

А. В. Михайлов*

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль, Украина

*Ответственный автор: alexmikh@ukr.net

О ПРОИСХОЖДЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СОСТАВЕ ЛАВООБРАЗНЫХ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАСС НБК-ОУ ЧАЭС

Представлена версия материального происхождения металлических включений в силикатной матрице лавообразных топливосодержащих масс (ЛТСМ), образовавшихся во время аварии на 4-м блоке ЧАЭС. На основе сравнительной количественной характеристики наблюдаемых массовых соотношений железа, хрома и никеля в различных скоплениях ЛТСМ и потенциальных источниках их появления - металлоконструкциях - дана оценка степени влияния различных факторов на формирование металлической компоненты чернобыльского кориума (МКК). Сделан вывод о том, что исходный состав МКК образовался на основе расплава нержавеющей стали 08X18N10T, из которой были изготовлены элементы конструкций топливных каналов и нижних водяных коммуникаций.

Ключевые слова: тяжелая авария на АЭС, кориум, металлоконструкции ядерного реактора, топливосодержащие материалы, жертвенные материалы.

Введение

Известно, что при запроектной аварии на АЭС с расплавлением активной зоны ядерного реактора образуется высокотемпературный расплав (кориум), содержащий соответственно химическому составу исходных материалов и условиям окисления систему из двух несмешивающихся жидкостей – металлической и оксидной [1 - 3]. Оксидная компонента кориума (ОКК) формируется в результате расплавления таблеток топлива и растворения в этом расплаве циркония оболочек твэлов и его оксида. Металлическая компонента кориума (МКК) образуется из продуктов расплавления стальных внутрикорпусных устройств, состоящих преимущественно из железа, никеля и хрома.

В случае, когда стальная оболочка реактора не выдерживает локальных термических нагрузок, в ее наиболее энергонапряженной зоне образуется сквозной прожог, открывающий путь кориуму в подреакторное пространство защитного контейнента [4 - 6]. При таком развитии событий и отсутствии устройств локализации расплава неконтролируемое тепловое разложение бетона и растворение его составляющих в тепловыделяющем расплаве активной зоны (ВРБ) сопровождается интенсивным выходом радионуклидов, водяного пара, оксидов углерода и водорода [7]. В марте 2011 г. реализация подобного сценария привела к разрушению зданий трех энергоблоков АЭС «Фукусима-Дайичи» и широкомасштабному выбросу продуктов ядерного деления в окружающую среду [8, 9]. За четверть века до описываемых событий взаимодействие кориума с материалами в нижней части разрушенного

4-го блока ЧАЭС положило начало катастрофическому загрязнению территорий, масштабы которого несопоставимы ни с одной аварией в истории атомной энергетики. Активная стадия аварии завершилась образованием топливосодержащего силикатного расплава, который распространился в нижних помещениях энергоблока в виде лавообразных топливосодержащих масс (ЛТСМ), в составе которых наблюдаются не успевшие сепарироваться металлические включения овальной и сферической форм [10, 11]. Основная масса металла исчезнувших металлоконструкций обнаружена на полу парораспределительного коридора под эпицентром лавообразования в виде скоплений (по форме «блина»), не содержащих топлива.

Однако ранние модельные представления о ходе аварии [10] и оценки массы кориума, который мог образоваться еще в штатном положении активной зоны [14], не учитывали образование в результате ВРБ скоплений ТСМ с высокой концентрацией урана. В более поздних работах [13, 14] отмеченный недостаток был частично компенсирован, но роль кориума в этих процессах явно недооценивалась, а его металлическая компонента не анализировалась. В ходе экспериментов, моделирующих условия образования ЛТСМ во время аварии на ЧАЭС [15], содержание металлических элементов, характерное для черных и коричневых стекломасс, имитировалось добавлением к шихте (из смеси оксидов урана и циркония, песка, серпентинита и бетона) нержавеющей стали (< 5 % мас.). Другие версии появления металлической фазы в составе силикатной матрицы ЛТСМ не проверялись.

© А. В. Михайлов, 2017

Целью работы было создать достаточно непротиворечивый сценарий влияния различных факторов на химический состав металлических включений в ЛТСМ, образовавшихся на активной стадии аварии 4-го блока ЧАЭС.

Объекты и методика исследований

Настоящая работа выполнялась в рамках исследования материальных и энергетических источников образования ЛТСМ и ТСМ с высоким содержанием урана. Представленный материал является детальным изложением результатов, полученных в работе [16] для жертвенных материалов (ЖМ), объединенных в группу «Металл».

Сведения об устройстве реакторной установки типа РБМК-1000 и химическом составе материалов конструкций, которые были разрушены или перестали существовать в шахте реактора и подреакторных помещениях на активной стадии аварии 4-го энергоблока ЧАЭС, взяты из работ [17 - 19]. Данные о содержании железа, хрома и никеля в пробах ЛТСМ взяты из работ [10, 20, 21]. Масса стальных конструкций, которые выполнили функцию ЖМ (жертвенных сталей – ЖС) и превратились в застывшие «лужи» переплавленного металла либо макро- и микровключения в составе ЛТСМ, была оценена по данным [10, 18, 22].

