

**ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**  
NUCLEAR, RADIATION AND  
ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 621.039.586 (520)  
doi: 10.26583/gns-2022-03-01

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ОЦЕНКИ СОСТАВА  
КОРИУМА, ОБРАЗОВАВШЕГОСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ  
НА АЭС ФУКУСИМА ДАЙТИ**

© 2022 Рыжов Сергей Николаевич<sup>1</sup>, Богданова Екатерина Владимировна<sup>2</sup>,  
Рыжков Александр Александрович<sup>3</sup>, Пугачев Павел Александрович<sup>4</sup>,  
Тихомиров Георгий Валентинович<sup>5</sup>, Терновых Михаил Юрьевич<sup>6</sup>,  
Алеева Татьяна Борисовна<sup>7</sup>

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

<sup>1</sup>SNRyzhov@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1801-7615>

<sup>2</sup>EV Bogdanova@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8184-2124>

<sup>3</sup>AARyzhkov@mephi.ru

<sup>4</sup>PAPugachev@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8175-3957>

<sup>5</sup>GVTikhomirov@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5332-7272>

<sup>6</sup>MYTernovykh@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9830-5501>

<sup>7</sup>TBAleeva@mephi.ru

*Аннотация.* В данной работе проводится анализ методов и технологий оценки способа образования, состава, характеристик и особенностей кориума, который является смесью ядерных и конструкционных материалов активной зоны ядерного реактора, образовавшейся в результате аварии, сопровождаемой частичным или полным расплавлением активной зоны. Исследование проводится на основе данных по изучению кориума, образовавшегося в результате аварии на атомной электростанции Фукусима Дайити, находящихся в открытом доступе и являющимися результатом работы множества научных организаций по всему миру. Исследования кориума представляют собой один из главных вопросов в рамках повышения ядерной безопасности в дальнейшем и является одной из задач проведения успешной процедуры устранения последствий аварии на АЭС Фукусима Дайити. Без подробного анализа нейтронно-физических, материаловедческих, гравиметрических и иных характеристик кориума, а также создания комплекса данных по кориуму объединяющего в себе эти характеристики, невозможно в дальнейшем создать полноценную модель кориума и организовать эффективный и безопасный процесс удаления ядерных материалов из поврежденных блоков атомной электростанции Фукусима Дайити. Целью работы является объединение существующих результатов исследований в комплекс данных, который в дальнейшем может быть использован для моделирования кориума с использованием нейтронно-физических кодов. Создаваемый комплекс, включает в себя такие данные, как размер, плотность и морфология образцов кориума и их приблизительный нуклидный состав. Создаваемый комплекс данных позволит не только выполнять задачи, связанные с повышением уровня безопасности при реализации процедуры устранения последствий аварии на АЭС Фукусима Дайити путем моделирования, но и послужить основой для создания международного бенчмарка моделирования смеси, содержащей ядерные материалы (ЯМ).

*Ключевые слова:* Фукусима, кориум, авария, нейтронно-физическое моделирование, обзор, гамма-спектрометрия, Три-Майл-Айленд, деконтаминация, расплавление активной зоны, нуклидный состав, ядерное топливо.

*Для цитирования:* Рыжов С.Н., Богданова Е.В., Рыжков А.А., Пугачев П.А., Тихомиров Г.В., Терновых М.Ю., Алеева Т.Б. Анализ методов и технологий оценки состава кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 3(44). – С. 5-21. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-01>

Поступила в редакцию 15.06.2022

После доработки 17.08.2022

Принята к печати 31.08.2022

### **Введение**

В результате аварии на атомной электростанции Фукусима Дайити, произошедшей 11 марта 2011 года, на энергоблоках станции произошло нарушение третьего барьера безопасности, т.е. нарушение целостности корпуса реактора. Часть радиоактивных материалов из активных зон реакторов энергоблоков 1-3 вышла за пределы корпуса реактора. Это привело к возникновению дополнительной опасности и трудностям в процедуре локализации, иммобилизации и транспортировки ядерных материалов с территории АЭС Фукусима Дайити в ходе ликвидации последствий аварии. В результате аварии, сопровождавшейся расплавлением активной зоны и корпуса реактора, был образован кориум – лавообразный сплав содержимого ядерного реактора, состоящий из смеси ядерного топлива с бетоном, металлических элементов конструкций и прочего [1].

Одной из сложнейших задач процедуры устранения последствий данной аварии является оценка структуры и свойств кориума – сплава с крайне высоким уровнем излучения. До настоящего времени высокий уровень радиационной обстановки, ограниченность маневренности и труднодоступность пространства не позволяют получить полную картину о реальной ситуации внутри и снаружи поврежденной активной зоны, в том числе определить состав и основные характеристики кориума даже с использованием современной роботизированной техники. Стоит особо отметить, что на данный момент неизвестны ни нуклидный состав кориума, ни его распределение. Задача осложняется тем, что необходимо учитывать возможные изменения в кориуме при его перемещении или любом другом взаимодействии с ним.

В работе представлен полноценный комплекс данных по кориуму, включающий в себя нуклидный состав, геометрические и плотностные характеристики элементов кориума, строение (уровень гомогенности элементов) и структура, подготовленный на основе результатов проведенных исследований, находящихся в открытом доступе. Учитывая, что некоторые существующие исследования противоречат друг другу, сформирована система различных вариантов набора характеристик кориума, которые значительно отличаются в ряде параметров. Данная система в дальнейшем может быть использована для обоснования безопасности при выводе из эксплуатации АЭС Фукусима Дайити. В исследовании используется опыт анализа предыдущей крупной аварии с расплавлением активной зоны, которая имела место на втором энергоблоке электростанции Три-Майл-Айленд в США в 1979 году.

### **Оценка применимости методов анализа поврежденной активной зоны реактора АЭС Три-Майл-Айленд**

28 марта 1979 года в США на втором энергоблоке АЭС Три-Майл-Айленд (ТМІ-2) произошла авария, в результате которой наблюдалось расплавление около 50 % активной зоны реактора, после чего энергоблок так и не был восстановлен. Для определения возможности использования данных по структуре и составу кориума ТМІ-2 для анализа кориума на АЭС Фукусима Дайити был изучен ряд официальных отчетов о ходе протекания аварии и ее последствиях [2-9]. Можно утверждать, что условия формирования кориума весьма схожи [2], и полученные данные могут быть использованы для разработки системы различных вариантов набора характеристик кориума.

При анализе аварий на ТМІ-2 и на АЭС Фукусима Дайити можно сделать вывод, что в обоих случаях в результате аварии произошло расплавление материалов активной зоны, включая топливные, конструкционные и поглощающие материалы и продукты деления (ПД), что привело к образованию кориума, процент содержания делящихся материалов в котором зависел от месторасположения отдельных его элементов в поврежденной активной зоне [2]. Для обоих случаев, одной из главных задач процедуры устранения последствий аварии являлось определение состава кориума для

его эффективного извлечения из поврежденной активной зоны с дальнейшей утилизацией. При этом, как будет показано далее, в настоящее время большинство методов оценки состава и процентного соотношения ядерных материалов кориума основывается на опыте и наработках, которые были разработаны для решения задач анализа кориума на ТМІ-2. Рассмотрим более подробно особенности подходов к анализу кориума на ТМІ-2, а также результаты исследований, которые могут быть использованы для моделирования кориума.

В [3] приводятся оценки аварии на ТМІ-2, включая исследование взаимодействия топлива и конструкционных материалов, анализ состава элементов кориума, дозиметрия, оценка структура поврежденной активной зоны реактора и другое. На рисунке 1 показаны представления о структуре поврежденной активной зоны от чисто гипотетического (рис. 1 а) до оцененного с использованием специализированных кодов (таких как ATHLET, MELCORE, MAAP, MARCH и другие) (рис. 1 б). На рисунке 2 показаны представления, сформированные на основе анализа проб.

