

А. В. Михайлов

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

К ВОПРОСУ О МАТЕРИАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКАХ ОБРАЗОВАНИЯ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ВО ВРЕМЯ АВАРИИ НА 4-М БЛОКЕ ЧАЭС

Представлены результаты детального анализа источников материального наполнения лавообразных топливосодержащих материалов (ТСМ) и скоплений с высокой концентрацией урана. Для оптимальной композиции жертвенных материалов и ТСМ сведен материально-энергетический баланс в модели процессов. Дана количественная оценка остаточному тепловыделению отработавшего ядерного топлива в ряду других источников тепловой энергии в шахте реактора. Сделан вывод о том, что при условии 50 % теплопотерь оставшегося количества «полезного» тепла достаточно для реализации доменной версии сценария образования ТСМ.

Ключевые слова: уран, топливосодержащие материалы, жертвенные материалы, источники тепла, остаточное тепловыделение топлива, материально-энергетический баланс.

Введение

Неуправляемый разогрев топливных сборок ядерного реактора 4-го блока ЧАЭС, разрыв трубопроводов охлаждающего контура с последующими паровым взрывом и детонацией воздушно-водородной смеси привели 26 апреля 1986 г. к тяжелейшей по масштабам последствий аварии в истории атомной энергетики [1]. Были разрушены все барьеры безопасности, полностью разрушена активная зона (АЗ), значительная часть технологического оборудования и строительных конструкций энергоблока, выброшено в окружающую природную среду огромное количество радиоактивных веществ [2].

В ходе неконтролируемых высокотемпературных процессов облученное топливо испытало несколько видов термохимического метаморфизма: испарение, плавление, диспергирование, смешивание и ассимиляцию [3]. После разрушения реактора топливо, находившееся в АЗ, оказалось не только в различных помещениях энергоблока в виде пыли, фрагментов тепловыделяющих сборок (ТВС), лавообразных топливосодержащих материалов (ЛТСМ), но и было выброшено за его пределы [4, 5]. При проектировании объекта «Укрытие» предполагалось, что 97 % топливной загрузки реактора находится в помещениях энергоблока, в том числе 95 % - в составе ЛТСМ на нижних отметках [4].

Долгое время вопрос о количестве топлива, которое осталось в пределах энергоблока и вошло в состав ЛТСМ, оставался предметом достаточно острой дискуссии. Оценки, выполненные различными методами, находились в широком диапазоне - от 24 т [6] до 88 т [7] - 135 т (по урану) [8]. А топливо - это не только материальный, но и энергетический источник образования конечного продукта высокотемпературного взаимодействия облученного топлива с окружающими

материалами - ЛТСМ. По имеющимся оценкам, остаточное тепловыделение облученного топлива (ОТВ) оказало доминирующее влияние на баланс тепла в эпицентре лавообразования, а его интегральное количество обеспечило превращение топливосодержащей смеси (шихты) из навала фрагментов активной зоны (ФАЗ) в юго-восточном квадранте помещения 305/2 в силикатный расплав [7, 9]. В настоящее время эксперты сходятся во мнении, что в объекте «Укрытие» локализовано от 125 до 150 т урана, из которых 75 - 85 т локализованы в составе ЛТСМ и непереплавленных остатков шихты из ФАЗ, а 15 - 20 т - внутри ядерно-опасных скоплений (ЯОС) [5, 10 - 12].

Впервые детальный анализ материальных и энергетических источников образования ЛТСМ был сделан в работе [7], автор которой использовал названия черной и коричневой керамики. В более поздней классификации [3], основанной на принципах типизации вулканогенных пород и продуктов ударно-термального метаморфизма ядерных взрывов, было предложено использовать для топливосодержащих новообразований чернобыльского происхождения более корректное, по мнению ее авторов, определение ЛТСМ как «стекломассы» вместо используемых «лава» или «керамика» [7].

Первая и более поздние версии сценария протекания аварийных процессов [7, 9, 13 - 16] не предусматривали образование в местах глубокого прожога подреакторной плиты (ПП) ТСМ с высокой концентрацией урана (ЯОС) либо существенно ограничивали ее значение. В большинстве работ рассуждения ее авторов о происходящих процессах строились на представлениях 1986 - 1987 гг. о параметрах аварийного выброса из шахты реактора и явной переоценке роли вертолетной засыпки на процесс лавообразования

© А. В. Михайлов, 2016

[17]. Однако даже в работах [12, 16] данные современной реконструкции выброса продуктов деления (ПД) [18, 19] не приняты во внимание. Во всех версиях сценария, включая и [20], где рассмотрены отдельные вопросы образования ЯОС, материально-энергетический баланс не сводился.

На предварительном этапе наших исследований была предложена концептуальная модель аварийных процессов в шахте реактора, построенная на аналогии с расходом шихтовых материалов при одноразовой загрузке доменной печи [21]. В работе [22] были оценены ее материальные, временные и температурные параметры, диапазоны которых учитывали реальное обеднение ЛТСМ цезием, данные реконструкции динамики аварийного выброса [18, 19] и возможность реализации процессов при более умеренных температурах [23 - 25].

Целью настоящей работы было оценить материальные и энергетические источники образования ЛТСМ и ТСМ в ЯОС в рамках доменной версии сценария аварийных процессов.

Объекты и методика исследований

В качестве источников материального наполнения ЛТСМ и ЯОС были рассмотрены:

ядерное топливо и материалы АЗ 4-го энергоблока ЧАЭС, которые в результате взрывного разрушения образовали навал в виде шихты из ФАЗ на полу помещения 305/2;

серпентинит и металлоконструкции схемы «ОР» (нижняя биологическая защита);

бетон ПП и конструкций, фрагменты которых могли упасть в открытую шахту из центрального зала (ЦЗ) при подъеме схемы «Е» (верхняя биологическая защита) из штатного положения;

засыпка технологических зазоров (серпентинит между оболочкой схемы «ОР» и баком водяной защиты – схемой «Л», песок между бетонной стеной шахты реактора и схемой «Л»);

грузы, сброшенные в ЦЗ с вертолетов в апреле - мае 1986 г. при локализации аварии.

