

МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОДА MELCOR АВАРИИ В БАССЕЙНЕ ВЫДЕРЖКИ ОЯТ ЭНЕРГОБЛОКА №1 ЮЖНО-УКРАИНСКОЙ АЭС ПРИ НАРУШЕНИИ ТЕПЛОТВОДА

А.С. Балашевский*, Д.В. Шевелев, Н.И. Власенко**, В.Я. Козлов****

**Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленно-сти, Украина, г. Севастополь*

***ОП «Научно-технический центр» ГП НАЭК «Энергоатом», Украина, г. Киев*



Разработана расчетная модель бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива энергоблока №1 Южно-Украинской АЭС для компьютерного кода MELCOR 1.8.5. Проанализировано исходное событие при потере теплоотвода от бассейна выдержки, определены последствия и временные рамки повреждения топлива, количество сгенерированного водорода и начало взаимодействия расплава с бетоном.

Ключевые слова: атомная электрическая станция, компьютерный код, тяжелая авария, бассейн выдержки, тепловыделяющая сборка.

Key words: nuclear power plant, computer code, severe accident, spent fuel pit, fuel assembly.

Рассмотрим описание расчетной модели бассейна выдержки энергоблока №1 ЮУАЭС для компьютерного кода MELCOR 1.8.5 [1], ориентированной на анализ тяжелых аварий (ТА) в бассейне выдержки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) при разработке руководства по управлению тяжелыми авариями (РУТА). Причиной повышенного внимания к моделированию тяжелой аварии в бассейне выдержки при нарушении теплоотвода от ОЯТ является исходное событие (ИС), имевшее место 11 марта 2011 г. на Японской АЭС «Фукусима». Как показали события на этой АЭС [2], угроза потери охлаждения бассейна выдержки становится очень острой при обесточивании энергоблока или станции, без своевременного восстановления резервного электропитания. Оценка времени, условий и последствий при тяжелой аварии в бассейне выдержки позволит определить уязвимость энергоблока к данному типу ИС и предпринять необходимые меры по предотвращению или смягчению развития этой аварии.

При разработке расчетной модели в качестве основы использовались расчетная модель энергоблока №1 ЮУАЭС (В-302) анализа запроектных аварий (АЗПА) для программы MELCOR [3] и данные из [4 – 6].

В процессе расчетного анализа тяжелой аварии в условиях полной потери теплоотвода от бассейна выдержки с помощью разработанной модели определялись временные параметры процессов, количество образовавшегося водорода, качественные и ко-

личественные параметры и их особенности.

Применимость данной модели может быть расширена путем проведения расчетно-анализа ТА в бассейне выдержки для всех АЭС Украины с ВВЭР с реализацией стратегий по подпитке бассейна выдержки и оценкой их радиационных последствий.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ БАСЕЙНА ВЫДЕРЖКИ

Бассейн выдержки (БВ) предназначен для временного хранения отработавшего ядерного топлива не менее трех лет при трехгодичной кампании и выдержки остаточных тепловыделений отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) до достижения остаточных энерговыделений, допускающих выгрузку из БВ и транспортировку. Бассейн выдержки расположен в герметичной оболочке реакторного отделения (РО) и состоит из кассетного отсека, предназначенного непосредственно для хранения ОТВС, и контейнерного отсека со стационарным стеллажом для свежего топлива и универсальным гнездом – зоны загрузки транспортного контейнера отработавшими топливными сборками и разгрузки чехла для свежих кассет (рис. 1, [4]). Стеллажи, установленные в БВ, представляют собой металлоконструкцию, состоящую из абсорбционной части, опорной плиты, выдвижных опор и прочих мелких деталей, служащих для установки стеллажа.

