (Отчет)/ ИВТЭМ РНЦ "Курчатовский институт"; инв. № 130-18/1. - М., 1994.

25. Расчетно-экспериментальные исследования характеристик нейтронных полей в местах скопления лавообразных топливосодержащих масс в помещениях 305/2 и 304/3 объекта "Укрытие": (Отчет)/ НПЦ "Камертон" ИРЭП АНБ. - Минск, 1994.

26. Герасимов А.С., Зарицкая Т.С., Рудчик А.П. Справочник по образованию нуклидов в ядерных реакторах. - М.: Энергоатомиздат, 1989.

27. Обоснование расчетно-экспериментального метода определения радионуклидного состава "горячих" частиц: (Отчет)/ ИПЭ АНБ; инв. № 74. - Минск, 1993.

28. Научно-техническое обоснование способа долговременного захоронения топлива аварийного блока Чернобыльской АЭС. Часть 1. Концепция долговременного захоронения. Вопросы ядерной и радиационной безопасности: (Отчет)/ ГоИ АН СССР. - Апатиты, 1991.

29. Программа расчета многозонного двухмерного гетерогенного реактора в 10-групповом приближении с учетом выгорания топлива: (Отчет)/ ИЯЭ АН БССР; инв. № 1004. - Минск, 1983.

30. Программный комплекс расчета реакторов на тепловых нейтронах КРАТЕР: (Отчет)/ ИПЭ АНБ; инв. № 82. - Минск, 1993.

31. Физика ядерных реакторов на диссоциирующем теплоносителе. - Минск, 1984. - С.69 - 74.

32. Askew J.R. et. al. A general description of lattice code WIMS// Journ. of the Brit. Nucl. Energy Soc.- 1966. - Vol.5, N4. - P.564.

33. Основные правила ядерной безопасности при переработке, хранении и транспортировке радиоопасных делящихся материалов ПБЯ-06-00-80. - М., 1980.

34. Правила ядерной безопасности при транспортировании отработавшего ядерного топлива ПБЯ-06-08-77. - М., 1978.

35. Правила ядерной безопасности при хранении и транспортировке радиоопасных делящихся материалов ПБЯ-06-09-80. - М., 1980.

36. Основные правила безопасности и физической защиты при перевозке радиоопасных материалов ОПБЗ-83.- М., 1984.

Рукопись поступила 2 апреля 1997 г.

Наукове видання

АНАНИЧ Петро Іванович  
ГЕРАСЬКО Віктор Миколайович  
ГУЛЬНИК Сергій Іванович  
МАНДИК Сергій Геннадійович  
СІКОРІН Святослав Миколайович  
ТЕТЕРЕВА Наталія Олександрівна  
ЩЕРБІН Володимир Миколайович

РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ОБГРУНТУВАННЯ  
ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБОТИ СИСТЕМИ  
ПИЛОПРИДУШЕННЯ В ПРИМІЩЕННЯХ ОБ'ЄКТА "УКРИТТЯ"

Російською мовою

Редактор Л.М.Троян

Підп. до друку 18.04.97. Формат 60 x 90/16. Ум.-друк. арк. 1,4.  
Обл.-вид. арк. 1,1. Тираж 130 прим. Зам. № 601  
Ціна 28 к.

---

МНТЦ "Укриття" НАН України  
255620, м. Чорнобиль, вул. Кірова, 36-а

---