Все материалы, которые могли оказаться в реакционной зоне по фронту взаимодействия с топливом (в виде расплава либо уран-циркониевой смеси из состава шихты) и были израсходованы при образовании ЛТСМ и ЯОС, мы называли «жертвенными материалами» (ЖМ). Это понятие использовали по аналогии с терминологией, применяемой в проектах пассивных систем безопасности современных АЭС с устройствами для локализации расплава топлива (кориума) - УЛР. ЖМ различного состава используются в УЛР для разбавления кориума на

пути его наиболее вероятного движения после аварийного разрушения (прожога) герметичного корпуса реактора с целью снижения энтальпии расплава и обеспечения его подкритичности [26].

Для количественной оценки материальных источников ЛТСМ и ЯОС ТСМ использовали данные работ [7, 10, 11, 15 - 17, 21, 27 - 31] и рассчитывали:

среднюю концентрацию химических элементов в отдельных ЖМ и скоплениях ЛТСМ;

средневзвешенную (по урану в отдельных скоплениях) концентрацию химических элементов в черных и коричневых ЛТСМ;

отношение средних концентраций основных химических элементов в ЖМ и ЛТСМ;

интегральное количество основных химических элементов в ЖМ и ЛТСМ.

Отношение концентраций использовали в качестве индикатора для определения степени участия того или иного ЖМ в образовании отдельных скоплений ТСМ. Оптимальную композицию ЖМ и ее массовые параметры определяли по критерию минимизации расхождения материального наполнения (по основным химическим элементам) ЖМ и ЛТСМ. Интегральное количество химического элемента рассчитывали по его средневзвешенной концентрации в ЛТСМ либо по известному среднему в ЖМ. Масса ЛТСМ принималась в соответствии с результатами сведения топливного баланса.

Затраты тепла при образовании ТСМ оценивали для следующих процессов:

плавление металла и серпентинита в объемах поврежденного сектора схемы «ОР»;

плавление металлической обшивки тепловой защиты и бетона ПП по данным [28];

плавление серпентинита и песка технологических зазоров шахты;

плавление бетона фрагментов конструкций ЦЗ;

плавление мраморной крошки (кальцита) из состава материалов вертолетной засыпки.

Количественную оценку источников энергии выполняли на основе данных работ [7, 9, 32, 33] и рассчитывали:

ОТВ отработавшего топлива с учетом вылета легколетучих ПД;

тепло от реакции окисления графита в составе шихты из ФАЗ;

тепло от реакции окисления циркония оболочек топливных каналов (ТК) и твэлов;

тепло от реакции окисления циркония при взаимодействии с продуктами термического разложения бетона и материалов засыпки технологических зазоров.

Результаты и обсуждение

Уран-циркониевое отношение в реакторе до аварии и в стекломассах

После нарушения последнего барьера безопасности топливо в составе кориума (~ 8 т урана) [9] и скоплений из целых таблеток либо их фрагментов в составе шихты [7, 21] оказало мощное тепловое воздействие на целый ряд материалов и конструкций помещения 305/2. По сведениям о доаварийной загрузке реактора 4-го энергоблока ЧАЭС [10] в каждом загруженном ТК (1659) могло находиться 114,7 кг урана, в каждом твэле (1659 · 36) - 3,186 кг. В АЗ находилось 177 т циркония: 103 т - в составе ТК (1693) и 74 т - в составе твэлов. Соответственно в загруженном ТК циркония могло быть 105,44 кг. Исходя из приведенных данных, доаварийное уран-циркониевое отношение было оценено такими значениями: канальное - 1,09; твэльное - 2,57. Результаты анализа суммарной выборки данных [27, 29] (табл. 1), позволили оценить значения аналогичного показателя для ЛТСМ: коричневые стекломассы – от 1,7 до 2,5 (среднее 2,2); черные – от 0,9 до 1,4 (среднее 1,1).

Таблица 1. Средневзвешенная концентрация основных химических элементов в ЛТСМ, % мас.

Химический элемент	ЛТСМ	
	коричневые	черные
Si	32,2 (30,0 - 35,5)	30,9 (28,5 - 33,0)
Al	3,3 (3,0 - 3,6)	4,0 (3,9 - 4,6)
Mg	5,2 (4,2 - 6,1)	2,5 (2,3 - 3,0)
Ca	4,5 (3,9 - 4,8)	5,1 (4,5 - 6,1)
Na	3,1 (1,7 - 4,0)	4,2 (3,9 - 4,6)
U	9,7 (8,3 - 10,5)	4,6 (3,8 - 5,7)
Zr	4,5 (4,2 - 4,9)	4,2 (4,0 - 4,3)
Fe	1,0 (0,9 - 1,4)	1,2 (0,35 - 5,5)

Примечание. В скобках указаны диапазоны средних для отдельных скоплений.

Для коричневых ЛТСМ наибольшие значения U/Zr характерны для скоплений, наиболее удаленных от помещения 305/2 (стекломассы первичных потоков), наименьшие - для скоплений ближних потоков. Для основной массы черных ЛТСМ (большой горизонтальный поток) значения U/Zr практически не отличаются от величины, характерной для уран-циркониевой смеси канального происхождения. По нашему мнению, выявленные особенности свидетельствуют о кардинальном отличии источников образования двух типов ЛТСМ. Формирование коричневых стекломасс происходило в результате взаимодействия силикатсодержащих материалов с уран-

циркониевой смесью преимущественно твэльного происхождения. Буро-коричневый цвет силикатной матрицы ЛТСМ обусловлен включениями недоокисленного топлива (UO_{2+x}). Образование черных стекломасс происходило в условиях обилия окислителей в открытой шахте реактора по мере оседания в зону взаимодействия с силикатсодержащими материалами шихты из фрагментов ТК, сохранивших характерное уран-циркониевое отношение. Изменение цвета силикатной матрицы обусловлено включением в ее состав высших окислов урана (U_3O_8 , UO_3).

Графит не рассматривался в качестве источника материального наполнения стекломасс, несмотря на его обилие в шихте (~ 1184 т по оценкам [9]). Это обусловлено тем, что в составе ЛТСМ его нет (см. табл. 1). Однако не вызывает сомнений определяющая роль графита на формирование конфигурации навала из ФАЗ, а скорости его выгорания - на динамику образования черных стекломасс из уран-циркониевой смеси канального происхождения.

