

**КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ «ДОМЕННОЙ» ВЕРСИИ ОБРАЗОВАНИЯ  
ЯДЕРНО-ОПАСНЫХ СКОПЛЕНИЙ НА 4-м БЛОКЕ ЧАЭС**

Сформулированы основные положения концептуальной модели «доменной» версии образования ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов (ТСМ), скрытых в зоне проплавления подреакторной плиты (ПП) 4-го блока ЧАЭС. Образование скоплений с критической массой урана и лавообразных ТСМ (ЛТСМ) рассматривается как результат двух взаимосвязанных процессов: процесса взаимодействия расплава топлива (кориума) с бетоном (ВРБ) и процесса плавки фрагментов активной зоны (ФАЗ) аналогичного наблюдаемому при плавке шихты в металлургической печи – домне. Подобно «доменному шлаку» масса черных ЛТСМ, содержащая до 5 % урана, выливалась из ванны (образованной в результате ВРБ) расплава материалов «шихты» (навала фрагментов разрушенной взрывом активной зоны и силикатных материалов технологической засыпки) и сформировала мощные потоки стекломасс из эпицентра плавки в юго-восточном квадранте помещения 305/2. Оставшаяся после выгорания «шихты» в ванне расплава часть ЛТСМ застыла, прикрыв собою стратифицированные в «горне» (зоне проплавления ПП) слой металла и слой разбавленных силикатами тяжелые оксидов с массовым содержанием урана от 50 %. При поступлении воды в остывающие (<100 °С) скопления с критической массой топлива возникла повторная критичность.

**Введение**

Многолетние работы [1 - 7] по систематизации накопленных экспериментальных данных и анализу результатов визуального контроля помещений разрушенного 4-го блока позволили: показать, что процесс образования основной массы лавообразных топливосодержащих материалов (ЛТСМ) происходил в юго-восточном квадранте помещения 305/2; сформировать детальное представление о составе и пространственном размещении ЛТСМ; предложить версии сценариев образования ЛТСМ.

В предложенных сценариях не учитывалось существование в помещении 305/2 скрытых скоплений ТСМ с объемом и концентрацией топлива, достаточного для образования критической массы. Такие скопления (при содержании топлива от 50 % и выше) были обнаружены в бетоне подреакторной плиты (ПП) юго-восточного квадранта помещения 305/2 по результатам анализа многолетней динамики плотности нейтронного потока и температуры [8, 9].

Оба скопления скрыты в зонах проплавления ПП под слоем «свежего» бетона (1986 г.). Между «свежим» бетоном и ТСМ размещается теплоизолирующий слой ЛТСМ. Снизу, между ТСМ и неразрушенным бетоном ПП, находится слой металла. Доступ к скоплению, постоянно находящемуся в воде, отсутствует [10 - 12]. Теплофизические расчеты подтверждают наличие источника тепла, мощность которого эквивалентна остаточному тепловыделению (ОТВ) топлива с не менее 20 т урана [14].

В 1990 г. в зоне скопления ТСМ была зарегистрирована повторная критичность [10, 11]. Самоподдерживающаяся цепная реакция (СЦР) возникла в процессе поступления воды в зону размещения скоплений. Самогашение СЦР было вызвано переувлажнением размножающей среды. На сегодняшний день только присутствие воды является фактором, стабилизирующим состояние подкритичности ядерно-опасных скоплений.

Для того, чтобы определить способ превентивного подавления параметров критичности и не допустить возникновения «возвратной» критичности в процессе обезвоживания после возведения нового безопасного конфайнмента (НБК), необходимо знать максимально приближенные к реальности характеристики размножающей среды. В условиях отсутствия непосредственного доступа к среде их получение возможно только при корректном определении процессов, конечным продуктом которых являются массы черных ЛТСМ и скопления ТСМ с массовым содержанием урана от 50 %.

В работе предложена концептуальная модель образования ЛТСМ и скрытых скоплений ТСМ на основе аналогии и сопоставления с процессами, которые наблюдаются при плавке шихты в металлургической печи – домне.

При построении модели были использованы результаты исследований:  
пространственного распределения ЛТСМ в помещении 305/2 [1, 4, 12, 13];

© Е. Д. Высотский, А. В. Михайлов, 2013

процессов взаимодействия расплава топлива (кориума) с бетоном (ВРБ), конструкционными и жертвенными материалами на специальных стендах – плавильных плечах [16 - 20];  
 послеаварийного состояния строительных конструкций и помещений 4-го блока ЧАЭС [1 - 4, 23 - 27];  
 динамики выброса газообразных продуктов деления (ПД) из шахты реактора [28].