Статистический анализ данных о содержании железа, хрома и никеля в ЛТСМ проводили для однородных и объединенных выборок проб, представлявших черные или коричневые стекломассы в отдельных скоплениях. Для идентификации конструкций, изготовленных из той или иной марки стали, компоненты которых в результате взаимодействия с кориумом или силикатным расплавом топлива могли стать источником появления металлических включений в ЛТСМ, использовался метод сравнения массовых соотношений элементов в стекломассах и ЖС. Состав ЖС строго регламентируется соответствующими ГОСТ и ТУ, что позволяет достаточно надежно рассчитать диапазоны и наиболее

вероятные значения искомых базовых величин. Для характеристики массовых соотношений железа, хрома и никеля в одних и тех же образцах ЛТСМ по каждой сформированной выборке данных определяли среднее значение, медиану, стандартное отклонение и коэффициент вариации. Подобный прием был успешно реализован нами ранее в работе [16] для идентификации основных материальных источников образования ЛТСМ во время аварии на ЧАЭС.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены данные о диапазонах значений содержания железа, хрома и никеля в металлических включениях (микровключениях или глобулах, как иногда их называют) в составе ЛТСМ и результаты оценки их средних значений по выборкам проб, представляющих отдельные скопления стекломасс. Химический состав металлоконструкций, которые могли оказаться на пути движения кориума до и после разгерметизации реакторного пространства, приведен в табл. 2. Результаты анализа наиболее вероятных значений массовых соотношений основных металлических элементов в одних и тех же образцах ЛТСМ представлены в табл. 3. Средние значения базовых величин сравниваемых параметров для ЖС и соответствующие диапазоны значений приведены в табл. 4. Отдельно приведены результаты оценки массовых соотношений элементов в расплаве, который мог образоваться в помещении 305/2 в результате расплавления конструкций схемы «ОР» в силикатном расплаве топлива. Этот источник жидкого металла получил название «гипотетическая ванна расплава», так как прямых доказательств ее образования нет. Расчетные данные, которые послужили основой для подобной оценки, приведены в табл. 5 и 6. Интегральная масса переплавленных сталей различных марок (см. табл. 5) определялась по данным работы [22], а содержание железа, хрома и никеля (см. табл. 6) и их массовые соотношения (см. табл. 4) в ванне расплава – по данным, приведенным в табл. 2.

Таблица 1. Содержание металлических элементов в составе ЛТСМ, % мас.

Пом.	Тип ЛТСМ	Fe	Cr	Ni
210/7	коричневые (9)*	0,88 (0,6 - 1,1)**	0,21 (0,15 - 0,26)	0,19 (0,09 - 0,31)
	коричневые (9)	н/д	0,35 (0,28 - 0,44)	0,30 (0,26 - 0,34)
	коричневые (18)	-	0,27 (0,15 - 0,44)	0,24 (0,09 - 0,34)
012/15 ББ-2	коричневая пемза (7)	1,38 (1,2 - 5,0)	0,22 (0,13 - 0,43)	0,19 (0,05 - 0,4)
	коричневые гранулы (16)	н/д	0,36 (0,21 - 0,52)	0,10 (0,03 - 0,15)
	коричневые (23)	-	0,32 (0,13 - 0,52)	0,13 (0,03 - 0,4)
012/7 ББ-1	коричневая пемза (6)	0,96 (0,8 - 1,1)	0,15 (0,11 - 0,20)	0,30 (0,21 - 0,4)
	коричневый шлак (5)	0,74 (0,5 - 1,0)	0,23 (0,06 - 0,38)	0,27 (0,04 - 0,48)
	коричневые (11)	0,86 (0,5 - 1,1)	0,19 (0,06 - 0,38)	0,29 (0,04 - 0,48)

Продолжение табл. 1

Пом.	Тип ЛТСМ	Fe	Cr	Ni
210/6	черно-коричневые, 3 ПСК (7)	н/д	0,24 (0,17 - 0,48)	0,36 (0,14 - 0,74)
	черные (2)	0,88 (0,86 - 0,90)	0,12 (0,05 - 0,19)	0,12 (0,05 - 0,18)
	черные (3)	4,5 (3,0 - 8,6)	0,22 (0,14 - 0,30)	0,20 (0,18 - 0,21)
	черные, 4 ПСК (3)	н/д	0,31 (0,19 - 0,52)	0,32 (0,16 - 0,48)
	черные (8)	-	0,23 (0,05 - 0,52)	0,22 (0,05 - 0,48)
217/2	черные (10)	0,54 (0,34 - 0,9)	0,18 (0,10 - 0,40)	0,12 (0,04 - 0,18)
	черные, «слоновья нога» (11)	(0,35 - 4,5)***	0,23 (0,10 - 0,30)	0,18 (0,11 - 0,25)
	черные (27)	-	0,22 (0,10 - 0,58)	0,15 (0,04 - 0,25)
304/3	черные (4)	0,36 (0,3 - 6,4)	0,13 (0,10 - 0,16)	0,17 (0,11 - 0,24)
	черные (16)	н/д	0,22 (0,10 - 0,43)	0,08 (0,004 - 0,16)
	черные (20)	-	0,20 (0,10 - 0,43)	0,1 (0,004 - 0,24)
305/3	черные (2)	0,77 (0,7 - 0,83)	0,05	0,04

* В скобках указано число проб.