Источники образования стеклообразной матрицы ТСМ

На этапе подготовки материалов к публикации работы [22] был сведен топливный баланс в подреакторных помещениях и установлено, что 31 и 36 т урана могут находиться в составе коричневых и черных ЛТСМ соответственно, а 23 т - в составе ЯОС ТСМ. Интегральное количество урана в тех или иных ТСМ отражало массовые характеристики перегретого отработавшего топлива (единственного долговременного источника легколетучих ПД) и соответствовало параметрам выброса ПД на активной стадии аварии. При известном топливосодержании (см. табл. 1) масса коричневых ЛТСМ была оценена в 320 т, а черных - в 780 т. В сумме эта величина на 12 % ниже значений, рассчитанных по балансу магния [7, 9].

Ключевым моментом любого сценария аварийных процессов, предусматривающего образование стекломасс, является наличие непосредственного контакта отработавшего топлива с силикатсодержащими материалами. В литературе предлагается два механизма образования ЛТСМ: первый - образование уран-циркониевого расплава эвтектического состава в результате растворения урана в цирконии оболочек твэлов и плавление окружающих силикатсодержащих материалов с образованием силикатного расплава топлива [7]; второй - растворение циркониевых частей ТК и твэлов в силикатах с образованием кремний-циркониевого расплава с последующим растворением в его матрице оксидов урана [23,

24]. В основу последнего положены результаты исследования кинетики растворения оксидов урана, циркония и железа в силикатах. В отличие от варианта плавления (~ 2000 °С для образования эвтектики и 1600 - 1700 °С - для силикатного расплава топлива) реализация второго варианта допускает существенно более низкие температуры процессов (1150 - 1200 °С). Данные работы [22] и сведения о температурных режимах остекловывания радиоактивных отходов (РАО) [25, 35] подтверждают возможность образования коричневых и черных ЛТСМ при температурах не выше 1200 - 1350 °С.

Анализ полученных результатов для отношения Si/Zr (табл. 2) позволил сделать вывод о высокой степени однородности матрицы ЛТСМ с точки зрения вариабельности этого параметра ($\pm 15\%$ для коричневых и $\pm 5\%$ для черных). Различия между средними для коричневых и черных стекломасс практически нет. Для оксидной формы элементов среднее значение Si/Zr соответствует содержанию 65 (SiO₂) и 6 (ZrO₂) % мас.

На диаграмме состояния системы ZrO₂ - SiO₂ этот состав соответствует эвтектической точке, имеющей наименьшую температуру фазового перехода [34]. Присутствие многочисленных примесей, таких как Al₂O₃ и особенно соединений кальция и натрия, образующих твердые растворы с оксидами циркония и кремния, могло существенно понизить температуру протекания процессов. Известно, что при остекловывании РАО в состав шихты кроме кремнийсодержащих материалов обязательно добавляют компоненты, содержащие бор, алюминий, натрий, кальций (за исключением последнего для отходов магноксидных реакторов) и магний (за исключением стекла российского производства). Жидкое стекло, во многом похожее по химическому составу ЛТСМ, образуется уже при температурах 1050 - 1200 °С и обладает высокой технологичностью [25, 35]. Таким образом, механизм растворения циркония в силикатах с образованием кремний-циркониевого расплава определенного состава вполне мог реализоваться для обоих типов стекломасс.

Таблица 2. Соотношение концентрации основных химических элементов ЛТСМ

Помещение	Si/Mg	Si/Al	Si/Ca	Si/Na	Mg/Al	Si/Zr
Коричневые ЛТСМ						
02/15 (ББ-2)	5,8	11,8	9,1	20,9	2,0	8,3
012/7 (ББ-1)	5,8	9,8	6,5	8,9	1,7	7,3
210/7	7,1	8,3	6,3	7,5	1,2	6,1
Среднее:	6,2	9,8	7,2	10,4	1,6	7,2
Черные ЛТСМ						
217/2	14,2	6,8	5,1	7,6	0,5	7,2
210/6	9,5	7,1	6,3	7,3	0,8	7,1
304/3	14,3	8,5	6,9	7,2	0,6	7,7
Среднее:	12,4	7,7	6,1	7,4	0,6	7,4

Как видно из табл. 2, за редким исключением, в пределах скоплений одного типа ЛТСМ значения отношения кремния к другим элементам и Mg/Al находятся в достаточно узком диапазоне значений. Это явно свидетельствует о том, что при образовании силикатной матрицы были израсходованы ЖМ одного состава (табл. 3). Обнаруженное двукратное различие в значениях Si/Mg и Mg/Al (см. табл. 2) можно объяснить различием в соотношении масс серпентинита (доминирующего источника магния) и других ЖМ (бетон и/или песок), израсходованных при образовании коричневых и черных ЛТСМ.

Чтобы определить, какие ЖМ были израсходованы на образование силикатной матрицы ЛТСМ, был проведен анализ данных табл. 2 и 4. Сравнение полученных результатов показало,

что наибольшее число совпадений с ЛТСМ наблюдается для бетона и песка засыпки. Были обнаружены следующие тенденции к изменению этого параметра по отдельным скоплениям. Для первичных потоков коричневых ЛТСМ (помещение 02/15) значение Si/Al мало отличается от величины, характерной для песка засыпки. Косвенно о преобладающей роли засыпки в их образовании свидетельствует малое отличие значений Si/Na. Для первичных потоков черных ЛТСМ значение Si/Al совпадает с величиной, характерной для бетона. Различие для Si/Ca также показатель более значительной роли бетона, чем песчаной засыпки в образовании ЛТСМ. Выявленные особенности были приняты во внимание при выборе ЖМ в качестве материальных источников стекломасс.

Таблица 3. Химический состав ЖМ по данным [7, 32]

Элемент	Средняя концентрация, % мас.				
	Серпентинит	Бетон	Песок засыпки	Тринатрийфосфат	Кальцит
Si	20,2	32,5	39,6	-	-
Mg	26,3	0,4	-	-	-
Al	1,0	4,8	3,7	-	-
Na	-	2,0	1,8	42,0	-
Ca	1,0	7,7	1,2	-	40,0
Fe	2,2	1,2	1,4	-	-

Таблица 4. Отношение концентраций химических элементов в ЖМ

ЖМ	Si/Mg	Si/Al	Si/Ca	Si/Na	Mg/Al
Серпентинит	0,8	20,2	20,2	-	26,3
Бетон	81,3	<u>6,8</u>	<u>4,2</u>	16,3	0,08
Песок засыпки	-	<u>10,7</u>	33,0	<u>22,0</u>	-

Примечание. Подчеркнутые значения наиболее близки к значениям в табл. 2.