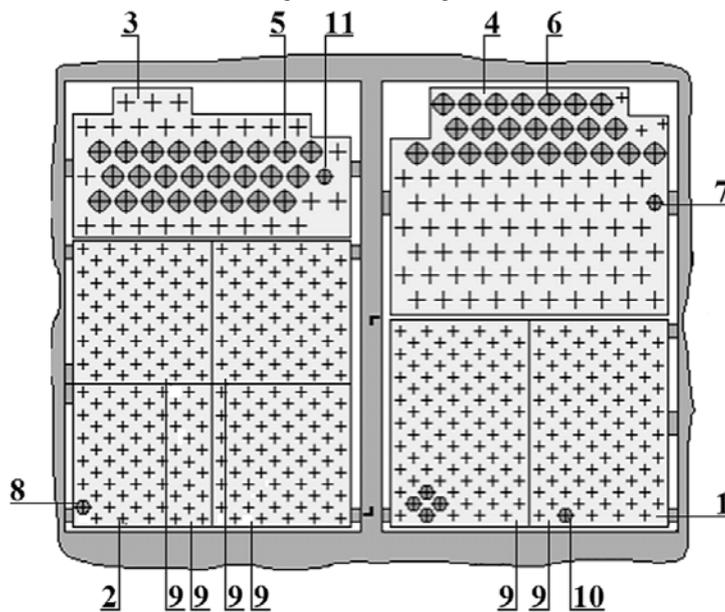


Рис. 1. Схема стеллажей бассейна выдержки (вид сверху): 1 – стеллажи уплотненного хранения топлива контейнерного отсека; 2 – стеллажи уплотненного хранения топлива кассетного отсека; 3 – стеллаж неуплотненный; 4 – съемный (аварийный) стеллаж неуплотненный; 5 – ячейки для пеналов 25 шт.; 6 – ячейки для пеналов 24 шт.; 7 – ячейки для кассет 61 шт.; 8 – ячейки для кассет 192 шт.; 9 – блоки чехлов; 10 – ячейки для кассет 136 шт.; 11 – ячейки для кассет 27 шт.

Абсорбционная часть представляет собой сварную металлоконструкцию, состоящую из трех плит (нижней, средней и верхней) с шестигранными отверстиями, в которые вварены 221 (стеллаж для установки ОТВС в контейнерном отсеке) и 244 (стеллаж для установки ОТВС в кассетном отсеке) шестигранных абсорбционных труб длиной 4350 мм, изготовленных из борированной коррозионно-стойкой стали толщиной 5 мм для установки отработавших ТВС на хранение.

Трубы с плитами образуют жесткую сварную конструкцию. Опорная плита опирается на выдвижные опоры и опорные стойки. Стойки привариваются к полу бассейна выдержки на отметке + 21,9 м. Опорная плита изготовлена из коррозионно-стойкой

стали и имеет отверстия для подвода охлаждающей воды к ОТВС и пеналам.

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ БАСЕЙНА ВЫДЕРЖКИ

Расчетная модель бассейна выдержки для кода MELCOR 1.8.5 представляет собой модель кассетного и контейнерного отсеков энергоблока №1 ЮУАЭС, в котором установлены стеллажи для хранения ОТВС.

Основные изменения коснулись следующих компонентов расчетной модели.

1. В нодализации гермообъема (ГО) для реакторной установки (РУ) с ВВЭР вместо ранее существовавшей упрощенной модели бассейна выдержки разработана детальная модель БВ со стеллажами хранения ОЯТ, включая кассетный и контейнерный отсеки.

2. Нодализация бассейна выдержки с установленными стеллажами уплотненного хранения топлива (СУХТ) адаптирована под расчетную модель MELCOR 1.8.5. Эти изменения в комплексе позволили смоделировать процессы, протекающие в БВ, включая выпаривание, разогрев ОЯТ, повреждение и разрушение конструкций ОТВС и СУХТ бассейна выдержки, образование расплава и водорода, перемещение расплава в пределах БВ и его взаимодействие с облицовкой днища БВ (проплавление) и бетоном.

3. Нодализация опорных конструкций бассейна выдержки. Это позволило смоделировать накопление расплава и прогрессирующее взаимодействие расплава БВ с бетонным сооружением.

Бассейн выдержки моделируется 14-тью контрольными объемами и 23-мя путями соединения (рис. 2).