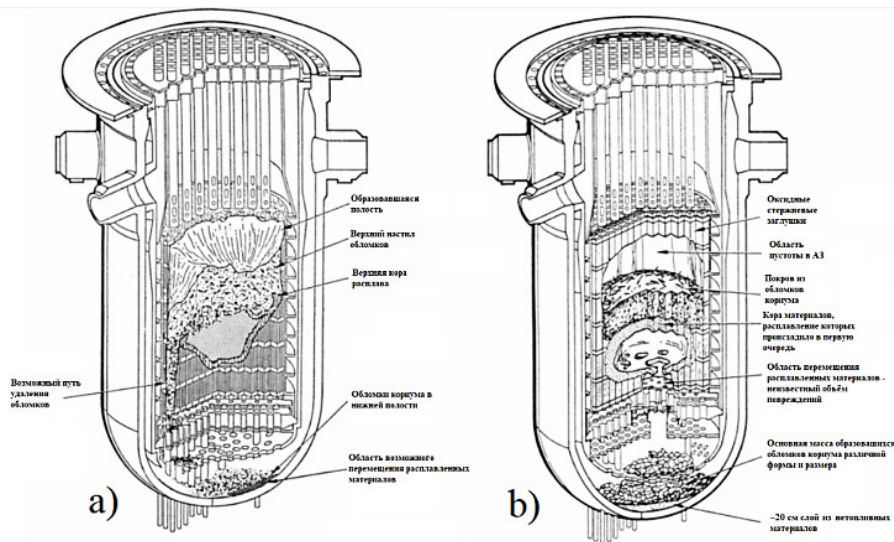


Рисунок 1 – а) Гипотетическое и б) оцененное с использованием специализированных программ представления о структуре и состоянии активной зоны реакторов на ТМІ-2 (1986-1987) [3] [a) Hypothetical and b) estimated by using specialized software representations of the TMI-2 reactor core structure and state (1986-1987)]

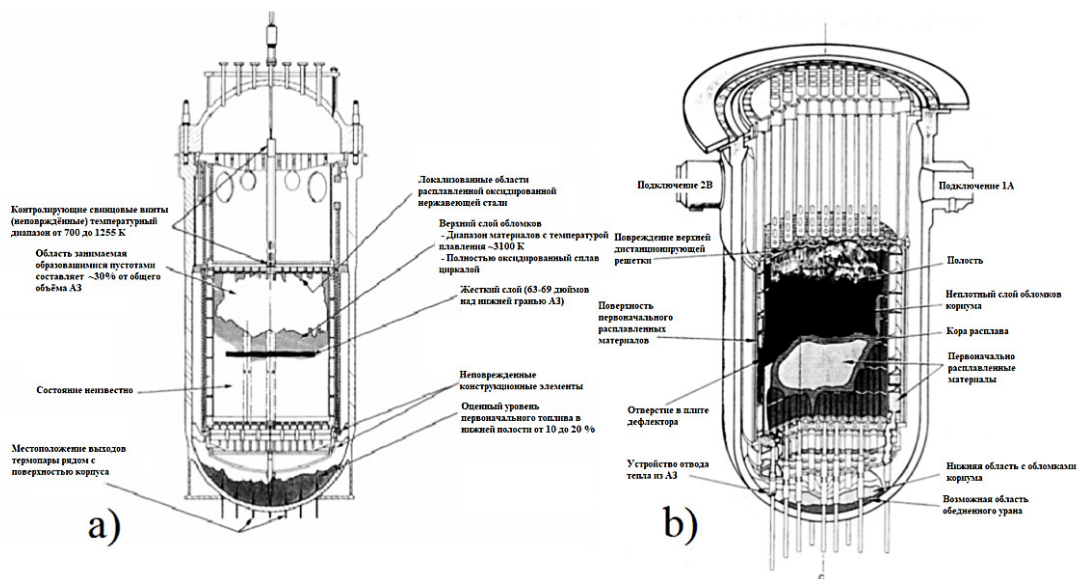


Рисунок 2 – Уточненная структура и состояние активной зоны и внутрикорпусного пространства поврежденного реактора на ТМІ-2 на момент а) начала процедуры извлечения топлива (1985-1986) и на момент б) её окончания (1987-1990) [3] [Refined core and internal space structure and state of the damaged TMI-2 reactor at the a) start of the fuel extraction procedure (1985-1986) and at the time b) its completion (1987-1990)]

На основе анализа изменения представлений о структуре поврежденной зоны, показанных на рисунках 1-2, можно сделать вывод, что применение специализированного инструментария и метода пробоотбора с дальнейшим анализом проб позволяет повысить детализацию структуры поврежденной активной зоны. А это, в свою очередь, позволяет корректно сформировать план извлечения кориума из активной зоны. С точки зрения решаемой задачи интерес представляет конечное распределение материалов активной зоны в результате аварии и распределение обломков кориума в объеме активной зоны поврежденного реактора. Ценными для данной работы являются данные по исследованию образцов кориума. При формировании системы вариантов модели кориума в дальнейшем использовались данные по исследованию взаимодействия материалов АЗ реактора при сверхвысоких температурах [4], данные по гравиметрическим исследованиям образцов кориума в зависимости от места пробоотбора в активной зоне [4], а также сборные данные нескольких исследований образцов кориума с точки зрения металлургии и материаловедения из разрушенной активной зоны ТМІ-2 [7].

Примером результатов исследования кориума, образовавшегося в результате аварии на ТМІ-2, которые могут быть использованы для подготовки комплекса данных, является набор измерений и классификация отдельных элементов кориума, собранных в нижней части корпуса реактора поврежденного энергоблока ТМІ-2, приведенные в работе [7]. В набор данных входят сведения о количественном содержании урана в частицах кориума, распределение отдельных частиц кориума по размеру, плотности и обогащению. В таблицах 1-3, представлены результаты анализа для 4 отдельных наборов проб, взятых в нижней части корпуса реактора, обозначенных как SSC-1-2, SSC-1-3, SSC-1-5 и SSC-1-7. Неопределенность результатов исследования составляет 2-5% для показателей массы и размера и 10-15% для показателя количества урана в составе образца.

Таблица 1 – Размер и плотность частиц кориума в нижней части корпуса реактора поврежденного энергоблока ТМІ-2 [7] [Size and density of corium particles in the reactor vessel lower part of the damaged power unit TMI-2]

Размер частиц	Распределение размера частиц, % (плотность частиц, г/см <sup>3</sup> )			
	SSC-1-2	SSC-1-3	SSC-1-5	SSC-1-7
> 4 мм	6,5 (8,0)	36,6 (7,2)	37,2 (7,8)	26,6 (7,6)
2-4 мм	13,8 (7,8)	33,7 (7,3)	26,5 (8,2)	37,3 (7,8)
1-2 мм	11,6 (6,3)	18,9 (7,6)	16,7 (8,0)	23,6 (7,8)
710-1000 мкм*	5,9 (4,6)	4,6 (8,8)	4,8 (8,0)	4,6 (7,9)
300-710 мкм	16,1 (6,3)	4,9 (8,1)	8,5 (7,7)	5,2 (6,5)
150-300 мкм	14,5 (5,7)	0,91 (8,1)	3,2 (7,7)	1,4 (6,5)
90-150 мкм	11,2 (6,5)	0,17 (4,6)	1,3 (7,2)	0,52 (7,2)
38-90 мкм	13,4 (6,3)	0,07 (3,8)	1,1 (6,4)	0,48 (4,4)
< 38 мкм	7,0 (4,1)	- (-)	0,72 (4,0)	0,28 (3,8)
Средняя взвешенная плотность	6,3	7,4	7,9	7,7

\*Неопределенность результатов оценки плотности частиц размером менее 710 мкм составляет 50% в связи с малым количеством измеряемого материала.