В табл. 5 приведены результаты оценки интегрального количества основных составных элементов ЛТСМ. Полученные данные использовались

в качестве базовых для определения оптимальной композиции ЖМ (ОКЖМ). В табл. 6 представлен ее состав.

Таблица 5. Интегральное количество основных химических элементов в ЛТСМ, т

Химический элемент	Коричневые ЛТСМ	Черные ЛТСМ	Сумма
Si	103,0 (- 0,3)	241,0 (- 0,5)	344,0 (- 0,5)
Mg	16,6 (- 1,8)	19,5 (- 5,8)	36,1 (- 4,0)
Al	10,6 (- 14,7)	31,2 (4,3)	41,8 (- 0,5)
Na	10,0 (22,0)	32,8 (21,0)	42,8 (21,0)
Ca	14,4 (- 2,7)	39,8 (- 4,3)	54,2 (- 4,0)
Fe	3,1 (- 48,0)	9,4 (- 5,0)	12,5 (- 15,8)

Примечание. В скобках указано расхождение между ЛТСМ и ОКЖМ, %.

Таблица 6. Материальные источники образования ТСМ в подреакторных помещениях (оптимальная композиция ЖМ)

ЖМ	Количество израсходованного материала, т		
	Коричневые ЛТСМ	Черные ЛТСМ	Сумма
Серпентинит схемы «ОР»	55	68	123
Серпентинит технологического зазора	7	4	11
Бетон подреакторной плиты	170	85	255
Песок засыпки	90	210	300
Бетон конструкций центрального зала	-	360	360
Тринатрийфосфат (раствор, Na ₃ PO ₄)	6,5	31,5	37 (1,5 %)**
Мраморная крошка (кальцит, CaCO ₃)	-	10	10 (0,5 %)**
Металл	110 (6)*	220 (9)*	330 (15)*

* В скобках дана масса стали, составные элементы которой вошли в состав ЛТСМ.

** В скобках указана доля от общего количества, сброшенного с вертолетов.

Мы не приводим подробной характеристики каждого из ЖМ, включенного в табл. 6. Их описание можно найти в [28]. В группу «Металл» были включены металлоконструкции, изготовленные по данным [28, 30, 31] из стали разных марок. Детальная оценка вклада этого источника на материальный состав ЛТСМ и ЯОС ТСМ - тема нашей будущей публикации.

Элементы конструкции схемы «ОР» были од-

ними из первых ЖМ на пути движения расплава топлива в подреакторное пространство. Исходя из визуально наблюдаемых масштабов повреждения схемы «ОР» (отсутствие юго-восточного квадранта), в ОКЖМ были включены: 123 т серпентинита, 150 т стали марки 10ХН1М, 60 т стали марки 0Х18Н10Т и 70 т черного металла. По оценкам [28], как минимум около половины из 130 т серпентинита технологического зазора

(между схемами «ОР» и «Л») могло оказаться в зоне взаимодействия с топливом. По сумме в состав ЛТСМ могло войти 134 т серпентинита (см. табл. 6), что не выходит за пределы верхней границы его доступного количества (185 т).

Бетон ПП после расплавления ее тепловой защиты из металла оказался следующим ЖМ после серпентинита схемы «ОР» на пути движения расплава топлива вниз. Количество термически разрушенного и расплавленного бетона оценивалось по данным бурения скважин, просуммированным в работе [28]. Количество бетона ПП, которое было включено в ОКЖМ (см. табл. 6), не превысило верхней границы объемов его разрушения (300 т). Масса песка засыпки, который мог выполнить роль ЖМ, соответствовала её предельно возможному значению (300 т [28]).

По результатам оценки материального наполнения ЛТСМ, количество кремния в стекломассах должно быть 344 т (см. табл. 5). Баланс с ЖМ для коричневых ЛТСМ был сведен с высокой точностью. Для достижения аналогичного показателя для черных ЛТСМ и восполнения дефицита кремния (116 т) были рассмотрены различные его источники. Выбор был сделан в пользу фрагментов бетонных конструкций ЦЗ. Это был единственно возможный вариант, который не нарушал баланс по магнию, не требовал выхода за верхние пределы потенциально возможного объема разрушения бетона ПП и количества песка, которое в принципе могло высыпаться из зазоров при аварии. Кроме того, вероятность попадания в эпицентр образования ЛТСМ фрагментов конструкций ЦЗ подтверждается наличием практически целой плиты и фрагмента боксасепаратора, а также других мелких бетонных

фрагментов в нагромождениях поверх $\frac{3}{4}$ схемы «ОР», оставшейся целой.

Раствор тринатрийфосфата (ТНФ) и кальцит (из состава мраморной крошки) могли попасть в реакционную зону в составе материалов, которые, по данным [17], сбрасывались в огромных количествах с вертолетов. Подобное предположение основывалось на мнении автора [7], что позволило минимизировать дефицит по натрию и кальцию (см. табл. 5). Однако различие по натрию, даже при условии попадания в шахту 1,5 % ТНФ (см. табл. 6), осталось достаточно высоким. Либо в шахту его попало больше, чем было принято в наших расчетах, либо, как предположил автор [7], при строительстве 4-го блока ЧАЭС в состав бетона вводилось повышенное количество натрия, чем предусматривалось при строительстве АЭС в СССР [32].

В итоге подобранный состав ОКЖМ позволил свести материальный баланс по основным составным элементам ЛТСМ с хорошей точностью (0,5 - 4 %), за исключением натрия. Учитывая отмеченные выше неопределенности в оценках доступного количества этого элемента, достигнутое расхождение можно рассматривать как вполне удовлетворительное.

Энергетические источники образования ТСМ

Результаты оценки основных источников тепловой энергии, которые могли образоваться в шахте реактора на активной стадии аварии, представлены в табл. 7. Для материалов ОКЖМ (см. табл. 6) были определены необходимые объемы энергозатрат на образование оцененной массы ЛТСМ и ЯОС ТСМ (табл. 8), а их сумма сопоставлена с итоговыми данными табл. 7.