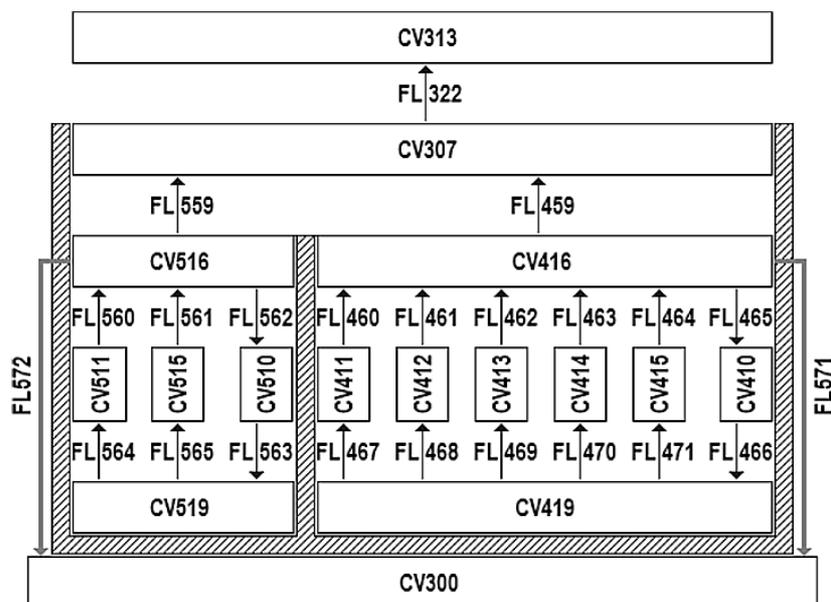


Рис. 2. Нодализационная схема бассейна выдержки первого блока ЮУАЭС

Номера контрольных объемов более теплонапряженного кассетного отсека имеют формат CV4xx, менее теплонапряженного контейнерного отсека - CV5xx.

Контрольные объемы CV419 и CV519 моделируют нижние объемы отсеков бассейна выдержки от нижней отметки пола 21,9 м до нижней границы нижней опорной плиты стеллажей хранения ОТВС.

Контрольные объемы CV411 – 415, CV511 и CV515 представляют собой объемы, в которых располагаются ОТВС внутри чехловых шестигранных труб, от хвостовиков ОТВС в нижней опорной плите стеллажа до верхней части металлических конструкций

стеллажей. Контрольные объемы CV410 и CV510 моделируют байпас между внешней боковой поверхностью периферийных рядов абсорбционных труб и боковой поверхностью отсеков бассейна выдержки. Контрольные объемы CV416 и CV516 моделируют участки кассетного и контейнерного отсеков от металлических конструкций стеллажей до верха стенки, разделяющей отсеки. Контрольный объем CV307 моделирует общий для двух отсеков объем, расположенный над разделяющей стенкой до верхней отметки бетонных конструкций 38,1 м. Пути течения FL571 и FL572 моделируют переливы на отметке 30,03 м (нормально открытые при работе РУ на номинальном уровне мощности).

Согласно текущей загрузке БВ ЮАЭС [6], в кассетном отсеке находятся 222 ОТВС и в контейнерном отсеке – 48 ОТВС, т.е. необходимо смоделировать два места размещения ОТВС. Программа MELCOR не обладает возможностью моделирования двух пространственно разделенных активных зон в одной модели. Исходя из того, что основная часть ОТВС расположена в кассетном отсеке, принято решение о его моделировании при помощи пакета COR. Контейнерный отсек моделируется при помощи пакета тепловых структур HS с заданным уровнем энерговыделений.