Таблица 2 – Содержание урана в составе образцов кориума и уровень обогащения урана в образцах кориума в нижней части корпуса реактора поврежденного энергоблока ТМІ-2 [7] [Uranium content in the corium samples composition and the level of uranium enrichment in corium samples in the lower reactor vessel part of the damaged TMI-2 power unit]

Размер частиц	Содержание урана в составе частиц, % (Уровень обогащения урана в составе частиц, %)			
	SSC-1-2	SSC-1-3	SSC-1-5	SSC-1-7
> 4 мм	68 (2,4)	62 (2,6)	73 (2,7)	69 (2,4)
2-4 мм	48 (2,6)	45 (2,8)	- (-)	64 (2,6)
1-2 мм	49 (-)	62 (2,7)	43 (2,7)	65 (2,8)
710-1000 мкм	47 (2,6)	58 (2,6)	50 (2,6)	56 (2,5)
300-710 мкм	51 (2,9)	53 (2,4)	51 (2,8)	58 (2,6)
150-300 мкм	- (-)	58 (2,6)	56 (2,6)	60 (2,4)
90-150 мкм	60 (2,6)	53 (2,4)	54 (2,6)	52 (2,8)
38-90 мкм	41 (2,3)	54 (2,8)	52 (2,5)	64 (2,4)
< 38 мкм	46 (-)*	- (-)	- (-)	55 (2,5)

\*Оцененное обогащение для данных образцов превысило максимальное обогащение по активной зоне (2,98%)

Таблица 3 – Содержание элементов-эмиттеров гамма частиц в образцах кориума в нижней части корпуса реактора поврежденного энергоблока ТМІ-2 для набора образцов SSC-1-2 [7] [The gamma-ray emitter elements content in lower part corium samples of the damaged power unit TMI-2 reactor vessel for a set of samples SSC-1-2]

Размер частиц	Вес образца, грамм	Содержание элементов-эмиттеров гамма частиц в образцах кориума, мКи/грамм (измерения проводились 1 апреля 1987 года)					
		$^{27}\text{Co-60}$		$^{55}\text{Cs-134}$		$^{55}\text{Cs-137}$	
		Значение	Ошибка	Значение	Ошибка	Значение	Ошибка
4 мм	0,4382	4,079E+00	1,114E-01	1,574E+01	2,880E-01	7,117E+02	4,484E+00
2 мм	0,2741	3,406E+00	8,208E-02	7,905E+00	1,431E-01	3,435E+02	1,958E+00
1 мм	0,2985	4,923E+00	1,078E-01	1,633E+01	2,205E-01	9,484E+02	5,311E+00
710 мкм	0,3296	5,008E+00	3,806E-01	1,526E+01	2,045E-01	7,602E+02	8,438E+00
300 мкм	0,2573	4,639E+00	7,608E-01	2,610E+01	5,063E-01	1,383E+03	8,983E+00
90 мкм	0,2031	3,799E+01	5,471E-01	3,710E+01	5,639E-01	1,884E+03	3,014E+00
38 мкм	0,3002	1,622E+01	5,780E-01	2,129E+01	3,832E-01	1,035E+03	7,763E+00

Результаты, представленные в таблицах 1-3, позволяют сформировать понимание о размере, составе и соотношении материалов в образцах кориума в нижней части корпуса реактора ТМІ-2. Эти данные можно использовать в качестве реперной точки для описания кориума, при учёте ряда факторов, отличающих данные параметры для кориума на АЭС Фукусима Дайити и ТМІ-2. Для полноценного анализа параметров кориума ТМІ-2 и формирования более точного описания, необходимо учитывать различие параметров кориума в зависимости от его местоположения в поврежденной активной зоне. Аналогично исследованию кориума в нижней части корпуса реактора, в работах [5-6] проводились исследования образцов кориума, взятых в иных точках поврежденной активной зоны.

Различие анализируемых параметров в зависимости от местоположения элементов кориума в активной зоне после аварии связано не только с разным уровнем температур в противоположных точках активной зоны, но и с особенностями протекания процесса формирования кориума на этапах расплавления, кристаллизации и растрескивания, что является выводами исследования [8]. Кроме того, результатом рассматриваемого исследования является также подробный анализ внутренней

структуры кориума, сформировавшегося в нижней части корпуса реактора, с учётом особенностей формирования состава исследуемых обломков. Данный анализ был проведен на основе расчётных и экспериментальных исследований.

Для проведения возможных расчётных исследований тепломассобмена в кориуме на различных этапах его формирования могут быть использованы данные, являющиеся результатом исследования [9] по оценке таких параметров элементов кориума, как удельная теплоемкость, коэффициент теплового расширения, тепловая диффузия, температура плавления и другие параметры.

Совокупность данных из ранее рассмотренных работ может быть полезна для формирования представления о структуре элементов кориума и создания комплекса параметров элементов кориума для их дальнейшего моделирования. Результаты вышеописанных работ не только не противоречат результатам исследования кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити, но и косвенно подтверждают их, так как соответствуют условиям формирования кориума. Исходя из этого, можно сделать вывод о близких условиях формирования кориума в рассматриваемых авариях и подтвердить применимость методов анализа кориума, применявшихся для аварии на АЭС Три-Майл-Айленд в задачах анализа кориума на АЭС Фукусима Дайити [10-12]. В пользу этого также свидетельствуют данные, представленные в научной работе [12], результатом которой является заключение о возможности применения технологий гамма-спектрометрии, используемые на ТМІ-2 для анализа элементов кориума, сформировавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити. Основанием для такой возможности являются схожие ход протекания аварии с точки зрения взаимодействия материалов между собой и ее последствия в виде расплавления активной зоны. В алгоритме проведения оценки содержания ядерных материалов в элементах кориума с использованием метода пассивной неразрушающей гамма-спектрометрии, представленном в виде схемы на рисунке 3, присутствуют четыре основных этапа [12]:

- измерение гамма-спектра элементов кориума;
- оценка активности высокоэнергетических гамма-излучающих малолетучих ПД с коррекцией ослабления излучения;
- оценка уровня выгорания с использованием гамма-спектрометрии и соотношения ПД к ядерному материалу, определяемого через расчёт состава топлива;
- определение количества ЯМ в элементах кориума с помощью данных, полученных на 2 и 3 этапах.



Рисунок 3 – Блок-схема последовательных операций технологии пассивной гамма-спектрометрии для количественного определения ядерных материалов в образце кориума [12] [Block diagram of passive gamma spectrometry technology sequential operations for the nuclear materials quantitative determination in a corium sample]

Схема, описанная выше, стала основой развития гамма-спектрометрических методов определения характеристик кориума. Данные методы совершенствовались с точки зрения, как применяемого оборудования, так и введением дополнительных процессов в зависимости от анализируемых объектов. На основе дальнейшего литературного обзора становится очевидно, что большая часть разработанных методов анализа кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити, являются развитием метода гамма-спектрометрии, алгоритм которой представлен на рисунке 3. Таким образом, часть данных, собранных в результате анализа аварии на ТМІ-2, может быть использована для формирования системы вариантов набора характеристик кориума на АЭС Фукусима Дайити с целью его дальнейшего изучения.

#### **Подготовка параметров системы различных вариантов модели кориума**

Целью данной работы является разработка системы различных вариантов набора характеристик кориума на основе литературного обзора и анализа источников, частично содержащих в себе показания прямых измерений и наблюдений и, частично, результаты расчётов, проведенных передовыми научными организациями.

Принимая во внимание наличие расхождений в полученных данных, необходимо рассмотрение граничных вариантов оцененных характеристик кориума, которые будут наиболее сильно отличаться в ряде параметров. В противном случае использование результатов одного конкретного научного исследования снижает научную ценность данной работы и повышает вероятность формирования описания, значительно отличающегося от реального. Наиболее подходящим методом формирования крайних случаев является введение и использование коэффициентов учёта различий параметров. Рассматриваются следующие параметры:

- соотношение нуклидов в кориуме по типу групп первоначальных материалов активной зоны реактора. В число таких типов групп входят: топливные нуклиды и продукты деления, оксиды циркония, цирконий в металлической форме, нержавеющая сталь, оксиды нержавеющей стали, поглощающие материалы;
- состав кориума в зависимости от пространственного положения в момент аварии и его конечного местоположения;
- данные о структуре и морфологии образования кориума;
- данные о переходе отдельных нуклидов в состав кориума или в окружающую среду.

Таким образом, разработка системы различных вариантов набора характеристик кориума будет осуществлена в соответствии с блок-схемой, представленной на рисунке 4.

Следующим этапом обзора является анализ результатов исследований по рассматриваемым параметрам, необходимым для формирования комплекса данных кориума.

#### **Составление набора характеристик и параметров кориума на основе результатов проведенных исследований**

Важной частью данного обзора является сбор характеристик и параметров элементов кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити. На основе анализа результатов исследований образцов кориума, находящихся в открытом доступе, проводится компиляция набора характеристик и параметров, который может быть использован для дальнейшего моделирования кориума с высоким уровнем достоверности и детализации. Сбор данных характеристик и параметров является одним из этапов алгоритма формирования системы различных вариантов параметров кориума, описанной и представленной на рисунке 4.



Часть необходимых данных была получена в результате анализа работ [10-11], где проводилось изучение процесса формирования кориума и его свойств. На основе записей мониторинга эксплуатации АЭС Фукусима Дайити [11] были собраны параметры топлива, удельная мощность реакторов, уровень выгорания, начальное количество делящихся материалов в топливе (для малообогащенного оксидного и МОХ топлива).