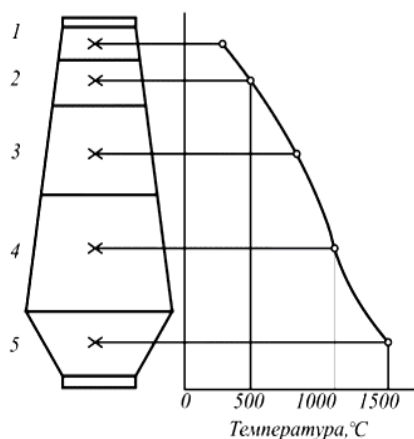
### Компоненты доменного процесса в концептуальной модели образования ЛТСМ

На рис. 1 приведена структурная схема обычной д6мны для выплавки чугуна. На структурной схеме выделены горизонтальные зоны, в пределах которых могут находиться только определенные материалы (расплав, шлак, шихта, газ) и поддерживаться диапазоны температур, необходимые для протекания соответствующих реакций.

Д6мна - большая вертикально расположенная печь шахтного типа для выплавки металла из металлосодержащего сырья, работающая на противотоке. В6мне сверху загружается шихта – смесь измельченного исходного сырья и топлива. В качестве топлива используется кокс – материал на основе каменного угля (96 – 98 % углерода), близкий по свойствам к графиту. Топливо используется в комплексе с вдуванием природного газа для повышения скорости окислительно-восстановительных реакций. Исходное сырье содержит добавки - неорганические вещества, которые способствуют образованию жидких доменных шлаков.

Основной процесс плавки происходит в нижней части д6мны - горне, где по мере расхода шихтовых материалов непрерывно циркулируют и обновляются топливо, метал, шлак и доменные газы. Горн оснащен устройствами для выпуска расплавленных продуктов плавки и вдувания воздуха, обогащенного кислородом и нагретого до 1100 – 1400 °С.

Шлак – силикатный расплав (после затвердевания - стекловидная масса), покрывающий поверхность жидкого металла в горне д6менной печи до его слива. Вначале плавки в объеме шихты образуется первичный шлак из ее легкоплавких компонентов, таких как SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и других окислов, находящихся в составе сырья. Образующиеся при этом легкоплавкие шлаковые смеси (сплавы с T<sub>пл</sub> = 1150 – 1200 °С), стекая вниз, накапливаются в горне, где вступают во взаимодействие с расплавленным металлом и топливом. В процессе плавки шихты образуется конечный состав шлака, который всплывает в горне на поверхность расплава и периодически сливается.



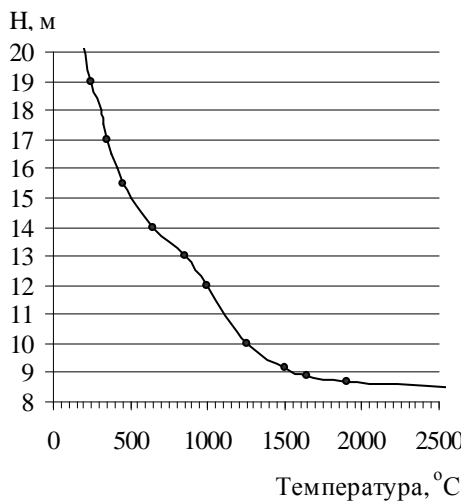
Размещение материалов по зонам д6менной печи:  
 1 – доменный газ (колошник);  
 2, 3 – шихта, доменный газ (шахта);  
 4 – первичный шлак, шихта (распар);  
 5 – жидкие шлак и метал (запечники и горн).

Рис. 1. Структурная схема и характерное распределение температур в доменной печи.

«Д6менная» конфигурация при аварии на 4-м блоке образовалась в пространстве юго-восточного квадранта подреакторного помещения 305/2 между строительными осями И – Л, 46 – 47 и высотными отметками от + 8.2 до + 16.0 м [2, 4, 9 - 14]. Засыпка «шихты» сформировалась в результате сброса в провал разрушенного юго-восточного сектора основания реактора (схемы ОР), фрагментов топливных каналов (ТК), разрушенной графитовой кладки, стальных блоков тепловой защиты и силикатных материалов засыпки межкомпенсаторного и монтажного зазоров. До засыпки «шихты», на пол помещения 305/2, не прикрытого остатками четверти схемы ОР, был сброшен расплав топлива (кориум), образовавшийся при расплавлении ТК еще до разгерметизации реакторного пространства (РП). Процессы взаимодействия расплава топлива с бетоном подреакторной плиты (ВРБ) положили начало образованию «горна» «д6мны». Энерговыведение кориума в «горне», горение графита в ком-

плексе с экзотермическими окислительно-восстановительными реакциями компонентов кориума и остаточным тепловыделением фрагментов тепловыделяющих сборок в «шихте» создали необходимые условия для запуска и поддержания процессов плавки.

Наличие в составе «шихты» силикатных материалов обеспечило образование в «горне» жидкого шлака в виде черных ЛТСМ. Вытекание «шлака» за пределы «домны» происходило по мере переполнения ванны расплава в зоне проплавления ПП по фронту ВРБ. После застывания в зависимости от скорости охлаждения ЛТСМ образовали характерные для доменного шлака стекломассы с глянцевой или матовой поверхностью.