Таблица 7. Оценка теплового эффекта от основных источников тепла

Источник тепла	Выход тепла	
	удельный, кДж/т	интегральный, кДж (ккал)
1. Реакция окисления графита: до CO до CO ₂	9,3 32,8	9,6 · 10 ⁹ ... 3,4 · 10 ¹⁰ (2,3 · 10 ⁹ ... 8,1 · 10 ⁹)
2. Остаточное тепловыделение отработавшего топлива: за 6 сут за 10 сут	39 · 10 ⁶ 56 · 10 ⁶	3,5 · 10 ⁹ (8,4 · 10 ⁸) 5,1 · 10 ⁹ (12,1 · 10 ⁸)
3. Реакция взаимодействия циркония (канальных труб и оболочек твэлов) с водяным паром	6,8 · 10 ⁶ [33] 7,3 · 10 ⁶ [7] 7,7 · 10 ⁶ [9]	7,6 · 10 ⁸ ... 8,6 · 10 ⁸ (1,8 · 10 ⁸ ... 2,1 · 10 ⁸)
4. Взаимодействие циркония с продуктами термического разложения бетона: H ₂ O CO ₂	7,7 · 10 ⁶ 5,9 · 10 ⁶	1,2 · 10 ⁸ (2,8 · 10 ⁷) 9,2 · 10 ⁷ (2,2 · 10 ⁷)
5. Взаимодействие циркония с SiO ₂	2,1 · 10 ⁶	3,3 · 10 ⁷ (0,8 · 10 ⁷)
По сумме 1 + 2 + 3 + 4 + 5 (за 6 - 10 сут):		1,4 ... 4,0 · 10 ¹⁰ (3,4 ... 9,5 · 10 ⁹)
По сумме 2 + 3 + 4 + 5 (за 6 - 10 сут):		4,5 ... 6,0 · 10 ⁹ (1,1 ... 1,4 · 10 ⁹)

П р и м е ч а н и е. Масса графита в шихте соответствует доле топлива в подреакторном пространстве от первоначальной загрузки (0,55). Масса циркония в шихте принята равной 112 т.

Таблица 8. Затраты тепла на расходование ЖМ

Материал	Масса, т	Q , кДж (ккал)
Серпентинит	134	$1,9 \cdot 10^8$ ($4,5 \cdot 10^7$)
Бетон конструкций ЦЗ	360	$5,3 \cdot 10^8$ ($1,3 \cdot 10^8$)
Бетон ПП	255	$3,7 \cdot 10^8$ ($8,9 \cdot 10^7$)
Песок засыпки	300	$4,4 \cdot 10^8$ ($1,1 \cdot 10^8$)
Мраморная крошка	10	$1,6 \cdot 10^7$ ($4,0 \cdot 10^6$)
Металл	330	$2,6 \cdot 10^8$ ($6,1 \cdot 10^7$)
Всего		$1,8 \cdot 10^9$ ($4,3 \cdot 10^8$)

Сравнение полученных данных показало, что рассмотренные источники тепла в своей сумме с большим запасом перекрывают предельные значения энергозатрат (см. табл. 7), необходимых для реализации сценария (см. табл. 8). Наиболее весомым оказался суммарный тепловой выход от реакции окисления (горения) графита в составе шихты. Вторым по значимости и длительности действия выявилось ОТВ топлива. Остальные источники не оказали существенного вклада в суммарный тепловой эффект. Полученные результаты в целом находятся в согласии с более ранними оценками [7, 9]. При этом необходимо учесть то обстоятельство, что доступный для горения графит находился только в составе топливосодержащей смеси, заполнившей шахту реактора. При такой конфигурации тепло от реакции его окисления расходовалось не на лавообразование, а на разогрев ФАЗ в составе шихты, стимулируя окисление циркония и топлива до высших окислов урана. Таким образом, в действительности только $\sim 1/4$ от интегрального количества тепла, которое могло выделиться (см. табл. 7), было сконцентрировано в зоне образо-

вания стекломасс. Считают, что тепловые потери непосредственно в реакционной зоне могли составлять как минимум 50 % за счет интенсивного рассеяния в верхнюю полусферу и эффекта «дымохода» [7, 9]. В итоге количество «полезного» тепла могло составить не более $2 - 3 \cdot 10^9$ кДж, чего вполне достаточно для покрытия необходимой суммы энергозатрат (см. табл. 8). В заключение следует отметить, что даже при таких объемах теплопотерь баланс тепла надежно обеспечивается за счет пролонгированного действия ОТВ отработавшего топлива.

Выводы

Оценены материальные и энергетические источники образования коричневых и черных ЛТСМ и ЯОС ТСМ на активной стадии аварии 4-го энергоблока ЧАЭС. Для доменной версии сценария сведен материальный и энергетический баланс. В модели процессов приняты во внимание и учтены наиболее известные на сегодняшний день сведения о масштабах разрушения реактора, данные о распределении топлива в подреакторных помещениях, результаты определения химического состава ЛТСМ, оценки временных и температурных параметров лавообразования. Полученные результаты свидетельствуют о доминирующей роли в энергетическом балансе ОТВ отработавшего топлива, высокотемпературное взаимодействие которого с ЖМ в подреакторном пространстве привело к образованию топливосодержащих стекломасс с низкой и высокой концентрацией урана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Проблемы безопасности атомной энергетики. Уроки Чернобыля: монография* / Б. С. Пристер, А. А. Ключников, В. Г. Барьяхтар, В. М. Шестопалов, В. П. Кухарь; под. ред. акад. НААН Украины Б. С. Пристера; - 2-е изд., доп. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2016. - 356 с.
2. *Авария на Чернобыльской АЭС: Опыт преодоления. Извлеченные уроки* / А. В. Носовский, В. Н. Васильченко, А. А. Ключников, Б. С. Пристер; под. ред. А. В. Носовского. - К.: Техніка, 2006. - 264 с.
3. *Савоненков В.Г., Андерсон Е.Б., Смирнова Е.А., Шабалев С.И.* Радиогеохимическое исследование топливосодержащих новообразований, возникших в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Тр. Радиового ин-та им. В. Г. Хлопина. - 2009. - Т. XIV. - С. 87 - 117.
4. *Черкашов Ю.М., Новосельский О.Ю., Чечеров К.П.* Исследование развития процессов при аварии на Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. - 2006. - Т. 100, вып. 4. - С. 243 - 258.
5. *Боровой А.А., Велихов Е.П.* Опыт Чернобыля (работы на объекте «Укрытие»). Часть 1. - М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2012. - 168 с.
6. *Киселев А.Н.* Послеаварийный баланс ядерного топлива на 4-ом блоке Чернобыльской АЭС. Москва, 1994. - 20 с. - (Препр. / РИЦ «Курчатовский институт»; 5716/3).
7. *Пазухин Э.М.* Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования // Радиохимия. - 1994. - Т. 36, № 2. - С. 97 - 142.
8. *Андерсон Е.Б., Богатов С.А., Боровой А.А. и др.* Лавообразные топливосодержащие массы объекта «Укрытие». - Киев, 1993. - 44 с. - (Препр. / АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова; 93).
9. *Богатов С.А.* Взаимодействие аварийного топлива 4-го энергоблока ЧАЭС с конструкционными материалами - количественные оценки // Объект «Укрытие» - 10 лет. Основные результаты научных