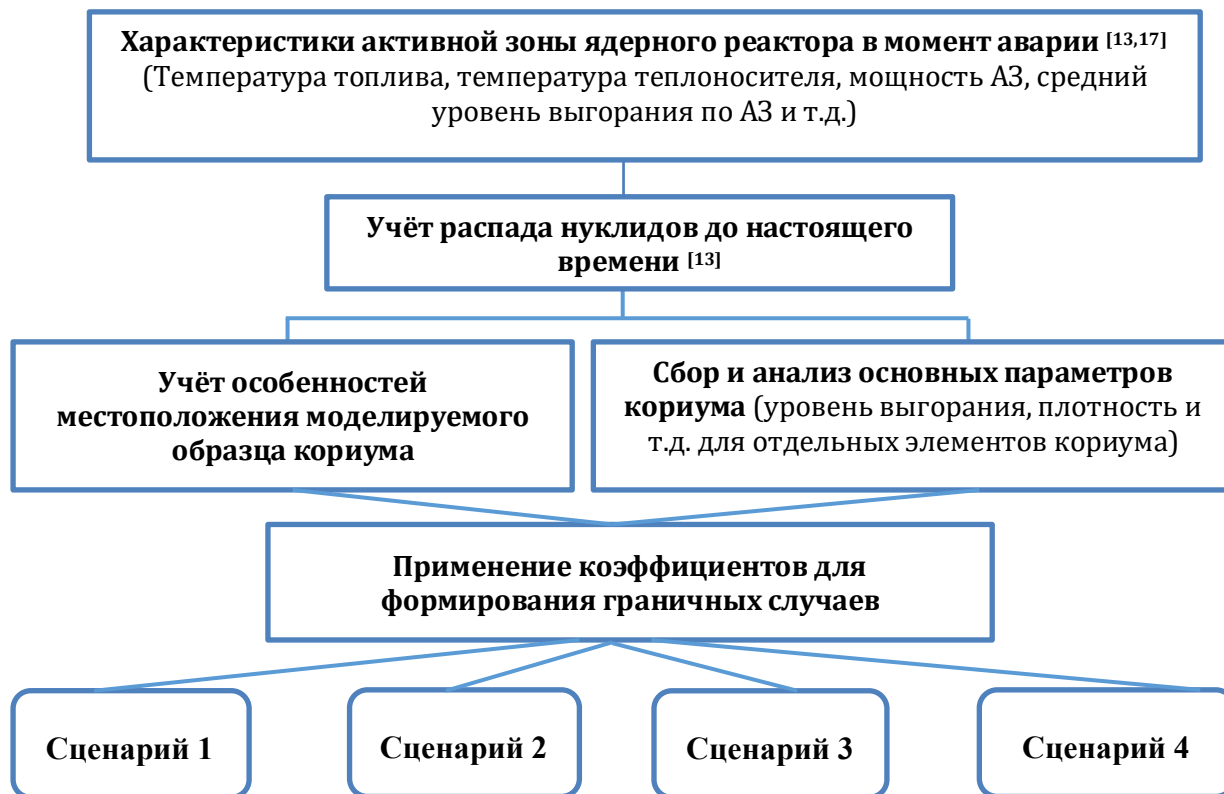


Рисунок 4 – Блок-схема формирования системы различных вариантов модели кориума  
[Block diagram of the system of various variants of the corium model formation]

Параметры, относящиеся к эксплуатационным характеристикам АЭС Фукусима Дайити, были также получены из работ [14-15]. Кроме того, в работе [14] были представлены результаты расчёта нуклидного состава после облучения в процессе эксплуатации АЭС Фукусима Дайити с помощью кодов ORIGEN2 и SWAT. Количественные оценки массы нуклидов значительно отличаются в зависимости от типа топлива, которое различно для активных зон отдельных энергоблоков, и представленные значения могут быть использованы только в качестве грубой оценки. Тем не менее, описанные в работе параметры и характеристики кориума могут быть использованы для оценки содержания урана и плутония в его составе.

Одним из основных источников данных для формирования системы вариантов набора характеристик кориума являются результаты расчёта международного бенчмарка BSAF (Benchmark Study of the Accident at the «Fukushima Daiichi» NPP) [16], в основе которого лежат исследования аварии на АЭС Фукусима Дайити для 1, 2 и 3 энергоблоков, включая результаты расчетов по таким кодам, как MELCORE, TOLBIAC, ASTEC, THALES, MAAP, SAMPSON, HYSPLIT, SOCRAT. В работе [18] представлены совокупные результаты исследований, проведённых в рамках расчёта бенчмарка BSAF, в том числе нуклидный состав в различных областях поврежденной активной зоны реактора. На рисунке 5 представлены результаты моделирования элементов кориума, сформировавшихся и переместившихся в процессе аварии в полость контейнмента реактора.



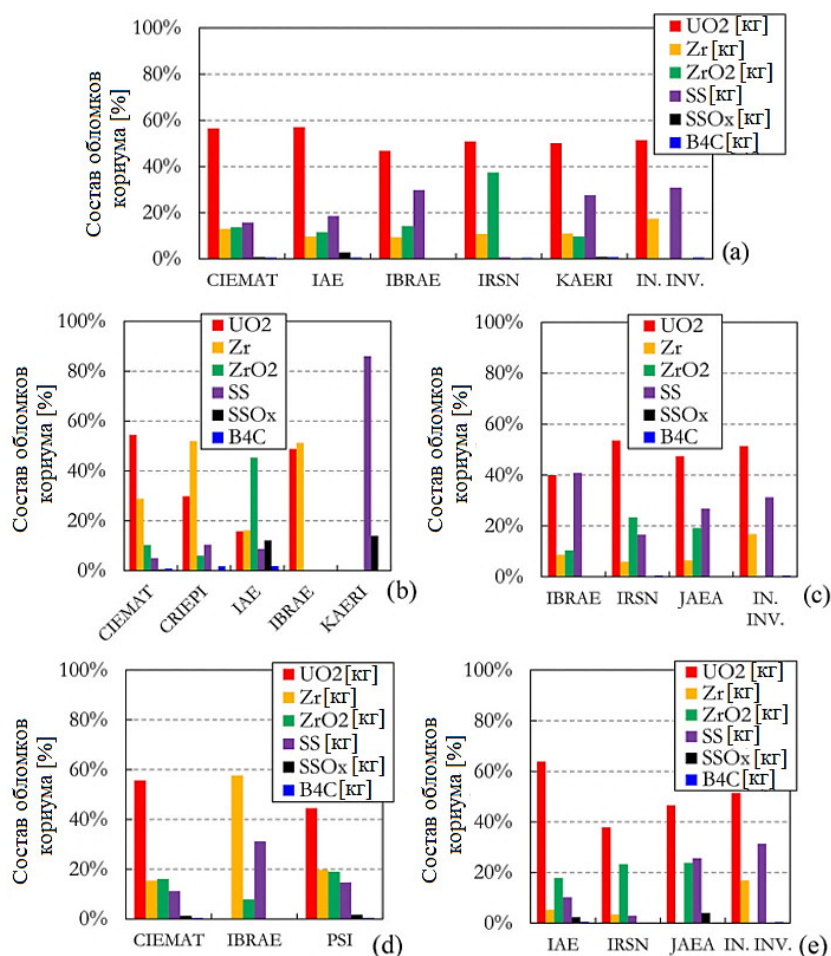


Рисунок 5 – Рассчитанный состав элементов кориума на АЭС Фукусима Дайити, располагающихся: (а) за пределами корпуса реактора энергоблока 1; (б) в нижней части корпуса реактора энергоблока 2; (с) за пределами корпуса реактора энергоблока 2; (д) в нижней части корпуса реактора энергоблока 3; (е) за пределами корпуса реактора энергоблока 3 <sup>[18]</sup> [Calculated composition of corium elements at the Fukushima Daiichi NPP located: (a) outside of the Unit 1 reactor vessel; (b) at the Unit 2 reactor vessel bottom; (c) outside the Unit 2 reactor vessel; (d) at the Unit 3 reactor vessel bottom; (e) outside the Unit 3 reactor vessel]

Из анализа представленных результатов можно сделать следующие выводы:

- около 50% элементов кориума состоят из  $\text{UO}_2$  (включая ПД);
- результаты 2/3 всех расчётов показывают, что около 10% элементов кориума представляет собой различные оксиды циркония, и ещё около 10% состоят из циркония в металлической форме, который был сформирован вследствие быстропротекающих и быстроизменяющихся переходных процессов;
- во всех проведенных расчётах относительное количество оксидов железа в кориуме невелико или почти ничтожно, в то время как процент содержания нержавеющей стали (SS) колеблется от 10% до 30%;
- согласно результатам исследования, в кориуме должно наблюдаться присутствие  $\text{B}_4\text{C}$ , но его количество представляет собой чрезвычайно низкое значение в процентном отношении.