		CV416					HS41602		
CV410	CV411	115	215	315	415	515	HS41528	Необогреваемая часть	
		114	214	314	414	514	HS41526		
		113	213	313	413	513	HS41524		
		112	212	312	412	512	HS41522		
		111	211	311	411	511	HS41520		
		...	110	210	310	410	510	HS41518	Обогреваемая часть
		CV415	109	209	309	409	509	HS41516	
			108	208	308	408	508	HS41514	
			107	207	307	407	507	HS41512	
			106	206	306	406	506	HS41510	
	105		205	305	405	505	HS41508		
			104	204	304	404	504	HS41506	Необогреваемая часть
			103	203	303	403	503	HS41X03	Опорные структуры
	CV419		102	202	302	402	502	HS41904	
		101	201	301	401	501	HS41902		

Рис. 3. Распределение уровней кассетного отсека бассейна выдержки в пакете COR

В пакете COR происходит разбивка моделируемого кассетного отсека бассейна выдержки на повысотные участки (рис. 3). По высоте модель содержит 15 элементов, включая нижнюю, среднюю и верхнюю опорные плиты в качестве поддерживающей структуры (*support structure*).

Физические процессы внутри топливной решетки моделируются пакетом COR расчетного кода, для которого конструируется модель активной зоны в рамках кассетного отсека БВ.

При разработке модели кассетного отсека БВ учтено наличие заполненных водой зазоров между трубами и материала чехловых труб стеллажа в пакете COR. Модель учитывает массы всех конструкционных материалов БВ и ОТВС и их распределение по высоте модели. Облицовка пола бассейна выдержки играет роль днища, нарушение несущей способности которого происходит при превышении температуры 1000°C (значение по умолчанию, принятое в коде MELCOR 1.8.5). В дальнейшем, после разрушения облицовки пола, будет происходить взаимодействие расплава с бетоном.

В радиальном направлении ОТВС кассетного отсека бассейна выдержки (244 штук) распределяются на зоны (рис. 4). Первая зона (центральная) содержит 29 ОТВС, вторая – 50, третья – 74, четвертая – 69 и пятая зона (периферийная) содержит 22 свободные ячейки для установки ОТВС.

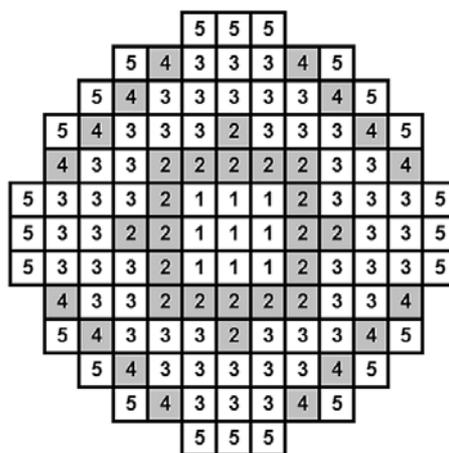


Рис. 4. Зонирование ОТВС в модели бассейна выдержки

Такое «плотное» расположение ОТВС в бассейне выдержки соответствует цилиндрической геометрии, заложенной в пакет кода COR, и более консервативно с точки зрения меньших потерь тепла от ОТВС в объемы системы герметичных ограждений (СГО) и конструкции БВ.

Согласно данным, полученным с ЮУАЭС [6], количество ОТВС в модели соответствует фактическому наличию отработавшего ядерного топлива в бассейне выдержки энергоблока №1 в период с 1998 по 2012 гг.

В рассматриваемой модели входными данными по энерговыделению является фактическое энерговыделение 222 заполненных ОТВС ячеек (из общего числа 244 ячейки) кассетного отсека бассейна выдержки первого блока ЮУАЭС, равное 0,988 МВт [6].

С целью оценки динамики снижения уровня борированной воды в БВ и дополнительного выхода пара и нагрева атмосферы СГО модель контейнерного отсека, менее теплонапряженного, отсека бассейна выдержки со стеллажами и имитаторами ОТВС добавлена в полную модель бассейна выдержки в терминах тепловых структур (HS). Входными данными энерговыделения для контейнерного отсека является фактическое энерговыделение 48 ОТВС из максимально возможных ячеек для установки ОТВС (всего 221 ячейка) бассейна выдержки первого блока ЮУАЭС, равное 0,218 МВт [6].

Для рассмотрения наиболее неблагоприятной ситуации ОТВС с меньшим сроком выдержки в модели ставятся ближе к центру БВ.