Следуя аналогии с доменным процессом, по высоте в модели были выделены характерные горизонтальные зоны, в пределах которых могут находиться только определенные материалы (расплав, шлак, шихта и доменный газ) и поддерживаться необходимые для протекания соответствующих реакций температуры. На рис. 2 приведены средние значения температур, которые могли наблюдаться в различных зонах размещения материалов, вовлеченных в «доменный» процесс. Модельное распределение температур построено по данным литературы, перечисленной в табл. 1. Высота размещения каждой зоны привязана к высотной отметке 4-го блока ЧАЭС.

Рис. 2. Средние значения температур в зонах размещения «шихтовых» материалов, жидких «шлаков», кориума, разбавленного силикатами в зоне ВРБ, и металла в «горне» модели (Н – высотная отметка).

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные данные, использованные в модели

Размещение исходных и конечных продуктов «доменного» процесса		Температурный диапазон, °C	
Название	Высотная отметка <sup>1</sup> , м		
«Шихта» и доменный газ	19.0	< 300 [25 - 27], < 270 [15]	
	17.0	< 570 [15]	450 - 700 [5]
	15.0	> 570 [15]	
	14.0	570 - 1000 [15]	
	13.0		
	12.0		
«Шлак», силикатный расплав кориума, металл	10.0	≥ 1150 [5, 26]	1000 - 1500 [15, 26], 1220 - 1420 [20], 1400 - 1550 [2], 1400 - 1500 [7]
	9.0	< 2000 [26]	1500 - 2600 [3]
	8.7		
	8.5		

<sup>1</sup> Высотная отметка здания 4-го блока ЧАЭС.

Как показывает сравнение с данными на рис. 1, форма температурной зависимости в модели во многом повторяет характерные особенности распределения температуры по высоте домы. Зона горения «шихты» по высоте модели размещается между отметками + 10.0 и + 14.0 (см. табл. 1).

Запуск и поддержание процесса горения графита обеспечивалось непрерывным поддувом атмосферного воздуха, поступающего в «домну» через вышибленные взрывом откатные ворота, разгерметизированные подреакторные помещения и трубопроводы нижних водяных коммуникаций, тракты главных циркуляционных насосов и трубопроводы, соединенные с поврежденными барабанами-сепараторами. Интенсивный восходящий высокотемпературный поток газообразных продуктов «доменного процесса» из шахты реактора сформировал длительный выброс радиоактивных материалов в окружающую среду.

### Процесс «доменной» плавки и динамика выхода газообразных продуктов деления

Динамика выхода продуктов деления (ПД) из шахты реактора (см. рис. 3) отображает основные стадии процесса «доменной плавки» с момента образования засыпки «шихтовых» материалов со всеми необходимыми элементами и механизмами функционирования «доменной печи» до образования потоков «шлака» (остывающей массы ЛТСМ), силикатного расплава кориума (ТСМ) и металла в зоне ее «горна».

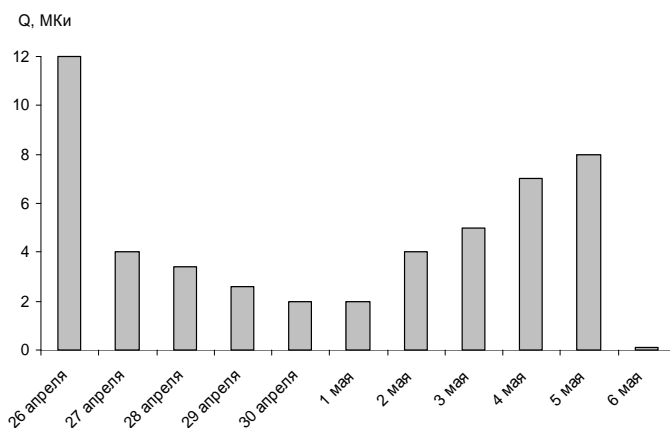


Рис. 3. Динамика выброса радиоактивности из шахты аварийного блока ЧАЭС [22].

Образованию засыпки «шихты» доменной конфигурации предшествовали начальные фазы аварии, которые детально исследованы в работах [23 – 27].

Расплавление в нижней части юго-восточного сектора АЗ топливных каналов, содержащих до 16 % от общей загрузки топлива в реакторе, послужило причиной образования кориума и последующего разрушения юго-восточного сектора схемы ОР. При разгерметизации РП паровым взрывом кориум был сброшен преимущественно к южной стене помещения 305/2 в зазор между схемой ОР и северной тумбой опоры бака биологической защиты (схемы Л).