Стоит отметить, что представленные результаты, полученные различными организациями, противоречат друг другу. В связи с этим, при разработке комплекса данных по кориуму необходимо учесть разноречивые данные путем формирования системы различных вариантов набора характеристик кориума, включающую в себя граничные случаи, наиболее отличающиеся друг от друга в ряде параметров.

Наличие системы различных вариантов набора характеристик кориума является важной составляющей процесса ликвидации последствий аварии. Однако остается открытым вопрос об исследовании реальных образцов кориума. Существуют различные методы оценки свойств, структуры и состава проб, содержащих ядерные материалы, однако одним из наиболее используемых методов является метод гамма-спектрометрии. Вопрос определения изотопного состава и других характеристик различных объектов и смесей, содержащих ядерные материалы, является важной задачей во многих направлениях, связанных как с обеспечением ядерной безопасности, так и с производственными, транспортными и перерабатывающими операциями ядерного топливного цикла. Большинство ядерных материалов, представляющих интерес с точки зрения определения структуры и состава ядерных материалов в образце, испускают гамма-излучение. Спектр гамма-излучения позволяет определить изотопный состав, а в совокупности с измерением интенсивности излучения и количественные характеристики ядерных материалов в образце. Методы контроля состава делятся на разрушающие и неразрушающие. Последние разделяются на пассивные, которые основаны на измерении излучений, сопровождающих спонтанные ядерные процессы в веществе, и активные, использующие внешние источники для возбуждения излучения исследуемого образца. Методы неразрушающего анализа наиболее часто применяются в случаях, когда невозможно произвести представительную выборку и когда разрушающие исследования невыполнимы. В свою очередь, разрушающие анализы непригодны в случаях, когда материал недоступен для отбора, информация нужна немедленно или стоимость анализа слишком велика. Проведение в дальнейшем подобных измерений с образцами кориума позволит собрать данные, обеспечивающие возможность проведения верификации модели кориума, построенной на основе комплекса данных, сбор данных для создания которого проводится в данном обзоре.

### **Исследование геометрии и морфологии образования отдельных элементов кориума**

Исходя из ранее представленных и описанных результатов исследований, можно утверждать, что при использовании проанализированных методов пассивной неразрушающей комбинированной гамма-нейтронно-спектрометрии можно не только оценить состав содержащихся ядерных материалов в объекте, но и учесть нерегулярность и асимметрию анализируемых образцов кориума. Кроме того, из анализа последствий аварии на ТМІ-2, проведенного ранее, было получено распределение образцов кориума по размеру [7]. Таким образом, для формирования конечного комплекса геометрических и структурных параметров кориума необходимо провести анализ работ по исследованию структуры кориума, образовавшегося в результате аварии АЭС Фукусима Дайити. Это необходимо для оценки коэффициентов учёта геометрии и месторасположения образца для формирования граничных случаев.

Часть данных можно извлечь из ранее рассмотренных исследований [5-6], проводимых в отношении структуры и состава кориума, образовавшегося в результате аварии на ТМІ-2. В дополнение к этим исследованиям были проанализированы работы [19-21], посвященные вопросу взаимодействия кориума с бетоном, его морфологии и процесса фазообразования в процессе расплава. Часть данных была также дополнительно подтверждена результатами исследований ядерных материалов на территории Чернобыльской АЭС и исследованиями вопроса теплопроводности сплавов, образовавшихся в процессе аварии на АЭС Фукусима Дайити [22].

В работе [23] проводилось исследование распределения нуклидов в формируемом в процессе плавления материалов активной зоны кориуме. В данной работе проводился полноценный эксперимент по моделированию расплава смеси ядерных и конструкционных материалов, составляющих основную массу материалов активной

зоны реактора. Расплавление проводилось при температуре, близкой к наблюдавшейся в активной зоне реактора на АЭС Фукусима Дайити в процессе аварии, что позволяет провести экстраполяцию результатов исследований на реальный кориум, образовавшийся в процессе аварии.

На рисунках 6-7 представлены разрез образца кориума, образовавшегося в результате эксперимента и состав образцов, взятых из отдельных частей образовавшегося образца.

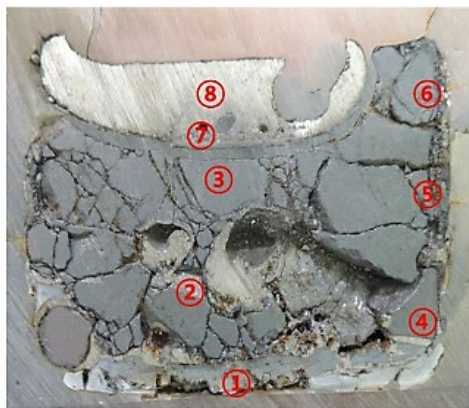


Рисунок 6 – Разрез образца кориума, полученного в процессе эксперимента, с указанием зон забора образцов <sup>[23]</sup>  
[Cross-section of the corium sample obtained during the experiment, indicating the areas of sampling]

№ образца	Zr	U	O	Ni	Fe	Cr	B
1	63.5	11.8	23.0	0.05	1.1	0.46	0.07
2	29.8	51.3	17.2	0.11	1.2	0.31	0.06
3	30.1	51.0	17.4	0.08	1.1	0.24	0.05
4	2.2	82.7	12.1	0.03	2.9	0.04	0.03
5	22.6	60.1	15.8	0.08	1.1	0.20	0.07
6	28.9	53.1	17.2	0.08	0.47	0.21	0.03
7	20.9	17.9	2.6	4.9	40.8	10.2	2.7
8	19.6	12.8	2.3	5.1	46.1	11.0	3.1

Рисунок 7 – Фактическое процентное элементное соотношение материалов из образцов, взятых в соответствии с рисунком 6 <sup>[23]</sup> [Actual percentage of elemental ratio of materials from samples taken in accordance with Figure 6]

Исходя из результатов исследований [21], можно определить не только максимальные температуры в активной зоне реактора в процессе аварии (представлены на рисунке 8), но и оценить морфологию расплава при образовании кориума. Исследователи делают вывод, что примерно 25% всего топлива находилось в жидкой фазе. Такие материалы, как В4С (органы СУЗ), SS (оболочки СУЗ, нержавеющая сталь) UO<sub>2</sub> (ТВЭЛ) и Zircaloy (оболочка ТВЭЛ) подверглись плавлению, так как температуры плавления данных материалов составляют 1477 К (В4С, SS) и 2170 К (UO<sub>2</sub>, Zircaloy).

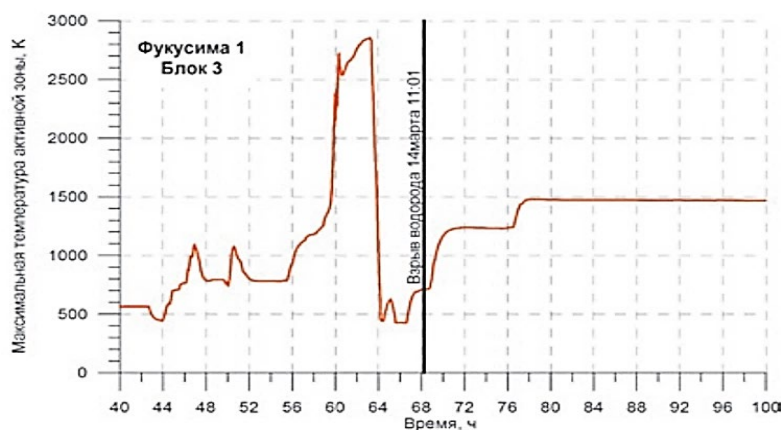


Рисунок 8 – Максимальная температура энергоблока 3 АЭС Фукусима Дайити в процессе аварии <sup>[21]</sup>  
[Maximum temperature of Fukushima Daiichi Unit 3 during the accident]

Результатом проведенного анализа являются данные о температуре плавления отдельных материалов активной зоны, а также данные по их релокации в процессе формирования кориума. Исходя из этих сведений, можно судить о возможной структуре и составе элементов кориума в различных случаях с учётом их конечного местоположения по объёму активной зоны.