Профиль энерговыделения по высоте активной зоны принят аналогичным концу кампании в модели, разработанной для RELAP5/SCDAP [7], с максимумом, смещенным в верхнюю часть. Это дополнительно несколько ускоряет разогрев и повреждение топлива при снижении уровня воды в бассейне выдержки.

РАСЧЕТ ИСХОДНОГО СОБЫТИЯ «ОБЕСТОЧИВАНИЕ ЭНЕРГБЛОКА С ПРЕКРАЩЕНИЕМ ТЕПЛОТВОДА ОТ БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ БЕЗ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОДПИТКИ»

В рассчитываемом сценарии не учитывается протекание аварии на ЯЭУ АЭС, вызванной обесточиванием блока, т.е. влияние аварии энергоустановки на параметры в гермооболочке и, следовательно, в верхней части БВ.

По сценарию данного события не предусматривается подача подпиточной воды в бассейн выдержки (базовый сценарий). Авария просчитывалась с целью получения информации о динамике опустошения бассейна выдержки, времени разогрева и разрушения топлива, количестве сгенерированного водорода и т.п.

Вследствие полного обесточивания энергоблока происходит прекращение теплоотвода от бассейна выдержки. подача аварийного электроснабжения от дизель-генераторов (ДГ) или от других источников не рассматривается.

Исходное событие приводит к разогреву воды в отсеках БВ. Вследствие того, что тепловая мощность кассетного отсека превышает мощность контейнерного отсека, динамики нагрева и испарения жидкости в них имеют значительные рассогласования. На 46300-й секунде происходит вскипание воды кассетного отсека и на 116300-й секунде – контейнерного. Начинается выпаривание воды отсеков БВ и, следовательно, снижение уровней в них.

Начало оголения топливного участка кассетного отсека наступает значительно раньше – 214300 с, контейнерного – 851900 с. Полное оголение топливного столба ОТВС, расположенных в кассетном отсеке, наступает на 443600 с, что сопровождается резким увеличением температуры оболочек ТВЭЛов. С 509800-й секунды начинается разрушение ОТВС кассетного отсека.

Генерация водорода, масса которого составляет 271,5 кг, в кассетном отсеке БВ происходит с 354200-й по 649000-ю секунду. Расчетное значение массы водорода, сгенерированной в кассетном и контейнерном отсеках, определяется из уравнений

$$M_{H_2}^{конт} = M_{H_2}^{кас} \cdot N_{ТВС}^{конт} / N_{ТВС}^{кас} = 271,5 \cdot 48 / 222 = 58,7 \text{ кг}, \quad (1)$$

$$M_{H_2}^{total} = M_{H_2}^{кас} + M_{H_2}^{конт} = 271,5 + 58,7 = 330,2 \text{ кг}, \quad (2)$$

где $N_{ТВС}^{конт}$ – количество ТВС, расположенных в контейнерном отсеке; $N_{ТВС}^{конт} = 48$ шт.; $N_{ТВС}^{кас}$ – количество ТВС, расположенных в кассетном отсеке; $N_{ТВС}^{кас} = 222$ шт.; $M_{H_2}^{total}$ – масса водорода, сгенерированная в обоих отсеках, кг; $M_{H_2}^{кас}$ – масса водорода, сгенерированная в кассетном отсеке, кг (данный параметр рассчитывается программой MELCOR); $M_{H_2}^{конт}$ – масса водорода, сгенерированная в контейнерном отсеке, кг.

Расчет был прекращен по истечении 1155000 секунд с момента ИС аварии по причине отказа днища (облицовки) кассетного отсека бассейна выдержки.

В таблице 1 представлена хронология событий рассматриваемого исходного события.

Основные результаты расчета аварийного переходного процесса в графической форме приведены на рис. 5 – 8.