** Среднее содержание и диапазон значений в скобках.

*** Для двух проб.

(ПСК – паросбросной клапан, н/д – данные отсутствуют, пом. – помещение.)

Таблица 2. Химический состав конструкционных сталей 4-го блока ЧАЭС

Марка стали	Содержание химических элементов, % мас.						Элементы конструкций
	Fe	C	Ni	Cr	Mn	Si	
08X18H10T	~ 65	< 0,08	9 - 11	17 - 19	< 2 (1 - 2)	< 0,8	Дистанционирующие решетки ТВС, тракты каналов, трубы НВК и трубная арматура
10XH1M	~ 96	< 0,12	~ 1	< 1	< 1	-	Схема «ОР» (верхняя и нижняя плиты, ребра жесткости). Трубы каналов вне кладки
Сталь 20	~ 98	0,17 - 0,24	< 0,25	-	0,35 - 0,65	0,17 - 0,37	Блоки тепловой защиты схем «ОР» и «Е»
10XCHД	~ 96	< 0,12	0,5 - 0,8	0,6 - 0,9	0,5 - 0,8	0,8 - 1,1	Материал схемы «С» по данным [22] (повреждена, но не расплавлена)
12X21H5T	~ 70	0,09 - 0,14	4,8 - 5,8	20 - 22	< 0,8	< 0,8	Тепловой экран пола и стен помещения 305/2

Примечание. В работе [22] при описании металлоконструкций, изготовленных из стали марки 08X18H10T, использовано ее прежнее название - 0X18H10T.

(ТВС – тепловыделяющая сборка, НВК – нижние водяные коммуникации.)

Таблица 3. Соотношение металлических элементов в ЛТСМ

Помещение	Тип ЛТСМ	Fe/Ni	Fe/Cr	Cr/Ni
210/7	коричневые	5,4 ± 1,9	4,4 ± 1,2	1,2 ± 0,3
	коричневые	-	-	1,1 ± 0,3
012/15 ББ-2	коричневая пемза	15,6 ± 9	8,7 ± 2,6	2,2 ± 1,9
	коричневые гранулы	-	-	4,7 ± 3,3
012/7 ББ-1	коричневая пемза	3,30 ± 0,7	6,60 ± 1,3	0,50 ± 0,1
	коричневый шлак	2,6 ± 0,8	3,1 ± 0,9	0,85 ± 0,2
210/6	черно-коричневые	-	-	0,9 ± 0,5
	черные	18,1 ± 8,6	16,8 ± 7,0	1,1 ± 0,3
217/2	черные	6,3 ± 5,7	3,3 ± 1,3	1,9 ± 1,3
	черные, «слоновья нога»	-	-	1,3 ± 0,4
304/3	черные	2,3 ± 0,9	2,9 ± 0,3	0,8 ± 0,2
	черные	-	-	3,4 ± 1,7
305/3	черные	19,10 ± 2,3	17,1 ± 0,6	1,2 ± 0,2

Примечание. Характеристика массовых соотношений элементов приведена в виде $M \pm m$, где M – среднее значение, m – стандартное отклонение.

Таблица 4. Соотношение химических элементов в ЖС и гипотетической ванне металлического расплава

Марка стали	Fe/Ni	Fe/Cr	Cr/Ni
Сталь 08X18H10T	6,5 (5,9 - 7,2)	3,6 (3,4 - 3,8)	1,8 (1,5 - 2,1)
Сталь 12X21H5T	13,2 (12,1 - 14,6)	3,3 (3,2 - 3,5)	4,0 (3,4 - 4,6)
Сталь 10XH1M	~ 96	> 96	< 1
Сталь 20	> 390	-	-
Сталь 10XCHД	148 (120 - 192)	128 (107 - 160)	1,2 (0,8 - 1,8)
Расплав	32	18,6	1,7

Примечание. Значения, указанные в скобках, соответствуют предельному содержанию элементов в сталях. Для расплава значения рассчитаны по данным табл. 5 и 6.

Таблица 5. Оценка массы переплавленного металла по отдельным маркам стали

Марка стали	08X18H10T	10XH1M	Сталь 20	10XCHД	12X21H5T	Всего
Масса, т	70	125	125	0	10	330

Таблица 6. Масса и содержание основных химических элементов в металлической компоненте гипотетической ванны расплава в помещении 305/2

Параметр	Fe	Cr	Ni	Другие
Масса, т	295	16	9	7
Содержание, % мас.	89,4	4,8	2,8	2,0

Как видно из данных в табл. 1, содержание металлов в ЛТСМ низкое, на уровне примеси, и только в редких случаях превышает 1 % мас. Анализ результатов статистической обработки данных показал, что средние значения массовых соотношений металлов в одних и тех же типах образцов ЛТСМ (см. табл. 3) практически не отличаются от медианных для нормального закона распределения случайных величин и для подавляющего числа проб находятся в достаточно узком диапазоне значений. Сравнительный анализ соотношений элементов в ЛТСМ с базовыми величинами, характерными для ЖС (см. табл. 4), позволил сформулировать следующие выводы:

значения, наиболее близкие к исходному составу стали 08X18H10T одновременно по всем трем показателям, обнаруживаются только в первичных потоках стекломасс (помещение 217/2), наиболее удаленных от эпицентра их образования в помещении 305/2;

значения Cr/Ni, характерные для стали 12X21H5T, наблюдаются в отдельных пробах ЛТСМ из большого горизонтального потока (помещение 304/3);

в черно-коричневых ЛТСМ, в продуктах взаимодействия коричневых лав с водой в бассейне-барботере (помещение 012/7) и отдельных пробах черных ЛТСМ из помещения 304/3 (верхний пористый слой) значения Cr/Ni в 2,4 - 3,6 раза ниже, чем в нержавеющей сталях;

высокое обогащение железом металлической фазы наблюдается в черных ЛТСМ, оставшихся в помещении 305/2 и/или застывших в «малом

вертикальном потоке» через ПСК в помещении 210/6. В отдельных пробах из этих скоплений соотношения Fe/Ni и Fe/Cr близки к значениям, характерным для гипотетической ванны металлического расплава, что косвенно подтверждает возможность ее образования. В первичных потоках стекломасс отмеченная особенность не наблюдается;

Таким образом, итоги проведенного сравнительного анализа свидетельствуют о том, что совпадений в массовых соотношениях железа, хрома и никеля в ЛТСМ и конструкционных сталях (потенциальных источниках их появления) скорее нет, нежели есть. И если далее не пытаться разобраться в установленных фактах, можно сделать вывод: имеющиеся данные не позволяют установить происхождение металлических включений в подавляющей массе ЛТСМ. Этот вывод можно было бы считать окончательным и на этом поставить точку.

Однако результаты, полученные разработчиками технологии пассивной локализации кориума при запроектных авариях на АЭС с выходом кориума за пределы корпуса реактора, и многолетний практический опыт металлургов по вторичному использованию металлического лома в производстве сталей позволяют несколько по-иному оценить данные, сведенные в табл. 3.

Багаж знаний, накопленный в этих областях, однозначно свидетельствует о том, что изменение массовых соотношений в расплаве сталей - это обычное явление, которое наблюдается в результате активного окисления и физического

уноса металлов с интенсивными восходящими потоками газов. В металлургии для весовой оценки утраты легирующих элементов из металлического лома используют специальное понятие - угар. Для его ограничения и обеспечения стабильного состава сплавов, получаемых в печах, разработаны специальные технологические приемы. Что же произошло с металлическими конструкциями поврежденного сектора схемы «ОР» в нашем случае? Фактически, то же самое – переплавка, но только неконтролируемая. В современных моделях ВРБ не используется металлургический термин «угар», однако допускается реализация механизма физического уноса металлов из реакционной зоны с газообразными продуктами разложения бетона [7].

В этой связи наибольший интерес представляет изменение массовых соотношений в расплаве стали 08X18H10T, следы которой явно прослеживаются в первичных потоках ЛТСМ, не успевших испытать сильного влияния переплавки металла, окисления и ВРБ.

Рассмотрим перечисленные факторы более подробно. В отличие от аварий на реакторах типа ВВЭР черномыльский кориум не мог накапливаться на днище корпуса из-за его отсутствия. Однако на пути его движения по топливным каналам находилась массивная опорная металлоконструкция. Прожог верхней плиты схемы «ОР» открывал доступ кориуму к стеклообразующим наполнителям ее внутреннего пространства и образованию силикатного расплава коричневых ЛТСМ. В то же время расплавление стальных перегородок поврежденного сектора создавало условия для пополнения металлической фазы железом.

При взрывной разгерметизации реакторного пространства часть кориума могла быть сброшена непосредственно на пол помещения 305/2 к ее южной стене. Наклон $\frac{3}{4}$ конструкции схемы «ОР», оставшейся целой, и наличие значительного оплавления ее дополнительной опоры на высоте, совпадающей с высотной отметкой верхней плиты схемы, свидетельствуют о возможности такого события. После расплавления металлической обшивки тепловой защиты других препятствий для взаимодействия кориума с бетонным основанием пола помещения 305/2 не оставалось. Образование каверны, характерной для последствий ВРБ, создало условия для накопления в местах глубокого прожога бетона ТСМ с высокой концентрацией урана.

В отличие от металлической фазы, которая не смешивается с силикатами, оксидная, по мере расхода ЖМ и поглощения его компонентов (легких оксидов), теряет свою исходную плот-

ность. Такой процесс мог происходить как в объеме каверны, так и в пределах каркаса оторванного юго-восточного сектора схемы «ОР». В результате инверсии ванны расплава слой жидкого металла оказался под оксидным слоем. В табл. 6 представлена оценка элементного состава ее металлической фазы. Как видно из табл. 4, на фоне многократного роста соотношений Fe/Ni и Fe/Cr в результате переплавки углеродистых сталей значение Cr/Ni остается характерным для нержавеющей стали 08X18H10T.