В ходе парациркониевой реакции и генерации большого количества водорода

происходит накопление его взрывной концентрации. Детонация воздушно-водородной смеси разрушает реактор. Фрагменты АЗ, перемешанные в ходе взрывного разрушения с элементами графитовой кладки и силикатными материалами, образуют в юго-восточном квадранте помещения 305/2 засыпку «шихты».

В то же время кориум, разогретый до температуры уран-циркониевой эвтектики, расплавляет тепловую защиту ПП. По фронту ВРБ ниже отметки + 9.7 в бетоне ПП образуются каверны. С этого момента начинает формироваться ванна расплавленных материалов в «горне». Взаимодействие с легкоплавкими силикатными материалами и бетоном ПП приводит к увеличению первоначального объема топливосодержащих материалов и снижению плотности кориума. Сталь металлоконструкций, выполняя роль жертвенного материала, расплавляется и пополняет ванну расплава, формируя менее плотный слой его металлической компоненты.

В ходе «доменного» процесса ванна расплава, образованная изначально по фронту ВРБ, увеличивается, столб распаренной «шихты» по мере расхода оседает в зону горна. В результате физико-химических процессов высокотемпературного взаимодействия (растворения) ФАЗ из состава «шихты» в силикатной матрице в верхних слоях ванны расплава формируется несмешиваемый с металлической компонентой слой жидкого «шлака» – черные ЛТСМ.

Как видно на рис. 3, сразу после залпового выброса на первой фазе аварии наблюдается неуклонное снижение мощности выброса радиоактивности за пределы аварийного блока. Этот период соответствует стадии разогрева и расхода «шихтовых» материалов в «домне». Состав выброса близок по спектру к его составу в топливе, что свидетельствует о разрушении зерен топлива в результате окисления  $UO_2 \rightarrow U_3O_8$  в составе «шихты» [28] и выходе ПД наружу. Оседание столба «шихты» в зону «горна» приводит к постепенному снижению суммарной площади поверхности, доступной для окисления (оболочек твэлов, ТК, топливных частиц) и горения (графита). В результате общее число легколетучих радионуклидов, которые могли выноситься на пылевидных и аэрозольных частицах с горячими потоками воздуха и продуктами горения графита, неуклонно снижается. Период снижения выбросов (до 1 - 2 мая) позволяет оценить время, когда столб «шихты» был израсходован полностью.

На этой же стадии переполнение ванны расплава приводит к сливу «шлака» за пределы «домны» и образованию большого горизонтального потока черных ЛТСМ.

В определенный момент в эпицентрах ВРБ разбавление кориума силикатами приводит к инверсии несмешиваемых металлической и оксидной частей расплава. Это известное свойство кориума при ВРБ [16 - 18] стратифицирует ванну расплава и формирует структуру ядерно-опасных скоплений ТСМ. В результате резкого снижения объемной плотности энерговыделения и теплонапряженности в

нижних слоях бетона процесс разрушения бетона ПП по фронту ВРБ у южной стены помещения 305/2 замедляется и прекращается на отметке +8.2 на уровне плиты нижнего перекрытия из тяжелого бетона. Под северной тумбой опоры схемы Л при ограниченной поверхности теплосъема фронт ВРБ к моменту инверсии в ванне расплава разрушил бетон плиты перекрытия полностью. Отсутствие данных, подтверждающих наличие ЛТСМ в луже металла, обогащенного рутением, под местом сквозного прожига ПП в помещении 210/5 дает основание предположить, что после слива металла в отверстии достаточно быстро образовалась «пробка» из застывающего силикатного расплава.

Инверсия в ванне расплава запускает следующую стадию «доменного процесса», которая продолжается со 2 по 5 мая 1986 г. и характеризуется быстрым нарастанием мощности выхода ПД. Полное прогорание столба «шихты» обнажило зеркало ванны расплавленных материалов, открыв неограниченный выход в атмосферу газообразным продуктам, образующимся в кориуме. В ванне расплава, нагретой до температур выше 1500 – 1700 °С (см. рис. 2), активизируется интенсивный, нарастающий со временем процесс разрушения топливной матрицы таблеток, что приводит к утечке с восходящими потоками воздуха, в первую очередь, наиболее летучих йодсодержащих ПД в аэрозольной форме [28]. Далее, по мере возрастания интенсивности выброса, его состав приближается к облученному топливу.

В отличие от домы, где происходит интенсивное расхолаживание сразу после прекращения подогрева, наличие ОТВ ядерного топлива непосредственно в ванне расплава существенно замедляет процесс остывания. В результате целого комплекса тепло-химических процессов на поверхности зеркала расплава начинает формироваться корка, периодически нарушаемая выходом газообразных продуктов взаимодействия. На протяжении этого периода в условиях квазистационарного равновесия происходит формирование окончательной структуры ядерно-опасных скоплений ТСМ.