### Оценка нуклидного состава образцов кориума на основе проведённых исследований и данных мониторинга эксплуатации АЭС Фукусима Дайити

На первом этапе оценки определялся нуклидный состав активной зоны в момент аварии, глубина выгорания, температура взаимодействия в процессе формирования кориума и т.д.

Рассматривать нуклидный состав было решено на примере третьего энергоблока в связи с наибольшим доступным объемом данных в обнаруженных источниках. В таблицах 4-5 представлены эксплуатационные характеристики для третьего энергоблока АЭС Фукусима Дайити и начальный состав активной зоны третьего энергоблока.

В работе [15] состав загрузки активной зоны третьего энергоблока (представлен в таблице 5) был использован в расчёте выгорания для учёта облучения топлива в процессе эксплуатации АЭС Фукусима Дайити до момента аварии. Также в данной работе приведены нуклидные составы с учётом распада с момента аварии до 11 марта 2021 года (10 лет). Таким образом, эти данные наиболее точно отражают нуклидный состав активной зоны третьего энергоблока АЭС Фукусима Дайити. Представленные данные обладают необходимой полнотой для создания модели.

На основе собранных данных были определены коэффициенты учёта перехода материалов в кориум. Данные коэффициенты, описывающие доли групп нуклидов в материале, представлены в таблице 6. Представленные коэффициенты усреднены по активной зоне и сгруппированы для отдельных, наиболее отличающихся результатов исследований различных организаций. Таким образом, рассматриваются две области нахождения кориума, а именно за пределами корпуса реактора и внутри корпуса реактора.

Таблица 4 – Эксплуатационные параметры энергоблоков АЭС Фукусима Дайити <sup>[16]</sup> [Operating parameters of power units of the Fukushima Daiichi NPP]

Параметр	Единица измерения	Энергоблок 3
Тип реактора	-	BWR-4
Тепловая мощность реактора	МВт	2381
Обогащение по U <sup>235</sup>	Весовой %	3,7
Число ТВС	Шт.	548
Масса делящегося материала в АЗ	т НМ*	94
Удельная мощность	МВт/т	25,3
Средний уровень выгорания	ГВт*день/т	21,8

\*т НМ – тонна тяжелых металлов

Таблица 5 – Состав топлива и оболочек энергоблока 3 (г/т НМ) <sup>[14]</sup> [Composition of fuel and claddings of power unit 3 (g/tNM)]

Нуклид	Урановое топливо	MOX Топливо
U-234	-	154
U-235	37 000	17 962
U-236	-	116
U-238	963 000	953 142
Pu-238	-	438
Pu-239	-	16 802
Pu-240	-	7 621
Pu-241	-	2 382
Pu-242	-	1 148
Am-241	-	235
O	134 538	
Cr	204	
Fe	530	
Ni	102	
Zr	200 118	
Sn	2977	

Таблица 6 – Коэффициенты учёта расположения элементов кориума для формирования крайних случаев на основе исследования энергоблока 3 АЭС Фукусима Дайити [Coefficients for taking into account the location of corium elements for the formation of extreme cases based on the study of power unit 3 of the Fukushima Daiichi NPP]

Группа нуклидов	в нижней части корпуса реактора		за пределами корпуса реактора	
	Сценарий 1 (на основе результатов исследований СИЕМАТ/PSI)	Сценарий 2 (на основе результатов исследований IBRAE)	Сценарий 3 (на основе результатов исследований IRSN)	Сценарий 4 (на основе результатов исследований IN. INV.)
Топливо ( $\text{UO}_2/\text{U}_3\text{O}_8$ ) и ПД	0,50	0,59	0,57	0,51
Оксиды циркония	0,18	0,09	0,343	0
Цирконий в металлической форме	0,18	0	0,051	0,165
SS (нержавеющая сталь)	0,12	0,32	0,036	0,31
Оксиды SS	0,01	0	0,0	0
$\text{B}_4\text{C}$	0,01	0	0,0	0,015

Ранее описанный алгоритм определения количеств ядерных материалов в образце на основе неразрушающих методов гамма-спектрометрии использует математическую модель, в которой проводится оценка соотношений изотопов цезия. Таким образом, необходимо провести оценку коэффициентов перехода изотопов цезия из активной зоны в состав кориума. В процессе проведения литературного обзора работ на данную тематику были обнаружены необходимые данные в работах по исследованию процесса аварии на АЭС Фукусима Дайити с использованием специализированных программ [21]. Одним из результатов исследований этих работ являются данные о выходе ряда нуклидов из твэлов в окружающую среду [23]. По данным исследователей в результате аварии 72% йода и цезия, содержащихся в твэлах, были высвобождены и попали в окружающую среду, в том числе в составе кориума.

Кроме данных о выходе нуклидов из АЗ, в работе [22] проводилось исследование возможного состава кориума. Так как эти данные были получены в результате стороннего исследования, проводимого вне проекта BSAF, результаты исследований из данной работы можно использовать для формирования ещё одного крайнего случая набора параметров моделирования кориума. Результаты исследований из вышеописанной работы, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Количественная оценка групп нуклидов в составе кориума, проведенная в работе [22] [Quantitative assessment of groups of nuclides in the composition of the corium, carried out in]

Группа нуклидов	Количество, кг.	
	Цельный пласт кориума	Отдельные частицы кориума
$\text{UO}_2$	2 050,0	34 500,0
$\text{U}_3\text{O}_8$	2 050,0	7 200,0
Zr	636,0	7 200,0
$\text{ZrO}_2$	1 190,0	16 700,0
Fe	5 630,0	2 380,0
FeO	3 950,0	712,0
$\text{B}_4\text{C}$	0,4	679,0
Количество по зонам	15 506,4	69 191,0
Общее количество	84 697,4	

Коэффициенты, представленные в таблице 6, оценочные количества нуклидов в таблице 7 и состав активной зоны реакторов АЭС Фукусима Дайити на момент аварии описанный ранее, позволяют оценить количественный состав элементов кориума, что необходимо для создания наиболее точного описания комплекса характеристик кориума.

### **Заключение**

В результате проведенной работы был проведен литературный обзор на тему формирования кориума в процессе аварии на АЭС Фукусима Дайити, а также изучены его характеристики через анализ результатов научных работ, находящихся в открытом доступе. В процессе работы было проведено сравнение условий формирования кориума в авариях на АЭС Фукусима Дайити и АЭС Три-Майл-Айленд, в результате которого было вынесено заключение о возможности использования части данных по аварии на АЭС Три-Майл-Айленд для формирования комплекса характеристик кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити. На основе собранных параметров и характеристик был сформирован комплекс данных, который в дальнейшем может быть использован для расширенного моделирования элементов кориума. Сформированный комплекс данных включает в себя как геометрические параметры, так и нуклидный состав элементов кориума в зависимости от их месторасположения.

На основе данных мониторинга эксплуатации АЭС Фукусима Дайити, результатов расчётов в нескольких научных работах и теоретических моделей перераспределения состава активной зоны в процессе образования кориума был сформирован нуклидный состав кориума в виде нескольких крайних случаев, отличающихся в доле соотношении групп нуклидов в составе. Необходимость формирования нескольких крайних случаев была вызвана значительными отличиями в заключениях различных научных коллективов и организаций о составе кориума и служит для повышения научной объективности результатов дальнейших работ по расчёту моделей, сформированных на основе параметров и характеристик из вышеописанного комплекса данных.

Для формирования крайних случаев был объяснен метод выбора коэффициентов учета, который включает в себя процесс формирования коэффициентов учёта перехода нуклидов из активной зоны в кориум, а также месторасположение формируемого кориума и морфологию процесса его формирования.

Комплекс данных содержит в себе информацию о распределении элементов кориума, по размеру, плотности и количественному содержанию урана в составе на основе исследования кориума образовавшегося в результате аварии на ТМІ-2.