- исследований. - Чернобыль, 1996. - С. 112 - 127.
10. *Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС* / Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А. А. Боровой, Е. П. Велихов, А. А. Ключников. - М.: Наука, 2010. - 240 с.
 11. *Пазухин Э.М., Лагуненко А.С., Довыдьков С.А.* Новые количественные оценки ядерного топлива в помещении 305/2 объекта «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. - 2010. - Вып. 14. - С. 85 - 94.
 12. Об'єкт «Укриття»: 30 років після аварії: монографія / В. О. Краснов, А. В. Носовський, В. М. Рудько, В. М. Щербін. - Чернобыль : Ін-т проблем безпеки АЕС, 2016. - 512 с.
 13. *Рудя К.Г.* Исследование процессов развития аварии и образования топливосодержащих материалов разрушенного реактора 4 блока Чернобыльской АЭС: дис. ... канд. техн. наук. - К.: Чернобыльский центр ядерной безопасности, 2003. - 130 с.
 14. *Высотский Е.Д., Краснов В.А., Лагуненко А.С., Пазухин Э.М.* Топливо в помещении 305/2 4-го блока ЧАЭС. Критмассовые зоны. Уточнение сценария образования лавообразных топливосодержащих материалов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. - 2007. - Вып. 8. - С. 77 - 85.
 15. *Лагуненко О.С.* Пошук та дослідження прихованих скупчень паливовмісних матеріалів зруйнованого 4-го блока Чернобыльської АЕС: дис. ... канд. техн. наук / ІПБ АЕС НАН України. - К., 2008. - 148 с.
 16. *Огородников Б.И., Пазухин Э.М., Ключников А.А.* Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986 - 2006 гг. - Чернобыль, Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. - 456 с.
 17. *Боровой А.А., Пазухин Э.М., Стрижов В.Ф.* Эффективность мер по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС (активная стадия аварии). - Москва, 2007. - 38 с. - (Препр. / РНЦ «Курчатовский институт»; ИАЭ-6471/11).
 18. *Talerko N.* Mesoscale modeling of radioactive contamination formation in Ukraine caused by the Chernobyl accident // Journal of Environmental Radioactivity. - 2005. - Vol. 78(3). - P. 311 - 329.
 19. *Талерко Н.Н., Гаргер Е.К.* Оценки первичного выброса из аварийного блока ЧАЭС с помощью моделирования атмосферного переноса (обзор) // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. - 2006. - Вып. 5. - С. 80 - 90.
 20. *Лагуненко А.С., Краснов В.А., Довыдьков С.А.* Топливо в помещении 305/2. Возможный сценарий образования ядерно-опасных зон // Там же. - 2015. - Вып. 24. - С. 51 - 61.
 21. *Высотский Е.Д., Михайлов А.В.* Концептуальная модель «дóменной» версии образования ядерно-опасных скоплений на 4-м блоке ЧАЭС // Там же. - 2013. - Вып. 21. - С. 99 - 106.
 22. *Михайлов А.В., Дорошенко А.А.* О результатах восстановления динамики температуры ядерного топлива 4-го блока ЧАЭС на активной стадии аварии // Ядерная физика та енергетика. - 2015. - Т. 16, № 4. - С. 352 - 361.
 23. *Гончар В.В., Жидков А.В.* Динамика высокотемпературного взаимодействия аварийного ядерного топлива с конструкционными материалами РБМК // Проблемы Чернобыля. - 2002. - Вып. 9. - С. 25 - 33.
 24. *Жидков О.В.* 25 років еволюції уявлень про паливовмісні матеріали об'єкта «Укриття»: сценарії їхнього утворення та фізичні міркування // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чернобыля. - 2011. - Вып. 16. - С. 86 - 100.
 25. *Ожован М.И., Полуэктов П.П.* Применение стеккол при иммобилизации радиоактивных отходов // Безопасность окружающей среды. - 2010. - № 1. - С. 112 - 115.
 26. *Удалов Ю.П., Федоров Н.Ф., Лавров Б.А., Сидоров А.С.* Функциональные материалы для пассивного управления запроектной аварией ядерного реактора на внекорпусной стадии локализации расплава активной зоны. Часть 1 // Изв. Санкт-Петербург. гос. технолог. ин-та (техн. ун-та). - СПб., 2010. - № 8 (34). - С. 17 - 24.
 27. *Пазухин Э.М., Боровой А.А., Лагуненко А.С., Коломиец Ф.Н.* Изучение образцов лавообразных топливосодержащих материалов, отобранных с различной глубины залегания лавы // Проблемы Чернобыля. - 2002. - Вып. 9. - С. 66 - 75.
 28. *Vogatov S, Borovoi A., Gavrilov S. et al.* Half an hour after the beginning of the accident. - Moscow: OKPPRINT, 2006. - 22 p.
 29. *Богатов С.А., Боровой А.А., Гаврилов С.Л. и др.* База данных по местонахождению и состоянию ядерного топлива 4-го блока ЧАЭС до и после аварии. - Москва, 2007. - 146 с. - (Препр. / РНЦ «Курчатовский институт»; 130-11/2).
 30. *Тепловые и атомные электрические станции:* справ. / Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. - М.: Энергоиздат, 1982. - 624 с.
 31. *Бурлаков Е.В., Былкин Б.К., Гарин Е.В. и др.* Расчетный анализ радиационных характеристик конструкций реактора первого блока Чернобыльской АЭС после его окончательного останова. - Чернобыль, 2000. - 12 с. (Препр. / НАН Украины. Межотрасл.науч.-техн.центр «Укрытие»; 00-4).
 32. *Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев А.В., Стрижов В.Ф.* Физические модели тяжелых аварий на АЭС / Под ред. Н. Н. Пономарева-Степного. - М.: Наука, 1992. - 232 с.
 33. *Куприн А.С., Белоус В.А., Воеводин В.Н. и др.* Высокотемпературное окисление на воздухе оболочек из циркониевых сплавов Э110 и Zr-1Nb с покрытиями // ВАНТ. Сер. ФРП и РМ. - 2014. - № 1(89). - С. 126 - 132.
 34. *Торопов Н.В., Барзаковский В.П., Латин В.В., Курцева Н.Н.* Диаграммы состояния силикатных систем: справ. Вып. 1. Двойные системы. - Л.: Наука, 1969. - 822 с.
 35. *Полуэктов П.П., Суханов Л.П., Матюнин Ю.И.* Научные подходы и технические решения в области обращения с жидкими высокоактивными отходами // Рос. хим. журнал. - 2005. - Т. XLIX, № 4. - С. 29 - 41.