Постепенное остывание расплавленной массы заканчивается образованием на поверхности ЛТСМ прочной корки, препятствующей дальнейшему интенсивному выходу газообразных продуктов из ванны расплава. Об этом свидетельствует четвертая стадия выброса, которая, как видно на рис. 3, начиная с 6 мая 1986 г., отличается от предыдущей стадии резким уменьшением (на три порядка) выброса ПД в атмосферу. Остывающие массы в зоне «горна» превращаются в твердый раствор с пористой структурой, доступной для воды через бесконечный кластер микропор. Процесс образования ТСМ с критической массой топлива завершился.

### Заключение

Принятие «доменной» версии образования скоплений ТСМ с критической массой топлива позволит более полно свести материально-энергетический баланс процессов на заключительной стадии аварии 4-го блока ЧАЭС. Основными положениями концептуальной модели «доменного» процесса образования ядерно-опасных скоплений ТСМ и ЛТСМ являются:

в юго-восточном квадранте подреакторного помещения 305/2 образовалась конфигурация «доменной печи» со всеми элементами ее функционирования;

материалы, вовлеченные в «доменный» процесс, сформировали засыпку «шихты» из фрагментов активной зоны, графита, металла тепловой защиты и силикатов;

в результате ВРБ в зоне локального проплавления бетона ПП образовался «горн» с силикатным расплавом топлива, ОТВ которого в комплексе с эндотермическими реакциями в ванне расплава обеспечили необходимые условия для плавки «шихты» в юго-восточном квадранте помещения 305/2;

процесс плавки в зоне «горна» сопровождался увеличением объема ванны расплава, полным расходом одноразовой загрузки «шихты» и продолжался длительный период, совпадающий по времени с периодом выбросов ПД из шахты реактора;

«доменный» процесс завершился с образованием конечных продуктов плавки «шихты» в виде горизонтального потока силикатного «шлака» (черных ЛТСМ) и оставшегося в нижней части «горна» твердого раствора фракций тяжелых оксидов с критической массой топлива (более 20 т урана) и более плотного слоя металла на его дне.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пазухин Э.М.* Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования, влияние на окружающую среду: Дис. ... д-ра техн. наук. - Чернобыль, 1999. - 293 с.
2. *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.