Собранные данные полезны не только для создания модели кориума, но и подготовки к проведению гамма- и нейтронно-спектрометрических измерений проб кориума, что позволит провести верификацию модели.

Таким образом, данные по расчёту моделей элементов кориума, которые в дальнейшем будут проведены на основе сформированного комплекса, могут быть верифицированы с помощью экспериментального анализа элементов кориума с использованием неразрушающей гамма-спектрометрии.

### **Источник финансирования**

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Соглашение о предоставлении гранта в форме субсидии от 28 октября 2021 г. № 075-15-2021-1393 (дополнительные соглашения № 075-15-2021-1393/1 от 29 марта 2022 г., № 075-15-2021-1393/2 от 22 апреля 2022 г.).

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Нейтронно-физическое моделирование подкритической системы с частицами кориума и водой из международного бенчмарка / А.Д. Смирнов, Е.В. Богданова, П.А. Пугачев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2020. – № 2. – С. 135-145. – DOI 10.26583/npe.2020.2.12.
2. Rogovin, M. Three Mile Island. A report to the commissioners and to the public. Nuclear regulatory commission special inquiry group / Mitchell Rogovin. – University of Michigan Library. – 1980. – 488 p.

3. Akers, D.W. TMI-2 Examination Results from the OECD/CSNI program. / D.W. Akers, G. Bart, P. Botoomley, A. Brown, D.S. Cox, P. Hoffman, S.M. Jensen, H. Kleykamp, A.J. Manley, L.A. Neimark, M. Trotabas. – Idaho National Engineering Laboratory, Inc. – 1992. – 494 p.
4. Reactor core materials interaction at very high temperatures / P. Hofmann, S.J. Hagen, G. Schanz, A. Skokan // Nuclear Technology. – 1989. – Volume 87, № 1. – P. 146-186.
5. Trotabas, M. TMI-2 core materials examination at Commissariat A L'Energie Atomique / M. Trotabas, J. Duco // Nuclear Technology. – 1989. – Volume 87, № 1. – P. 104-119.
6. Bottomley, D.W. Final report of the metallurgical examination of samples extracted from the damaged TMI-2 reactor core / D.W. Bottomley, M. Coquerelle. – Joint Research Centre. – 1990. – 16 p.
7. Akers, D.W. Lower vessel Debris Examination result. – 1989. – 18 p.
8. In-Vessel Retention of Molten Corium: Lessons Learned and Outstanding Issues / J.L. Rempe, K.Y. Suh, F.B. Cheung, S.B. Kim // Nuclear Technology. – 2017 – Том 161, № 3. – P. 210-267.
9. Nagase, F. Thermal properties of Three Mile Island Unit 2 core debris and simulated debris / F. Nagase, H. Uetsuka // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2012. – Volume 49, № 1. – P. 96 – 102.
10. Gauntt, R-O. MELCOR Computer Code Manuals. Primer and User's Guide Version 1.8.5 Vol. 1/ R-O. Gauntt, R.K. Cole, C.M. Erickson, R.G. Gido, R.D. Gasser, S.B. Rodriguez, M.F. Young. – Sandia National Laboratories. – 2000. – 1170 p.
11. MAAP4 Applications Guidance. Desktop Reference for Using MAAP4 Software, Revision 2. – EPRI, Palo Alto. – 2010. – 564 p.
12. Feasibility study of passive gamma spectrometry of molten core material from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station unit 1, 2, and 3 cores for special nuclear material accountancy – low-volatile FP and special nuclear material inventory analysis and fundamental characteristics of gamma-rays from fuel debris / H. Sagara, H. Tomikawa, M. Watahiki, Y. Kuno // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2014. – Volume 51, № 1. – P. 1–23.
13. Nakahara, Y. Technical development on burn-up credit for spent LWR fuels JAERITECH 2000-071 / Y. Nakahara, K. Suyama, T. Suzaki. – Ibaraki: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. – 394 p.
14. Nishihara, K. Estimation of fuel compositions in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant JAEA-Data/Code 2012-018 / K. Nishihara, H. Iwamoto, K. Suyama. – Ibaraki: Japan Atomic Energy Agency, 2012. – 190 p.
15. TEPCO Report. Establishing permit application of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station; unit 2. – Tokyo: TEPCO, 2003. – 509 p.
16. NEA OECD, Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Summary Report. NEA/CSNI/R(2015)18. – NEA OECD, 2015. – 53 p.
17. Development of Molten Core Relocation Analysis Module MCRA in the Severe Accident Analysis Code SAMPSON / H. Ujita, N. Satoh, M. Naitoh, M. Hidaka, N. Shirakawa, M. Yamagishi // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2000. – Volume 37, № 3. – 225-236 p.
18. Benchmark study of the accident at the Fukushima Daiichi NPS: Best-estimate case comparison / M. Pellegrini, K. Dolganov, L. E. Herranz [et al.] // Nuclear Technology. – 2016. – Vol. 196. – No 2. – P. 198 – 210. – DOI 10.13182/NT16-63.
19. Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station facilities overview / Tokyo Electric Power Company // URL: [https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/outline\\_f1/index-e.html](https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/outline_f1/index-e.html) (accessed: 13.08.2022).
20. NEA OECD Burn-up Credit Criticality Safety Benchmark Phase III-C / NEA OECD. – Nuclear Science Committee, 2016. – 255 p.
21. Результаты экспресс-расчетов тяжелой аварии на АЭС «Фукусима-1» при помощи кода СОКРАТ / К. С. Долганов, А. В. Капустин, А. Е. Киселев [и др.] // Авария на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки : Труды ИБРАЭ РАН; Продолжающееся издание «Труды ИБРАЭ РАН», 2007 (год основания). – Москва: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук «Издательство «Наука», 2013. – С. 67-79.
22. Analysis of accident progression of Fukushima Daiichi NPP by the SAMPSON code / M. Naitoh, M. Pellegrini, H. Suzuki, H. Mizouchi, H. Okada // Nuclear Technology. – 2014. – Volume 186, № 2. – 255 – 262 p.
23. Main result of study on the interaction between the corium and melt and steel in the VVER-1000 reactor vessel during a severe accident performed under MASCA project / V.G. Asmolov, V.N. Zagryazkin, F.D. Tsurikov, V.Yu. Vishnevsky, Ye.K. D'yakov, A. Yu. Kotov, V. M. Repnikov // Journal of Physics of Atomic Nuclei. – 2010. – Volume 73, № 14. – 2301 – 2318 p.