Таблица 1

Обесточивание энергоблока с прекращением теплоотвода от бассейна выдержки без восстановления подпитки

Время, с	Событие	Описание
0	Обесточивание энергоблока, незапуск ДГ, отключение насосов охлаждения бассейна выдержки	Исходное событие
46300 (116300)*	Начало кипения жидкости в бассейне выдержки	Температура воды в БВ вблизи поверхности равна 100 °С
214300 (851900)*	Начало оголения активной части ОТВС	Уровень воды ниже отметки 27,06 м
354200	Начало выделения водорода	Начало пароциркониевой реакции
443600	Полное оголение активной части ОТВС кассетного отсека	Уровень воды ниже активной части ОТВС, отметка 23,47 м
509800	Начало разрушения оболочек твэлов кассетного отсека	Разрушение ОТВС начинается с центрального радиального сегмента
649000	Завершение генерации водорода	Масса сгенерированного в кассетном отсеке водорода – 271,5 кг
1155000	Окончание расчета	Отказ днища контейнерного отсека бассейна выдержки

Примечание: xxxx – время расчета, соответствующее кассетному отсеку БВ; (xxxx)* – время расчета, соответствующее контейнерному отсеку.

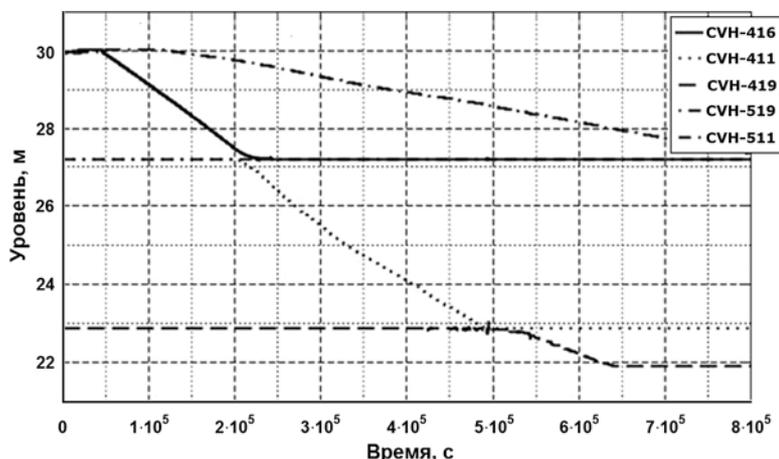


Рис. 5. Уровни воды в расчетных объемах БВ: CVH-416 – уровень воды в контрольном объеме CV416; CVH-411 – уровень воды в контрольном объеме CV411; CVH-419 – уровень воды в контрольном объеме CV419; CVH-516 – уровень воды в контрольном объеме CV516; CVH-511 – уровень воды в контрольном объеме CV511

Полученные результаты расчетного моделирования свидетельствуют о наличии значительного запаса времени для осуществления мероприятий по предотвращению или прекращению развития тяжелой аварии в бассейне выдержки ОЯТ. Таким образом, для исключения повреждения ОТВС и стеллажей бассейна выдержки в условиях тяжелой аварии целесообразно рассмотреть варианты реализации стратегий с подпиткой ОЯТ на разных стадиях аварии, что позволит обеспечить охлаждение топливных масс в БВ при потере теплоотвода.