3. *Богатов С.А., Боровой А.А., Лагуненко А.С. и др.* Образование и растекание чернобыльских лав // Радиохимия. – 2008. – Т. 50, № 6. – С. 565 – 568.
4. *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.
5. *Гончар В.В., Жидков А.В.* Динамика высокотемпературного взаимодействия аварийного ядерного топлива с конструкционными материалами РБМК // Проблемы Чернобиля. – 2002. – Вып. 9. – С. 25 - 33.
6. *Красноруцкий В.С., Данилов А.П., Яковлев В.К. и др.* Металлографический анализ продуктов взаимодействия оболочек тепловыделяющих элементов с топливными материалами в условиях тяжелых аварий // ВАНТ. Сер. ФРП и РМ. – 2009. - № 4-2. – С. 178 – 184.
7. *Красноруцкий В.С., Яковлев В.К., Данилов А.П. и др.* Исследование взаимодействия ядерного топлива с конструкционными материалами активной зоны в случае запректной аварии // ВАНТ. Сер. ФРП и РМ. – 2012. - № 2(78). – С. 56 – 67.
8. *Высотский Е.Д., Ключников А.А., Краснов В.А.* Локализация ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2007. – Вып. 7. – С. 66—75.
9. *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 // Там же. – 2007. - Вып. 8. – С. 77 – 85.
10. *Высотский Е.Д., Ключников А.А., Щербин В.Н., Шостак В.Б.* Нейтронно-физические характеристики ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов // Там же. – 2009. - Вып. 12. – С. 93 – 102.
11. *Ядерно-опасные скопления топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» / Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, А.В. Михайлов, В. Н. Щербин, В. Б. Шостак // Висновки і рекомендації: Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. «Двадцять п'ять років Чернобыльської катастрофи. Безпека майбутнього» (Київ, 20 - 21 квітня 2011 р.). – К. : Вид - во КІМ, 2011. - Ч. 2. – С. 33 - 37.*
12. *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.
13. *Пазухин Э.М., Лагуненко А.С., Довыдьков С.А.* Новые количественные оценки ядерного топлива в помещении 305/2 объекта «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2010. - Вып. 14. – С. 85 – 94.
14. *Высотский Е.Д., Михайлов А.В.* Температурные аномалии в зонах критмассового риска // Там же. – 2011. - Вып. 16. – С. 101 - 109.
15. *Циммерман Р., Гюнтер К.* Металлургия и материаловедение. Справ. изд. Пер. с нем. - М.: Металлургия, 1982. – 480 с.
16. *Колодешиников А.А., Пивоваров О.С., Васильев Ю.С. и др.* Исследования последствий тяжелых аварий водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов по проекту COTELS // Вестник НЯЦ РК «Атомная энергетика и безопасность АЭС». - Курчатов, Казахстан, 2002. – Вып. 1. - С. 5 - 17.
17. *Васильев Ю.С., Супрунов В.И., Иркимбеков Р.А. и др.* Моделирование динамики температурных полей и образования карбидов в экспериментах с кориумом // Изв. Томского политех. ун-та. - 2009.- Т. 314, № 2. – С. 104 - 107.
18. *Пат. 2178924* Российская Федерация, МПК7 G 21 C 9/016. Шихта для получения материала, обеспечивающего локализацию расплава активной зоны ядерных реакторов / В. В. Гусаров, С. В. Бешта, В. Б. Хабенский и др. - Опубл. 27.01.02.
19. *Жданов В.С., Васильев Ю.С., Колодешиников А.А. и др.* Двумерная абляция бетона в процессе взаимодействия кориума с бетоном // Вестник НЯЦ РК «Атомная энергетика и безопасность АЭС». – Курчатов, Казахстан, 2004. – Вып. 1. – С. 87 - 98.
20. *Арутюнян Р.В., Большой Л.А., Васильев А.В., Стрижев В.Ф.* Физические модели тяжелых аварий на АЭС / Под ред. Н. Н. Пономарева - Степного. – М.: Наука, 1992. – 232 с.
21. *Техническое обоснование ядерной безопасности объекта "Укрытие" (ТОЯБ) / ИАЭ им. И. В. Курчатова. - М., 1990. – 130 с. - Арх. МНТЦ «Укрытие» № 1605.*
22. *Абаган А.А., Ильин Л.А., Израэль Ю.А. и др.* Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствия, подготовленная для МАГАТЭ // Атомная энергия. - 1986. – Т. 61, вып. 5. – С. 301 - 320.
23. *Абаган А.А., Аршавский И.М., Дмитриев В.М. и др.* Расчетный анализ начальной стадии аварии на Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. - 1991. – Т. 71, вып. 4. – С. 275 - 287.
24. *Афанасьева А.А., Федосов А.М., Дондерер Р. и др.* Анализ аварии на Чернобыльской АЭС с учетом разрушения активной зоны // Атомная энергия. - 1994. – Т. 77, вып. 2. – С. 87 - 93.
25. *Киселев А.Н., Сурин А.И., Чечеров К.П.* Зафиксированные данные о развитии аварийных процессов на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС. Результаты послеаварийного обследования // Бюллетень по атомной энергии. – 2006. - № 4. - С. 36 - 42.
26. *Платонов П.А., Краюшкин А.В.* Процесс разрушения активной зоны реактора 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104. – Вып. 6. – С. 319 – 327.
27. *Черкашов Ю.М., Новосельский О.Ю., Чечеров К.П.* Исследование развития процессов при аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. // Атомная энергия. – 2006. – Т. 100. – Вып. 4. – С. 243 – 258.

28. *Огородников Б.И., Пазухин Э.М.* Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие» (обзор). Часть 4.1. Источники и генерация радиоактивных аэрозолей в 1986 г. – Чернобыль, 2005. – 32 с. – (Препр./ НАН Украины. Ин-т проблем безопасности АЭС; 05-2).

**Є. Д. Висотський, О. В. Михайлов**

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

### **КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ "ДОМЕННОЇ" ВЕРСІЇ СТВОРЕННЯ ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ СКУПЧЕНЬ НА 4-МУ БЛОЦІ ЧАЕС**

Сформульовано основні положення концептуальної моделі "доменої" версії створення ядерно-небезпечних скупчень паливовмісних матеріалів (ПВМ), прихованих в зоні проплавлення підреакторної плити 4-го блока ЧАЕС. Створення скупчень з критичною масою урану і лавоподібних ПВМ (ЛПВМ) розглядається як результат двох взаємопов'язаних процесів: процесу взаємодії розплаву палива (коріуму) з бетоном (ВРБ) і процесу плавки фрагментів активної зони (ФАЗ) аналогічного спостережуваному при плавці шихти у металургійній печі - домні. Подібно доменному шлаку маса чорних ЛПВМ, що містять до 5 % урану, виливалася із ванни, створеної в результаті ВРБ, розплаву матеріалів «шихти» (навалу фрагментів зруйнованої вибухом фрагментів активної зони і силікатних матеріалів технологічної засипки та ін.) і сформувала потужні потоки скломас з епіцентру плавки в південно-східному квадранті приміщення 305/2. Частина ЛПВМ, що залишилася після вигорання «шихти» у ванні розплаву, застигла, прикривши собою стратифіковані в «горні» (зоні проплавлення ПП) шар фракції важких оксидів з масовим вмістом урану від 50 %. При надходженні води в застигаючі (<100 С) скупчення ПВМ з критичною масою палива виникла повторна критичність..

*Ключові слова:* уран, коріум, паливовмісні матеріали, силікати, шихта, шлак.