## REFERENCES

- [1] Nejtronno-fizicheskoe modelirovanie podkriticheskoy sistemy s chasticami koriuma i vodoj iz mezhdunarodnogo benchmarka [Neutronic Modeling of a Subcritical System with Corium Particles and Water from International Benchmark] / A.D. Smirnov, E.V. Bogdanova, P.A. Pugachev, I.S. Saldikov, M.Yu. Ternovikh, G.V. Tikhomirov., H. Takezawa, T. Muramoto, D. Nishiyama, T. Obara // *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika* [News of Higher Education Institutions. Nuclear Power Engineering]. 2020. № 2. P. 135-145 (in Russian)
- [2] Rogovin, M. Three Mile Island. A Report to the Commissioners and to the Public. Nuclear Regulatory Commission Special Inquiry Group / Mitchell Rogovin. – University of Michigan Library. – 1980. – 488 p. (in English)
- [3] Akers, D.W. TMI-2 Examination Results from the OECD/CSNI program. / D.W. Akers, G. Bart, P. Botoomley, A. Brown, D. S. Cox, P. Hoffman, S.M. Jensen, H. Kleykamp, A.J. Manley, L.A. Neimark, M. Trotabas. – Idaho National Engineering Laboratory, Inc. 1992. – 494 p. (in English)
- [4] Reactor Core Materials Interaction at Very High Temperatures / P. Hofmann, S.J. Hagen, G. Schanz, A. Skokan // *Nuclear Technology*. – 1989. – Volume 87, № 1. – P. 146-186 (in English)
- [5] Trotabas, M. TMI-2 Core Materials Examination at Commissariat A L'Energie Atomique / M. Trotabas, J. Duco // *Nuclear Technology*. – 1989. – Volume 87, № 1. – P. 104-119 (in English)
- [6] Bottomley, D.W. Final Report of the Metallurgical Examination of Samples Extracted from the Damaged TMI-2 Reactor Core / D.W. Bottomley, M. Coquerelle. – Joint Research Centre. – 1990. – 16 p. (in English)
- [7] Akers, D.W. Lower Vessel Debris Examination Result. – 1989. – 18 p. (in English)
- [8] In-Vessel Retention of Molten Corium: Lessons Learned and Outstanding Issues / J.L. Rempe, K.Y. Suh, F.B. Cheung, S.B. Kim // *Nuclear Technology*. 2017 Volume 161, № 3. P. 210-267. (in English)
- [9] Nagase, F. Thermal properties of Three Mile Island Unit 2 core debris and simulated debris / F. Nagase, H. Uetsuka // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2012. Volume 49, № 1. P. 96 – 102. (in English)
- [10] Gauntt, R-O. MELCOR Computer Code Manuals. Primer and User's Guide Version 1.8.5 Vol. 1/ R-O. Gauntt, R.K. Cole, C.M. Erickson, R.G. Gido, R.D. Gasser, S.B. Rodriguez, M.F. Young. – Sandia National Laboratories. 2000. 1170 p. (in English)
- [11] MAAP4 Applications Guidance. Desktop Reference for Using MAAP4 Software, Revision 2. – EPRI, Palo Alto. 2010. – 564 p. (in English)
- [12] Feasibility Study of Passive Gamma Spectrometry of Molten Core Material from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 1, 2, and 3 Cores for Special Nuclear Material Accountancy – Low-Volatile FP and Special Nuclear Material Inventory Analysis and Fundamental Characteristics Of Gamma-Rays from Fuel Debris / H. Sagara, H. Tomikawa, M. Watahiki, Y. Kuno // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2014. Volume 51, № 1. P. 1 – 23 (in English)
- [13] Nakahara, Y. Technical Development on Burn-Up Credit for Spent LWR Fuels JAERITECH 2000-071 / Y. Nakahara, K. Suyama, T. Suzaki. – Ibaraki: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. – 394 p. (in English)
- [14] Nishihara, K. Estimation of Fuel Compositions in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant JAEA-Data/Code 2012-018 / K. Nishihara, H. Iwamoto, K. Suyama. – Ibaraki: Japan Atomic Energy Agency, 2012. – 190 p. (in English)
- [15] TEPCO Report. Establishing Permit Application of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station; unit 2. – Tokyo: TEPCO, 2003. – 509 p. (in English)
- [16] NEA OECD, Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Summary Report. NEA/CSNI/R(2015)18. – NEA OECD, 2015. – 53 p. (in English)
- [17] Development of Molten Core Relocation Analysis Module MCRA in the Severe Accident Analysis Code SAMPSON / H. Ujita, N. Satoh, M. Naitoh, M. Hidaka, N. Shirakawa, M. Yamagishi // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2000. – Volume 37, № 3. – 225-236 p. (in English)
- [18] Pellegrini M. Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi NPS: Best-Estimate Case Comparison / M. Pellegrini, K. Dolganov, L. E. Herranz, H. Bonneville, D. Luxat, M., Sonnenkalb, J. Ishikawa, J.H. Song, R.O. Gauntt, L. Fernandez Moguel, F. Payot, Y. Nishi // *Nuclear Technology*. – 2016. – Volume 196, № 2. – P. 198–210 (in English)
- [19] Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station facilities overview / Tokyo Electric Power Company // URL: [https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/outline\\_f1/index-e.html](https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/outline_f1/index-e.html) (accessed: .08/13/2022) (in English)
- [20] NEA OECD Burn-up Credit Criticality Safety Benchmark Phase III-C / NEA OECD. – Nuclear Science Committee, 2016. – 255 p. (in English)
- [21] Rezul'taty ekspress-raschetov tyazhelej avarii na AES "Fukusima-1" pri pomoshchi koda SOKRAT

- [Results of Express Calculations of a Severe Accident at the Fukushima-1 NPP Using the SOCRATES Code] / K.S. Dolganov, A.V. Kapustin, A.E. Kiselev, N.A. Mosunova, V.D. Ozrin, D.Yu. Tomashchik, V.F. Strizhov, S.V. Tsaun, T.A. Yudina // *Avariya na AES "Fukushima-1": opyt reagirovaniya i uroki* : TRUDY IBRAE RAN; Prodolzhayushcheesya izdanie «Trudy IBRAE RAN» [Proceedings of IBRAE «Accident at the Fukushima-1 NPP: Response Experience and Lessons»]. Moskva: Akademicheskij nauchno-izdatel'skij, proizvodstvenno-poligraficheskij i knigorasprostranitel'skij centr Rossijskoj akademii nauk "Izdatel'stvo "Nauka" [Moscow: Academic Scientific-Publishing, Production-Polygraphic and Book-Distribution Centre of the Russian Academy of Sciences, Nauka Publishing House]. 2013. № 13. 67-79 p. (in Russian)
- [22] Analysis of Accident Progression of Fukushima Daiichi NPP by the SAMPSON code / M. Naitoh, M. Pellegrini, H. Suzuki, H. Mizouchi, H. Okada // *Nuclear Technology*. 2014. Volume 186, № 2. 255-262 p. (in English)
- [23] Main result of study on the interaction between the corium and melt and steel in the VVER-1000 reactor vessel during a severe accident performed under MASCA project / V.G. Asmolov, V.N. Zagryazkin, F.D. Tsurikov, V.Yu. Vishnevsky, Ye.K. D'yakov, A.Yu. Kotov, V.M. Repnikov // *Journal of Physics of Atomic Nuclei*. 2010. Volume 73, № 14. 2301 – 2318 p. (in English)

### Analysis of Methods and Technologies for Composition Assessing of Corium Formed as a Result of the Fukushima Daiichi NPP Accident

**Sergey N. Ryzhov<sup>1</sup>, Ekaterina V. Bogdanova<sup>2</sup>, Aleksandr A. Ryzhkov<sup>3</sup>,  
Pavel A. Pugachev<sup>4</sup>, Georgiy V. Tikhomirov<sup>5</sup>, Mikhail Yu. Ternovyykh<sup>6</sup>,  
Tatiana B. Aleeva<sup>7</sup>**

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>1</sup>SNRyzhov@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-1801-7615, WoS Researcher ID: GPG-4006-2022

<sup>2</sup>EVBogdanova@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-8184-2124, WoS Researcher ID: P-1554-2017

<sup>3</sup>AARyzhkov@mephi.ru

<sup>4</sup>PAPugachev@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-8175-3957, WoS Researcher ID: AAV-2301-2021

<sup>5</sup>GVTikhomirov@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-5332-7272, WoS Researcher ID: B-7860-2013

<sup>6</sup>MYTernovyykh@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-9830-5501

<sup>7</sup>TBAleeva@mephi.ru

**Abstract.** This paper analyzes the methods and technologies for assessing the method of formation, composition, characteristics and features of corium, which is a mixture of nuclear and structural materials of the nuclear reactor core, formed as a result of an accident accompanied by partial or complete core melting. The study is based on data from the study of corium formed as a result of the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant, which are in the public domain and are the result of the work of many scientific organizations around the world. Corium research is one of the main issues in the framework of improving nuclear safety in the future and is one of the objectives of the successful procedure for eliminating the consequences of the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant. Without a detailed analysis of the neutronic, materials science, gravimetric and other characteristics of the corium, as well as the creation of a complex model of the corium that combines these data, it is impossible to organize an efficient and safe process for removing nuclear materials from the damaged units of the Fukushima Daiichi nuclear power plant. The objective of this work is to combine the existing research results into a data set that allows modeling of the corium using neutronic calculation codes and includes such data as the size, density and morphology of corium samples and their approximate nuclide composition. Such modeling allows not only to perform tasks related to increasing the level of safety in the implementation of the procedure for eliminating the consequences of the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant, but also to serve as an international benchmark for modeling a mixture containing nuclear materials.

**Keywords:** Fukushima, corium, accident, neutron physics simulation, review, gamma ray spectrometry, Three Mile Island, decontamination, core meltdown, nuclide composition, nuclear fuel.

**For citation:** Ryzhov S.N., Bogdanova E.V., Ryzhkov A.A., Pugachev P.A., Tikhomirov G.V., Ternovyykh M.Yu., Aleeva T.B. Analysis of methods and technologies for assessing the composition of corium formed as a result of the accident at the Fukushima Daiichi NPP // *Global Nuclear Safety*. 2022. № 3(44). P. 5-21. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-01>