О. В. Михайлов

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль,***ЩОДО ПИТАННЯ ПРО МАТЕРІАЛЬНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ДЖЕРЕЛА УТВОРЕННЯ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС АВАРІЇ НА 4-МУ БЛОЦІ ЧАЕС**

Наведено результати детального аналізу джерел матеріального наповнення лавоподібних паливовмісних матеріалів (ПВМ) та скупчень із високою концентрацією урану. Для оптимальної композиції жертвонних матеріалів і ПВМ зведено матеріально-енергетичний баланс у моделі процесів. Здійснено кількісну оцінку залишкового тепловиділення відпрацьованого ядерного палива в ряду інших джерел теплової енергії тепла в шахті реактора. Зроблено висновок, що за умови 50 % втрат тепла кількості «корисного» тепла, що може залишитися, достатньо для реалізації доменної версії сценарію утворення ПВМ.

Ключові слова: уран, паливовмісні матеріали, жертвонні матеріали, джерела тепла, залишкове тепловиділення палива, матеріально-енергетичний баланс.

O. V. Mikhailov

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl***ON MATERIAL AND ENERGY SOURCES OF FORMATION OF FUEL-CONTAINING MATERIALS DURING CHERNOBYL NPP UNIT 4 ACCIDENT**

Results of detailed analysis material substance of lava-like fuel-containing materials sources (FCM) and clusters with high uranium concentration were presented. Material and energy balance are aggregated in a process model for optimal composition of sacrificial materials and FCM. Quantitative estimate is given for spent nuclear fuel' afterheat in a number of other heat energy sources in reactor vault. Conclusion was made that upon condition of 50 % heat loss, remained amount of "useful" heat would be sufficient for proceeding of blast furnace version of fuel-containing materials (FCM).

Keywords: uranium, fuel-containing materials, sacrificial materials, heat sources, fuel afterheat, material and energy balance.

REFERENCES

1. *The safety problems of the nuclear power. The lessons of Chernobyl: A Monograph* / B. S. Prister, A. A. Kljuchnikov, V. G. Bariakhtar, V. M. Shestopalov, V. P. Kukhar'; Ed. by B. S. Prister; - 2-nd edition. - Chernobyl': Institute for Safety Problems of NPP, 2016. - 356 p. (Rus)
2. *The Chernobyl accident: overcoming the experience. Lessons learned* / A. V. Nosovskij, V. N. Vasilchenko, A. A. Kljuchnikov, B. S. Prister; Ed. by A. V. Nosovskij. - K.: Tekhnika, 2006. - 264 p. (Rus)
3. *Savonenkov V.G., Anderson E.B., Smirnova E.A., Shabalev S.I.* Radiogeochemical study of fuel morbid growth resulting from the Chernobyl accident // Proc. V. G. Khlopin Radium Institute. - 2009. - Vol. XIV. - P. 87 - 117. (Rus)
4. *Cherkashov Yu. M., Novosel'skij O.Yu., Checherov K.P.* Investigation of processes at the Chernobyl nuclear power plant accident // Atomnaja energiya. - 2006. - Vol. 100, Iss. 4. - C. 243 - 258. (Rus)
5. *Borovoj A. A., Velikhov E. P.* Chernobyl experience (work on the project "Ukryttya"). Part 1. Moskva: NITs «Kurchatovskij institut», 2012. - 168 p. (Rus)
6. *Kiselev A.N.* Post-accident balance of nuclear fuel on the Unit 4 of the Chernobyl Nuclear Power Plant. - Moskva, 1994. - 20 p. - (Prepr. / RNTs «Kurchatovskij institut»; 5716/3). (Rus)
7. *Pazukhin E.M.* Lava-like fuel containing mass of the 4 Unit of the Chernobyl NPP: topography, physical and chemical properties, scenario of formation // Radiokhimija. - 1994. - Vol. 36, No. 2. - P. 97 - 142. (Rus).
8. *Anderson E.B., Bogatov S.A., Borovoj A.A. et al.* Lava-like fuel containing masses of "Ukryttya" object. - Kyiv, 1993. - 44 p. - (Prepr. / V. M. Glushkov Cybernetics Institute NAS Ukraine; 93). (Rus)
9. *Bogatov S. A.* Interaction of Chernobyl NPP power Unit 4's emergency fuel with structural materials - quantitative estimates // Object "Ukryttya" - 10 years. The main results of research. - Chernobyl', 1996. - P. 112 - 127. (Rus).
10. *Nuclear fuel in the "Ukryttya" encasement of the Chernobyl NPP* / R. V. Arutyunyan, L. A. Bolshov, A. A. Borovoj, E. P. Velikhov, A. A. Kljuchnikov. - M.: Nauka, 2010. - 240 p. (Rus).
11. *Pazukhin E.M., Lagunenko A.S., Dovydy'kov S.A.* New quantitative estimates of nuclear fuel in Room 305/2 Objects "Ukryttya" // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylija. - 2010. - Iss. 14. - P. 85 - 94. (Rus)
12. *Object "Ukryttya": 30 years after the accident: A monograph* / V. O. Krasnov, A. V. Nosov's'kij, V. M. Rud'ko, V. M. Shcherbin. - Chernobyl': Institute of NPP Nuclear Safety, 2016. - 512 p. (Ukr)
13. *Rudja K.G.* Research of developments of accident and formation of fuel containing materials of the destroyed reactor of the Chernobyl NPP Unit 4: Ph. D. thesis. - K.: Chornobyl Center for Nuclear Safety, 2003. - 130 p. (Rus).