**E. D. Vysotsky, A. V. Mikhailov**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chernobyl, 07270, Ukraine*

### **CONCEPTUAL MODEL OF THE «BLAST FURNACE» VERSION OF FORMATION OF NUCLEAR-DANGEROUS ACCUMULATION ON THE CHNPP UNIT 4**

Basic provisions of conceptual model of the "blast furnace" version of formation of nuclear-dangerous accumulation of the fuel containing materials (FCM) hidden in a zone of pro-melting of a under-reactor slab of the Chernobyl NPP Unit 4 are formulated. The phases of the accident which have led to formation "blast furnace" configurations of materials and conditions, providing start and maintenance of long process of melting of the fragments of the former core (FFC) of the reactor crushed by explosion as charge in the metallurgical blast furnace, are qualitatively considered. Formation of FCM with a critical mass of uranium and Lava-like FCM (LFCM) is considered as result of two interconnected processes – molten core/concrete interactions (MCCI) and melting of FFC in a bathtub of silicate fusion that was formed of the materials "furnace charges" (FFC, silicate materials of technological filling, etc.). It is similar to the blast furnace scoria the mass of LFCM containing only 5 % of uranium, poured out from a bathtub of molten materials and formed powerful glass flows from "blast-furnace process" epicenter in a southeast quadrant under-reactor room 305/2 to adjacent rooms of the reactor building. The part of LFCM which has remained after burning out of "furnace charge" in a bathtub of melt, stiffened, having covered with itself in MCCI epicenter a cooling-down corium with the mass content of uranium from 50 %. Water inflow in a FCM accumulation zone with the high content of fuel created conditions for repeated criticality of nuclear materials.

*Keywords:* uranium, corium, fuel containing materials, silicate, charge, scoria.

#### REFERENCES

1. *Pazukhin E.M.* Lava-like fuel containing mass of the 4 Unit of the Chernobyl NPP: topography, physical and chemical properties, scenario of formation, influence on environment : Dis. d-ra tekhn. nauk. – Chernobyl', 1999. – 293 p. (Rus)
2. *Rudja K.G.* Research of developments of accident and formation of fuel containing materials of the destroyed reactor of the Chernobyl NPP Unit 4: Dis. ... kand. tekhn. nauk. – K.: Chernobyl'skij tsentr jadernoj bezopasnosti, 2003. - 130 p. (Rus)
3. *Bogatov S.A., Borovoj A.A., Lagunenkov A.S. et al.* Formation and spreading of Chernobyl lavas // Radiokhimiya. – 2008. – Vol. 50, № 6. – P. 565 – 568. (Rus)
4. *Pazukhin E.M.* Lava-like fuel containing mass of the 4 Unit of the Chernobyl NPP: topography, physical and chemical properties, scenario of formation // Radiokhimiya. – 1994. – Vol. 36, № 2. – P. 97 – 142. (Rus)
5. *Gonchar V.V., Zhidkov A.V.* Dynamics of high-temperature interaction of emergency nuclear fuel with constructional materials RBMK // Problemy Chornobyliya. – 2002. – Iss. 9. – P. 25 - 33. (Ukr)