Если это так, то после проплавления нижней плиты из объема поврежденного сектора схемы «ОР» сначала должен был выплеснуться жидкий металл, а после – менее плотные ЛТСМ. Результаты визуального обследования подтверждают эту версию. Застывшие «лужи» переплавленного металла обнаружены под эпицентром лавообразования на полу смежных помещений 210/5, 210/6 и 210/7. Скопления ЛТСМ покрывают металл сверху в виде более позднего слоя. В целом по имеющимся оценкам весьма незначительная часть (< 20 т [16, 22]) из 330 т переплавленного металла (см. табл. 6) не успела сепарироваться и осталась в составе матрицы силикатного расплава, застывшего в виде скоплений ЛТСМ. Явные вкрапления металла в виде прослоек или «струй» либо целые металлические предметы без следов плавления наблюдаются на удалении от места интенсивной переплавки металлоконструкций – в потоках стекломассы через ПСК 4, соединяющий юго-западный квадрант помещения 305/2 с парораспределительным коридором (помещение 210/7).

Таким образом, наблюдаемые массовые соотношения металлов в целом ряде скоплений вполне могут быть объяснены влиянием выше рассмотренного фактора, но далеко не все. Как было отмечено ранее, в ходе физико-химического взаимодействия кориума с различными ЖМ существенно изменяется его исходный состав. Непосредственно по фронту взаимодействия с ЖМ (фронту плавления ЖМ) происходит активное окисление металлов в твердой фазе и/или в объеме образующегося расплава при смешивании продуктов реакций и непрореагировавших компонентов [6]. В первую очередь происходит уменьшение химической активности циркония. После исчерпания последнего происходит окисление хрома, а затем – железа. Никель в этом ряду остается наиболее устойчивым элементом, что определяется его наибольшим стандартным электродхимическим потенциалом.

При взаимодействии черномыльского кориума с различными силикатсодержащими ЖМ в объеме образующегося расплава условий, необходимых для протекания окислительно-восстано-

вительных реакций, было предостаточно. Следуя за рассуждениями авторов [2] о возможности представления металлического расплава моделью атомарного регулярного раствора замеще-

ния, были оценены последствия окисления компонентов стали 08X18H10T в ряду Cr>Fe>Ni при наличии неограниченного источника свободного кислорода (табл. 7).

Таблица 7. Расчетное изменение массовых соотношений основных химических элементов в расплаве стали 08X18H10T

Элементы	Степень окисления элементов, %					
	Cr = 0/ Fe = 0	Cr = 50/ Fe = 0	Cr = 100/ Fe = 0	Cr = 100/ Fe = 50	Cr = 100/ Fe = 100	Cr = 100/ Fe = 100/ Ni = 50
Fe/Ni	6,5	6,5	6,5	5,7	5,0	5,7
Fe/Cr	3,6	4,4	5,3	4,6	4,1	4,1
Cr/Ni	1,8	1,5	1,2	1,2	1,2	1,4

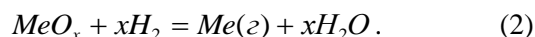
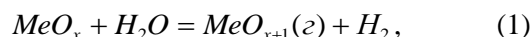
Как видно из данных таблицы, полученных на примере стали 08X18H10T, окисление металлов вносит существенные изменения в исходные массовые соотношения элементов, характерных для неокисленного состояния компонентов расплава (см. табл. 4). Исходя из полученных данных (см. табл. 3), есть основание предполагать, что подавляющая масса коричневых ЛТСМ образовалась до начала массовой переплавки металлоконструкций схемы «ОР», а металлическая фаза еще не успела испытать мощного влияния разбавления железом. Наблюдаемые массовые соотношения элементов в ЛТСМ могут свидетельствовать о высокой степени окисления металлов: хром и железо до 100, никель – до 50 %.

Однако для части низкоплотных ТСМ, образовавшихся при взаимодействии лав с водой (пемза, шлак), соотношение Cr/Ni находится ниже значения (1,1 - 1,3), характерного для полного окисления хрома (см. табл. 7). Принимая во внимание условия их образования, полученный результат можно объяснить сочетанным влиянием не только интенсивного окисления, но и физического уноса из реакционной зоны компонентов металлической фазы, не связанной с силикатной матрицей, под действием интенсивных восходящих потоков пара по фронту растекания стекломасс в бассейне-барботере. Аналогичная картина наблюдается и для ЛТСМ поздних потоков (черно-коричневых и черных), сформировавшихся в зоне интенсивной эрозии бетона в юго-восточном секторе подреакторного помещения 305/2.

В чем же причина? Модели ВРБ объясняют подобное явление следующим образом. Термическое разрушение бетона сопровождается интенсивным газовыделением на границе взаимодействия «расплав - бетон», что приводит к пробулканию пузырей образующихся паров воды и горючих газов (барботажу) сквозь образующийся силикатный расплав топлива. В результате химического взаимодействия продуктов разложения бетона с металлами происходит их активное

окисление, модифицирующее исходный состав. Внутрь пузырей, проходящих сквозь расплав, испаряются его компоненты, пары которых по достижении поверхности попадают в атмосферу и конденсируются с образованием аэрозолей.