14. *Vysotskij Ye.D., Krasnov V.O., Lagunenکو O.S., Pazukhin E.M.* 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 elektrostantsii i Chornobylya*. - 2007. - Iss. 8. - P. 77 - 85. (Rus)
15. *Lagunenکو O.S.* Search and study of the hidden accumulations of fuel containing materials of the destroyed Chernobyl NPP Unit 4: Ph. D. thesis / Institute of NPP Nuclear Safety, NAS of Ukraine. - Kyiv, 2008. - 148 p. (Ukr)
16. *Radioactive aerosols object "Ukryttya": 1986 - 2006* // B. I. Ogorodnikov, E. M. Pazukhin, A. A. Kljuchnikov. - Chernobyl': Institute of NPP Nuclear Safety, NAS of Ukraine, 2008. - 456 p. (Rus)
17. *Borovoj A.A., Pazukhin E.M., Strizhov V.F.* Effectiveness of measures to eliminate the consequences of the Chernobyl accident (active phase of the accident). - Moskva, 2007. - 38 p. - (Prepr. / RNTs «Kurchatovskij institut»; IAE-6471/11). (Rus)
18. *Talerko N.* Mesoscale modeling of radioactive contamination formation in Ukraine caused by the Chernobyl accident // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2005. - Vol. 78(3). - P. 311 - 329.
19. *Talerko N.N., Garger E.K.* Estimates of primary emissions from emergency Chernobyl Unit via atmospheric transport modeling (review) / *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsij i Chornobylya* - 2006. - Iss. 5. - P. 80 - 90. (Rus)
20. *Lagunenکو A.S., Krasnov B.A., Dovydkov S.A.* Fuel in the room 305/2. A possible scenario for the formation of nuclear-hazardous zones // *Ibid.* - 2015. - Iss. 24. - P. 51 - 61. (Rus)
21. *Vysotskij E.D., Mikhajlov A.V.* Conceptual model of the "blast furnace" version of formation of nuclear-dangerous accumulation of the Chernobyl NPP unit 4 // *Ibid.* - 2013. - Iss. 21. - P. 99 - 106. (Rus)
22. *Mikhajlov A.V., Doroshenko A.O.* On the results of nuclear fuel temperature dynamics restoration at the Chernobyl NPP Unit 4 during active phase of the accident // *Yaderna fizika ta energyka (Nucl. Phys. At. Energy)*. - 2015. - Vol. 14, No. 4 - P. 352 - 361. (Rus)
23. *Gonchar V.V., Zhidkov A.V.* Dynamics of high-temperature interaction of emergency nuclear fuel with constructional materials RBMK // *Problemy Chornobylya*. - 2002. - Iss. 9. - P. 25 - 33. (Ukr)
24. *Zhydkov O.V.* 25 years-evolution of "Shelter" object fuel-containing materials comprehension: Formation scenarios and physical considerations // *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsij i Chornobylya*. - 2011. - Iss. 16. - P. 86 - 100. (Ukr)
25. *Ozhovan M.I., Poluektov P.P.* The use of glasses in the immobilization of radioactive waste // *Bezopasnost' okruzhajushchej sredy*. - 2010. - No 1. - P. 112 - 115. (Rus)
26. *Udalov Ju.P., Fedorov N.F., Lavrov B.A., Sidorov A.S.* Functional materials for passive management of severe accident at a nuclear reactor in out-vessel stage of localization core melt. Part 1 // *Izv. Sankt-Peterb. gosud. tekhnol. in-ta (tekhn. un-ta)*. - Sant-Peterburg, 2010. - № 8 (34). - P. 17 - 24. (Rus)
27. *Pazukhin E.M., Borovoj A.A., Lagunenکو A.S., Kolomiets F. H.* The study of lava-like fuel containing materials' samples taken from different lava depth // *Problemy Chornobylya*. - 2002. - Iss. 9. - P. 66 - 75. (Rus)
28. *Bogatov S, Borovoi A., Gavrilov S. et al.* Half an hour after the beginning of the accident. - Moscow, OKPPPRINT, 2006. - 22 p.
29. *Bogatov S.A., Borovoj A.A., Gavrilov S.L. et al.* Database on location of Chernobyl NPP Unit 4's nuclear fuel before and after the accident. - Moskva, 2007. - 146 p. - (Prepr. / RHTs «Kurchatovskij institut»; 130-11/2 ot 01.02.2007 g.). (Rus)
30. *Thermal and Nuclear Power Plants: Reference book* / Ed. by V. A. Grigor'ev and V. M. Zorin. - Moskva: Energoizdat, 1982. - 624 p. (Rus)
31. *Burlakov E.V., Bylkin B.K., Garin E.V. et al.* Calculation analysis of the radiation characteristics of the ChNPP Unit 1 reactor structures after the final shutdown. - Chernobyl, 2000. - 12 p. (Prepr. / NAN Ukrainy. Mezhotrasl. naych.-tekhn. tsentr "Ukrytie"; 00-4). (Rus)
32. *Arutjunjan R.V., Bol'shov L.A., Vasil'ev A.V., Strizhov V.F.* Physical models of severe accidents on the NPP / Ed. by N. N. Ponomarev-Stepnoj. - Moskva: Nauka, 1992. - 232 p. (Rus).
33. *Kuprin A.S., Belous V.A., Voevodin V.N. et al.* High-temperature air oxidation of E110 and Zr-1Nb alloys claddings with coatings // *VAHT. Ser. FRP i RM*. - 2014. - № 1(89). - P. 126 - 132. (Rus)
34. *Toropov N.V., Barzakovskij V.P., Lapin V.V., Kurtseva N.N.* Phase Diagrams of silicate systems: Reference book. The first issue. Dual system. - Leningrad: Nauka, 1969. - 822 p. (Rus)
35. *Poluektov P.P., Sukhanov K.P., Matjunin Ju.I.* Scientific approaches and technical solutions in the treatment of high-level liquid waste management // *Ros. khim. zh.* - 2005. - Iss. XLIX, No. 4. - P. 29 - 41. (Rus)

Надійшла 06.07.2016
Received 06.07.2016