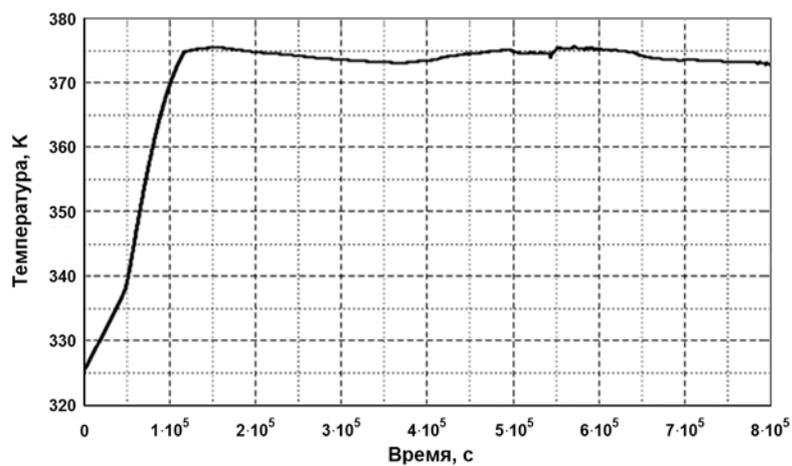


Рис. 6. Температура оболочек твэлов контейнерного отсека

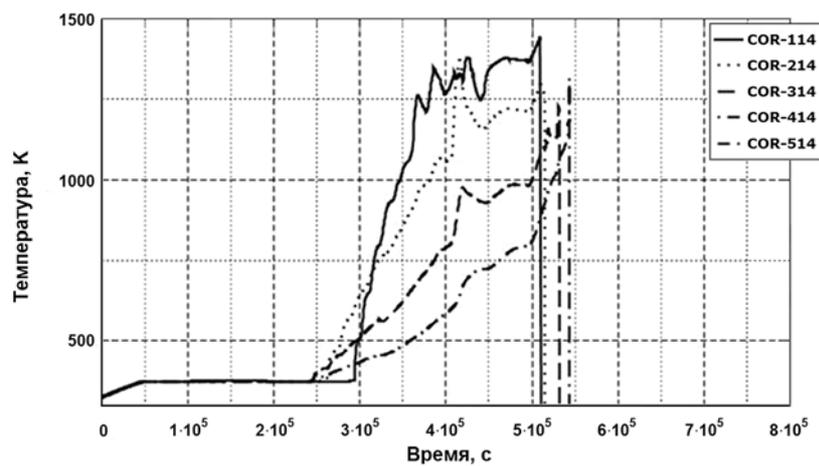


Рис. 7. Температура оболочек твэлов по радиальным зонам (кассетный отсек)

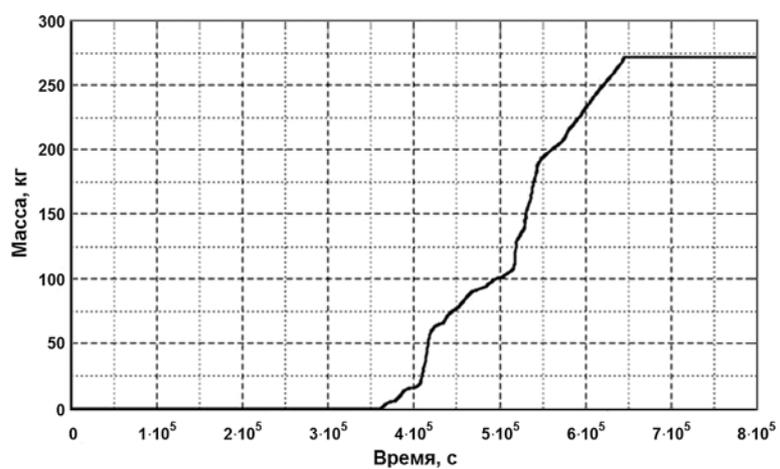


Рис. 8. Масса сгенерированного водорода в кассетном отсеке БВ

ВЫВОДЫ

Расчеты выполнены при помощи разработанной реалистической модели бассейна выдержки ОЯТ первого блока Южно-Украинской АЭС для компьютерного кода MELCOR 1.8.5. Проанализирован базовый вариант без вмешательства оперативно-го персонала станции, связанного с полным обесточиванием энергоблока и, как следствие, прекращением теплоотвода от бассейна выдержки ОЯТ. При разработке модели предполагалось, что в БВ хранятся отработавшие тепловыделяющие сборки различной степени выгорания и года выгрузки в соответствии с актуальными данными для энергоблока №1 ЮУАЭС.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии значительного запаса времени с момента рассмотренного ИС для осуществления мероприятий по предотвращению или прекращению развития тяжелой аварии в бассейне выдержки ОЯТ, а именно, у персонала станции имеется время не менее четырех суток для предотвращения повреждения топлива в бассейне выдержки либо не менее шести суток для предотвращения повреждения облицовки бассейна выдержки и взаимодействия расплава с бетоном.