Испарение со свободной поверхности происходит и вследствие образования летучих соединений металлов, не связанных силикатной матрицей, при химических реакциях, идущих на границе «расплав - атмосфера». В частности, при взаимодействии образовавшихся оксидов с парами воды и водородом, входящим в состав пузырей



Применительно к нашей ситуации аналогичные процессы и реакции (1) и (2) могли наблюдаться и в эпицентре эрозии бетона и при взаимодействии с водой в бассейне-барботере. В результате из шахты реактора были выброшены не только легколетучие вещества, образующиеся при термическом разложении бетона и воды, но и составные элементы металлической фазы расплава ТСМ, что в итоге привело к кардинальному изменению массовых соотношений металлов, характерных для исходных составов сталей.

Таким образом, только современный уровень знаний о механизмах взаимодействия компонентов кориума с различными материалами позволяет приблизиться к объяснению целого ряда мало-понятных, на первый взгляд, фактов, которые мы обнаруживаем при изучении химического состава скоплений ТСМ, образовавшихся в результате аварии 4-го энергоблока ЧАЭС в подреакторном пространстве. В целом можно признать, что результаты, полученные в работе, и их интерпретация не только не находятся в противоречии с известными данными, а скорее подтверждают современные модельные представления о последствиях влияния рассмотренных выше факторов на

металлическую компоненту кориума, исходный состав которой обычно соответствует расплаву нержавеющей стали.

Заклучение

Полученные в работе результаты наглядно продемонстрировали, что при анализе первичных данных о химическом составе ЛТСМ, образовавшихся в ходе аварии 4-го энергоблока ЧАЭС, необходимо учитывать сочетанное действие факторов, которые оказали различное влияние на формирование элементного состава металлической фазы отдельных скоплений. Включения железа, хрома и никеля в силикатной матрице - это мельчайшие фрагменты расплава металлоконструкций, которые не успели объединиться в более крупные и сепарироваться в

отдельные макровключения («струи») и/или крупные скопления («лужи») переплавленного металла. Предшествующими процессами могли быть: для одних включений - разбавление МКК железом в ванне расплава сталей металлоконструкций схемы «ОР» и угар; для других - целая цепочка окислительно-восстановительных реакций по фронту взаимодействия кориума и химически активных металлов с источниками свободного кислорода. Есть основания считать, что на конечный состав металлической фазы отдельных скоплений ТСМ существенное влияние оказал также физический унос элементов с восходящими потоками аэрозольных и газообразных продуктов взаимодействия расплава с водой (бассейн-барботер) и бетоном подреакторной плиты (юго-восточный квадрант помещения 305/2).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В. Гусаров и др. Новый класс функциональных материалов для устройства локализации расплава активной зоны ядерного реактора. *Рос. хим. журнал XLIX(4) (2005) 42.*
2. В.Г. Асмолов, В.Н. Загряжкин, Д.Ф. Цурикову. Оценка плотности U-Zr-Fe-O-расплавов. *Теплофизика высоких температур 46(4) (2008) 635.*
3. Ю.П. Удалов и др. Функциональные материалы для пассивного управления запроектной аварией ядерного реактора на внекорпусной стадии локализации расплава активной зоны. Часть 1. Изв. Санкт-Петерб. госуд. технолог. ин-та. (техн. унта) 8(34) (2010) 17.
4. В.И. Скалзубов и др. Основные положения методического обеспечения моделирования тяжелых аварий на АЭС с ВВЭР. *Ядерна та радіаційна безпека 2(46) (2010) 13.*
5. В.С. Жданов и др. Двумерная абляция бетона в процессе взаимодействия кориума с бетоном. *Вестник НЯЦ РК «Атомная энергетика и безопасность АЭС» 1 (2004) 87.*
6. А.Е. Киселев, Е.В. Моисеенко, А.С. Филиппов. Верификация модели физико-химических процессов в расплаве на внекорпусной стадии тяжелой аварии. В кн.: *Материалы конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»* (Подольск, ОКБ «Гидропресс», 26 - 29 мая 2009 г.) (Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2009) с. 96.
7. Д.Д. Каменская, Е.В. Моисеенко, А.С. Филиппов. Верификация модели взаимодействия теплоделяющего расплава с бетоном на внекорпусной стадии тяжелой аварии. В кн.: *Материалы конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»* (Подольск, ОКБ «Гидропресс», 19 - 22 мая 2015 г.) (Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2015) с. 87.
8. К.С. Долганов и др. Результаты экспресс-расчетов тяжелой аварии на АЭС «Фукусима-1» при помощи кода СОКРАТ. В кн.: *Тр. ИБРАЭ РАН. Вып. 13. Авария на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки.* Под. ред.
9. Р. В. Арутюнян; *Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (М.: Наука, 2013) с. 67.*
10. Б.С. Пристер и др. *Проблемы безопасности атомной энергетики. Уроки Чернобыля.* 2-е изд., доп. (Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2016) 356 с.
11. Э.М. Пазухин. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования. *Радиохимия 36(2) (1994) 97.*
12. В.Г. Савоненков и др. Радиогеохимическое исследование топливосодержащих новообразований, возникших в результате аварии на Чернобыльской АЭС. *Тр. Радиевого ин-та им. В. Г. Хлопина XIV (2009) 87.*
13. С.А. Богатов. Взаимодействие аварийного топлива 4-го энергоблока ЧАЭС с конструкционными материалами – количественные оценки. В кн.: *Объект «Укрытие» - 10 лет. Основные результаты научных исследований (Чернобыль, 1996) 112.*
14. Е.Д. Высотский и др. Топливо в помещении 305/2 4-го блока ЧАЭС. Критмассовые зоны. Уточнение сценария образования лавообразных топливосодержащих материалов. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля 8 (2007) 77.*
15. А.С. Лагуненко, В.А. Краснов, С.А. Довыдьков. Топливо в помещении 305/2. Возможный сценарий образования ядерно-опасных зон. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля 24 (2015) 51.*
16. В.С. Красноручкий и др. Исследование взаимодействия ядерного топлива с конструкционными материалами активной зоны в случае запроектной аварии. *ВАНТ. Сер. ФРП и РМ 2(78) (2012) 56.*
17. А.В. Михайлов. К вопросу о материальных и энергетических источниках образования топливосодержащих материалов во время аварии на 4-м блоке ЧАЭС. *Ядерна фізика та енергетика 17(4) (2016) 354.*