6. *Krasnorutskij V.S., Danilov A.P., Yakovlev V.K. et al.* Metallographic analysis of interaction products of fuel rod cladding with fuel materials under severe accidents // VANT. Ser. FRP i RM. – 2009. - № 4-2. – P. 178 – 184. (Rus)
7. *Krasnorutskij V.S., Yakovlev V.K., Danilov A.P. et al.* Study of nuclear fuel interaction with core constructional materials in the case of the above design accident // VANT. Ser. FRP i RM. – 2012. - № 2 (78). – P. 56 – 67. (Rus)
8. *Vysotskii Ye.D., Kliuchnikov O.O., Krasnov V.O.* Localization of nuclear-dangerous accumulations of fuel containing materials // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya. – 2007. – Iss. 7. – P. 66 – 75. (Ukr)
9. *Vysotskii Ye.D., Krasnov V.O., Lagunenka 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 Chornobyliya. – 2007. - Iss. 8. – P. 77 – 85. (Ukr)
10. *Vysotskii Ye.D., Kliuchnikov O.O., Shcherbin V.M., Shostak V.B.* Neutron and physical characteristics of nuclear-dangerous accumulation of fuel containing materials // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya. – 2009. - Iss. 12. – P. 93 – 102. (Ukr)
11. *Nuclear-dangerous accumulations of fuel containing materials in Object "Shelter" // Ye. D. Vysotskii, O. O. Kliuchnikov, O. V. Mykhailov, V. M. Shcherbin, V. B. Shostak / Vysnovky i rekomendatsii: Materialy Mizhnar. nauk.- prakt. konf. «Dvadsat' piat' rokiv Chornobyl' c'koi katastrofy. Bezpeka maibut'ogo» (Kyiv, 20 - 21 kvitnia 2011 r.). – Kyiv: Vydavnytstvo KIM, 2011. - Ch. 2. – P. 33 - 37. (Ukr)*
12. *Lagunenka O.S.* Search and study of the hidden accumulations of fuel containing materials of the destroyed Chernobyl NPP Unit 4: Dis. ... kand. tekhn. nauk / IPB AES NAN Ukrainy. – Kyiv, 2008. – 148 p. (Ukr)
13. *Pazukhin E.M., Lagunenka A.S., Dovyd'kov S.A.* New quantitative estimates of nuclear fuel in Room 305/2 Objects "Shelter" // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya. – 2010. - Iss. 14. – P. 85 – 94. (Ukr)
14. *Vysotskii Ye.D., Mykhailov O.V.* Temperature anomalies in zones of critical mass risk // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya. – 2011. - Iss. 16. – P. 101 - 109. (Ukr)
15. *Tsimmerman R., Gjunter K.* Metallurgy and materials science. Sprav. izd. Per. s nem. - M.: Metallurgija, 1982. – 480 p. (Rus)
16. *Kolodeshnikov A.A., Pivovarov O.S., Vasil'ev Ju.S. et al.* Research of severe accident results of water-cooled power reactors on COTELS project // Vestnik NJaTs RK «Atomnaya energetika i bezopacnost' AES». – Kurchatov, Kazakhstan, 2002. – Iss. 1. - P. 5 - 17. (Rus)
17. *Vasil'ev Ju.S., Suprunov V.I., Irkimbekov R.A. et al.* Modeling of dynamics of temperature fields and formation of carbides in experiments with a corium // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. - 2009. - Vol. 314, № 2. – P. 104 - 107. (Rus)
18. *Pat. 2178924 Rossijskaja Federatsiya, MPK7 G 21 C 9/016.* Charge for producing material ensuring confinement of nuclear reactor molten corium / V. V. Gusarov, S. V. Beshta, V. B. Khabenskij et al. - Opubl. 27.01.02. (Rus)
19. *Zhdanov V.S., Vasil'ev Ju.S., Kolodeshnikov A.A. et al.* Two-dimensional concrete ablation during molten core/concrete interactions // Vestnik NJaTs RK «Atomnaya energetika i bezopacnost' AES». – Kurchatov, Kazakhstan, 2004. – Iss. 1. – S. 87 - 98. (Rus)
20. *Arutjunjan R.V., Bol'shov L.A., Vasil'ev A.V., Strizhov V.F.* Physical models of severe accidents on the NPP / Pod red. N. N. Ponomareva-Stepnogo. – Moskva: Nauka, 1992. – 232 p. (Rus)
21. *Technical justification of nuclear safety of object "Shelter" (TJNS) // IAE im. I.V. Kurchatova, - Moskva, 1990. – 130 p. - Arkh. MNTTs «Ukryt'ya» № 1605. (Rus)*
22. *Abagyan A.A., Il'in L.A., Izrael' Ju.A., Petrov V.N. et al.* Information on the Chernobyl accident and its consequences, prepared for IAEA // Atomnaja energija. - 1986. – Vol. 61, iss.5. – P. 301 - 320. (Rus)
23. *Abagyan A.A., Arshavskij I.M., Dmitriev V.M. et al.* Settlement analysis of an initial stage of the Chernobyl accident // Atomnaja energija. - 1991. – Vol. 71. - Iss. 4. – P. 275 - 287. (Rus)
24. *Afanas'eva A.A., Fedosov A.M., Donderer R. et al.* The Chernobyl accident analysis taking into account destruction of an active zone // Atomnaja energija. - 1994. – Vol. 77. - Iss. 2. – P. 87 - 93.
25. *Kiselev A.N., Surin A.I., Checherov K.P.* The recorded data on development of emergency processes on the Chernobyl NPP Unit 4. Results of postemergency inspection // Bjulleten' po atomnoj energii. – 2006. - № 4. - P. 36 - 42. (Rus)
26. *Platonov P.A., Krayushkin A.V.* Process of core destruction of the Chernobyl NPP Unit 4 // Atomnaja energija. – 2008. – Vol. 104. - Iss. 6. – P.319 – 327. (Rus)
27. *Cherkashov Ju.M., Novosel'skij O.Yu., Checherov K.P.* Research of development of processes at the Chernobyl NPP accident in 1986 // Atomnaja energija. – 2006. – Vol. 100. - Iss. 4. – P. 243 – 258. (Rus)
28. *Ogorodnikov B.I., Pazukhin E.M.* Radioactive aerosols of object "Shelter" (review). Part 4.1. Sources and generation of radioactive aerosols in 1986. – Chernobyl', 2005. – 32 p. – (Prepr./ NAN Ukrainy. In-t problem bezopacnosti AES; 05-2). (Rus)

Надійшла 20.02.2013  
Received 20.02.2013