Литература

1. MELCOR Computer Code Manuals. Reference Manuals. Version 1.8.5 December 2000, NUREG/CR-6119, Vol. 2, Rev. 2 SAND2000-2417/1.
2. International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami. Mission Report. Fukushima Dai-ichi NPP and Tokai Dai-ichi NPP, Japan 24 May - 2 June 2011, IAEA. — 2011.
3. Южно-Украинская АЭС. Энергоблок №1. Анализ уязвимости энергоблока в условиях тяжелых аварий. Итоговый отчет. 2011. EP4-2010.500.ОД.1
4. Технологические системы бассейна выдержки блока №1 ЮУАЭС. Инструкция по эксплуатации. ИЭ.1.0001.0088, 2009.
5. Запорожская АЭС. Отчет по анализу безопасности. Анализ запроектных аварий. Описание расчетной модели активной зоны и гермообъема для кода MELCOR. EP37-2006.420.ОД.2. 2008.
6. Южно-Украинская АЭС. Энергоблок № 1. Итоговая картограмма бассейна выдержки блока №1 ЮУАЭС. 302.1.28.БВ.99.12.ЮУ.
7. Южно-Украинская АЭС. Энергоблок №1. Разработка и валидация модели RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 для анализа тяжелых аварий. 2011.

Поступила в редакцию 23.01.2013

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039

Development of closed nuclear fuel cycle technologies of fast reactors for large scale nuclear energetic \ V.I. Rachkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 10 pages. – References, 11 titles.

Problems of modern nuclear power engineering are brought up and described are the possible solutions on the basis of closed nuclear fuel cycle with fast reactors that meet the requirements of inherent safety for large scale nuclear power industry. This article analyses the content of acting since 2010 Federal State Program “Nuclear power technologies of new generation for the period of 2010–2015 and in perspective until 2020” and its progress. The conclusion is that main principles of “Nuclear power engineering development strategy in Russia in the first half of XXI century”, approved by the government of RF in 2000, remain the same even though they require development concerning new reality at the market of organic fuels, state of Russian and world economies and higher safety requirements (Fukushima) as well as nuclear nonproliferation.

УДК 621.311.25

Model analysis of spent fuel pit severe accident for SUNPP (Unit 1) under blackout and heat removal failure using MELCOR 1.8.5 \ A.S. Balashevsky, D.V. Shevielov, N.I. Vlasenko, V.Ya. Kozlov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 9 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 7 titles.

The calculation model of the spent fuel pit for SUNPP (Unit 1) using MELCOR 1.8.5 computer code has been created. The loss of heat removal from spent fuel pit initiating event has been analyzed. Time limits of fuel damage, hydrogen generated mass and melt-concrete interaction having been estimated.

УДК 621.039.564.5

Methods for localization of failed fuel assemblies in MBIR reactor \ P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, D.A. Lukyanov, S.S. Shutov, A.S. Zhilkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 10 pages, 4 illustrations. – References, 6 titles.

The paper describes the designed fuel element monitoring system for MBIR fast research reactor. The method for localization of failed fuel assemblies on the power operating reactor is proposed. As a result, the time of failed fuel assemblies search on shutdown reactor can be reduced. The method is based on monitoring of delayed neutrons emitted by fission products in coolant, and modeling of the loop distribution of liquid metal coolant.

УДК 621.039

Simulation of irradiation of the personnel involved in the process of AMB SNF cutting under water \ V.P. Smirnov, A.Z. Gayazov, I. V. Kuzmin, A.Yu. Leshchenko, S.V. Semenovych, V.V. Serebryakov, A.S. Hrenov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 8 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 3 titles.

The article presents the basic factors of radiation exposure of the personnel in the process of work implementation for handling AMB SNF on the site of FSUE “PA “Mayak”. The results of experimental researches of mechanisms of formation of radiation sources impacting dosimetric situation are provided. The basic approaches to develop the model of formation of radiation exposure of the personnel and results of calculation of the parameters of dosimetric situation at working places using newly developed model are presented.