17. Н.А. Доллежалъ, И.Я. Емельянов. *Канальный ядерный энергетический реактор* (М: Атомиздат, 1980) 207 с.
18. Бурлаков Е.В. и др. Расчетный анализ радиационных характеристик конструкций реактора первого блока Чернобыльской АЭС после его окончательного останова. Препр./ НАН Украины. Межотрасл. науч.-техн. центр «Укрытие»; 00-4 (Чернобыль, 2000) 12 с.
19. *Тепловые и атомные электрические станции*: справочник. Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. (М.: Энергоиздат, 1982) 624 с.
20. Пазухин Э.М. и др. Изучение образцов лавообразных топливосодержащих материалов, отобранных с различной глубины залегания лавы. Проблемы Чернобиля 9 (2002) 66.
21. С.А. Богатов и др. База данных по местонахождению и состоянию ядерного топлива 4-го блока ЧАЭС до и после аварии. Препр. / РНЦ «Курчатовский институт» 130-11/2 (Москва, 2007) 146 с.
22. S. Bogatov et al. Half an hour after the beginning of the accident. (Moscow, OKPPRINT, 2006) 22 p.

О. В. Михайлов*

Институт проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль, Україна

*Відповідальний автор: alexmikh@ukr.net

ЩОДО ПОХОДЖЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СКЛАДІ ЛАВОПОДІБНИХ ПАЛИВОВМІСНИХ МАС НБК-ОУ ЧАЕС

Представлено версію матеріального походження металевих включень у силікатній матриці лавоподібних паливовмісних мас (ЛПВМ), що утворилися під час аварії на 4-му блоці ЧАЕС. На основі порівняльної кількісної характеристики масових співвідношень заліза, хрому і нікелю, що спостерігаються в різних скупченнях ЛПВМ і потенційних джерелах їхньої появи – металокопункціях, – наведено оцінку ступеня впливу різних чинників на формування металевих компоненти чорнобильського коріуму (МКК). Зроблено висновок про те, що початковий склад МКК утворився на основі розплаву нержавіючої сталі 08X18H10T, з якої були виготовлені елементи конструкцій паливних каналів і нижніх водяних комунікацій.

Ключові слова: важка аварія на АЕС, коріум, металокопункції ядерного реактора, паливовмісні матеріали, жертвні матеріали.

O. V. Mikhailov*

Institute for NPP Safety Problems, National Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl, Ukraine

*Corresponding author: alexmikh@ukr.net

ON THE ORIGIN OF METAL IMPURITIES IN CONTENT OF LAVA-LIKE FUEL-CONTAINING MATERIALS OF CHORNOBYL NSC-SHELTER OBJECT

Version of the origin of material metallic impurities in silicate matrix of lava-like fuel-containing masses (LFCM), which were formed during the Chernobyl Unit 4 accident, is presented. Based on comparative quantitative characteristics of observable mass ratios of iron, chromium and nickel in different LFCM clusters and potential sources of their appearance - metal structures, the degree of impact of various factors on the formation of metal components in Chernobyl corium (MCC) was given. It was concluded that initial MCC composition was formed on the basis of 08X18H10T stainless steel melt, from which the elements of fuel channel structure and lower water pipelines were manufactured.

Keywords: severe accident at NPP, corium, steel structures of nuclear reactor, fuel-containing materials, sacrificial materials.

REFERENCES

1. V.V. Gusarov et al. A new class of functional materials for core melt localization device of the nuclear reactor. *Rossiiskij khimicheskij zhurnal XLIX(4) (2005) 42. (Rus)*
2. V.G. Asmolov, V.N. Zagrjazkin, D.F. Tsurikov. Estimation of density of U-Zr-Fe-O melts. *High Temp. 46(4) (2008) 579.*
3. Ju.P. Udalov et al. Functional materials for passive management of severe accident at a nuclear reactor in out-vessel stage of localization core melt. Part 1. *Izvestiya Sankt-Peterbugskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta 8(34) (2010) 17. (Rus)*
4. V.I. Skalozubov et al. Summary of methodological support of modeling of severe accidents at NPP with VVER. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka 2(46) (2010) 13. (Rus)*
5. V.S. Zhdanov et al. Two-dimensional concrete ablation during molten core/concrete interactions. *Vestnik NJaTs RK «Atomnaya energetika i bezopacnost' AES» 1 (2004) 87. (Rus)*
6. A.Ye. Kiselev, Ye.V. Moiseenko, A.S. Filippov. Verification of the model of physical and chemical processes in the melt at outside vessel stage of severe accident. In: Proc. of the Conf. "Safety Assurance of

- NPP with VVER” (Podol’sk, OKB “Gidropress”, 26 - 29 May 2009) (Podol’sk: OKB “Gidropress”, 2009) p. 96. (Rus)
7. D.D. Kamenskaja, Ye.V. Moiseenko, A.S. Filippov. Verification of the model of interaction of heat-melt with the concrete at outside vessel stage of severe accident. In: Proc. of the Conf. “Safety Assurance of NPP with VVER” (Podol’sk, OKB “Gidropress”, 19 - 22 May 2015) (Podol’sk: OKB “Gidropress”, 2015) p. 87. (Rus)
 8. K.S. Dolganov et al. The results of severe accident at the "Fukushima-1" NPP rapid calculation using code SOCRATES. In: Proc. of the Institute of Problems of Safe Development of Nuclear Power Engineering of the Russian Academy of Sciences Vol. 13: The accident at the "Fukushima-1" NPP: the response experience and lessons. Ed. by R. V. Arutjunjan (Moskva: Nauka, 2013) p. 67. (Rus)
 9. B.S. Prister et al. *The safety problems of the nuclear power. The lessons of Chernobyl*. 2-nd edition (Chernobyl: Institute for Safety Problems of NPP, 2016) 356 p. (Rus)
 10. E.M. Pazukhin. Lava-like fuel containing mass of the 4 Unit of the Chernobyl NPP: topography, physical and chemical properties, scenario of formation. *Radiokhimiya* 36(2) (1994) 97. (Rus)
 11. V.G. Savonenkov et al. Radiogeochemical study of fuel morbid growth resulting from the Chernobyl accident. *Trudy Radievogo instituta im. V. G. Khlopina XIV* (2009) 87. (Rus)
 12. S.A. Bogatov. Interaction of Chernobyl NPP power Unit 4’s emergency fuel with structural materials - quantitative estimates. In: Object "Ukryttya" - 10 years. The main results of research (Chernobyl, 1996) p. 112. (Rus).
 13. Ye.D. Vysotskij et al. Fuel in Room 305/2 of the Chernobyl Nuclear Power Station Unit 4. Zones of critical mass risk. Specification of the scenario of formation of lava-like fuel containing materials. *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsij i Chornobylya* 8 (2007) 77. (Rus)
 14. A.S. Lagunenkov, B.A. Krasnov, S.A. Dovyd’kov. Fuel in the room 305/2. A possible scenario for the formation of nuclear-hazardous zones. *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsij i Chornobylya* 24 (2015) 51. (Rus)
 15. V.S. Krasnorutskij et al. Study of nuclear fuel interaction with core constructional materials in the case of the beyond design accident. *VANT. Ser. FRP i RM* 2(78) (2012) 56. (Rus)
 16. O.V. Mikhajlov On material and energy sources of fuel-containing materials formation during Chernobyl NPP Unit 4 accident. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 17(4) (2016) 354. (Rus)
 17. N.A. Dollezhal’, I.Ja. Emelianov. *Channel-type Nuclear Power Reactor* (Moskva: Atomizdat, 1980) 207 p. (Rus)
 18. E.V. Burlakov et al. Calculation analysis of the radiation characteristics of the ChNPP Unit 1 reactor structures after the final shutdown. Preprint. NAN Ukraine. Mezhotrasl. naych.-tekh. tsentr “Ukrytie”; 00-4 (Chernobyl, 2000) 12 p. (Rus)
 19. *Thermal and Nuclear Power Plants*. Ed. by V. A. Grigor’ev and V. M. Zorin (Moskva: Energoizdat, 1982) 624 p. (Rus)
 20. E.M. Pazukhin et al. The study of lava-like fuel containing materials’ samples taken from different lava depth. *Problemy Chornobylya* 9 (2002) 66. (Rus)
 21. S.A. Bogatov et al. Database on location of Chernobyl NPP Unit 4’s nuclear fuel before and after the accident. Preprint RNTs «Kurchatovskij institut» 130-11/2 (Moskva, 2007) 146 p. (Rus)
 22. S. Bogatov et al. Half an hour after the beginning of the accident (Moskva, OKPPrint, 2006) 22 p.

Надійшла 15.05.2017

Received 15.05.2017