

УДК 621.039.586

ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СКОПЛЕНИЙ ВОДЫ В ОБЪЕКТЕ «УКРЫТИЕ»*Боровой А.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)*

Общие характеристики скоплений. Один из главных недостатков объекта «Укрытие» связан с его негерметичностью и заключается в возможности попадания в него большого количества воды — атмосферных осадков и конденсата, образующегося из-за разности внутренней температуры помещений и окружающего воздуха. Кроме природных, существует и техногенный источник воды — система пылеподавления, которая периодически разбрызгивает специальные составы с помощью системы форсунок, расположенных под кровлей. Оценка количества воды, поступающей в объект из различных источников за год, по данным [1] следующая, м³: осадки ~2000, конденсат ~1600, техногенный источник ~200.

Как отмечается в анализе [1], вода, поступающая в объект, может повышать опасность находящихся в нем топливосодержащих материалов:

попадая на их скопления, она увеличивает эффективный коэффициент размножения нейтронов в системе;

разрушая топливосодержащие материалы, она способствует неконтролируемому перемещению радионуклидов по внутренним помещениям и их выносу за пределы объекта;

переноса растворенные соли делящихся материалов и частицы топлива, она может увеличивать ядерную опасность объекта.

Остановимся на двух последних пунктах.

Водные потоки, образующиеся в помещениях «Укрытия», являются одним из основных факторов разрушения топливосодержащих материалов [2]. Взаимодействуя со скоплениями топлива, они уносят с собой как растворенные соединения, так и мелкие частицы. Предполагается, что значительная часть растворимых солей урана оседает на поверхности лаваобразных топливосодержащих материалов. В глубине лавы происходят процессы, характерные для зон гипергенезиса урановых месторождений [3]. Эти процессы заключаются во вторичном изменении оксидов урана и образовании хорошо растворимых оксикарбонатов урана. В свою очередь это приводит к активной миграции радионуклидов

из глубины лавы и их перераспределению с выходом на поверхность урана.

Впервые это было замечено в 1990 г., когда на поверхности застывших струй лавы, находящихся в парораспределительном коридоре, обнаружили ярко-желтые пятна. В дальнейшем эти пятна появились и на других скоплениях лавы. Микрорентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы показали, что новообразованные продукты являются смесью нескольких соединений, в том числе ретзерфордита, эпиянтинита, студитита и др.

Источниками информации о путях распространения и местах скопления воды в помещениях реакторного отделения 4-го блока Чернобыльской АЭС служат, в основном, визуальные наблюдения и измерения, проводимые в контрольных точках. В результате обследования помещений, доступных по дозовым нагрузкам, выяснилось, что вода постоянно скапливается в основном на отметках ниже +12.500 и ее общий объем составляет ≤500 м³. На более высоких отметках (до +39.500) могут образовываться временные небольшие скопления объемом менее 50 л (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Наибольшие скопления воды на нижних отметках объекта «Укрытие»

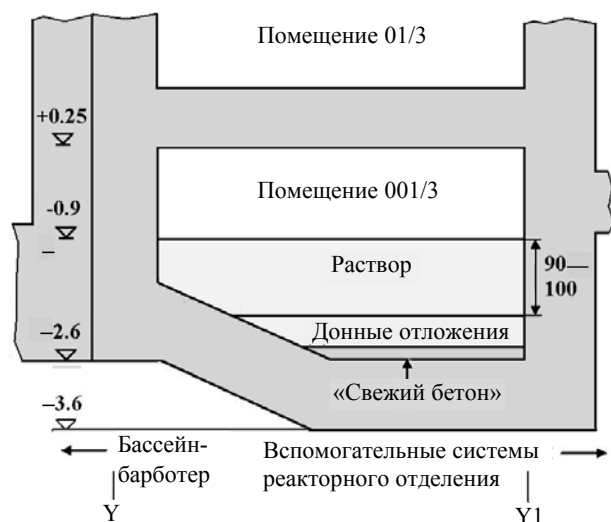
Отметка	Помещение	Точка пробоотбора (наблюдения)	Объем, м ³
-2.600	001/3	30	300 (жидкость) и 100 (донные отложения) [4]
-0.650	013/2	18	20 [1]
-0.650	012/5—8, север	31	25 [1]
+ 2.200	012/13—16, юг	6	60 [1]

В настоящей статье проанализированы данные, касающиеся двух наибольших скоплений воды. Одно из них находится в помещении 001/3 на отметке -2.600 (точка наблюдения № 30). Это скопление аккумулирует потоки воды, проходящие через северную и центральную часть «Укрытия». Непосредственно поступающие сюда потоки складываются из среднеак-



Р и с. 1. Скопления воды и водные потоки в северной части бассейна-барботера (1-й этаж)

тивных жидких отходов бассейна-барботера ($\sim 90 \text{ м}^3/\text{год}$) и низкоактивных со стороны каскадной стены ($\sim 600 \text{ м}^3/\text{год}$) (рис. 1). Наблюдения показали, что протечки жидких радиоактивных отходов из бассейна-барботера в помещение 001/3 происходят не постоянно, а только в периоды интенсивного попадания влаги в «Укрытие». Например, весной уровень воды в бассейне-барботере повышается, и избыток высокоактивного раствора перетекает в помещение 001/3. В сухие периоды (осенью и зимой) уровень воды в бассейне-барботере понижается и скопления воды в помещении 001/3 пополняются за счет низкоактивных жидких отходов, которые текут со стороны каскадной стены. Вода из этого скопления перетекает в помещения 3-го блока, где собирается и отправляется на хранение и переработку (рис. 2). Полный объем донных отложений в помещении 001/3 оценивается



Р и с. 2. Расположение раствора и донных отложений в помещении 001/3

$\sim 100 \text{ м}^3$, их масса $\sim 150 \text{ т}$ [4]. Отложения состоят из двух слоев — более жидкого толщиной $0,17\text{—}0,26 \text{ м}$ и твердого — $0,42 \text{ м}$.

Следующее по размерам скопление объемом 60 м^3 , в котором накапливаются водные потоки южной части «Укрытия» (точка наблюдения № 6), находится в помещениях 012/13—16 на отметке $+2.2000$. Уровень воды в этих помещениях около 10 см , полный объем донных отложений в скоплении оценивается $\sim 0,5$

м^3 .

Содержание радионуклидов и делящихся элементов в скоплениях воды. Из табл. 2 видно, что общее количество радионуклидов и делящихся веществ, находящихся в скоплениях воды, составляет незначительную часть сосредоточенных в «Укрытии». Например, в наиболее крупном скоплении (точка наблюдения № 30) содержится менее $3 \cdot 10^{-5}$ части ^{137}Cs , оставшегося в объекте. Поэтому связываемая с потоками воды опасность неконтролируемого перемещения радионуклидов и делящихся веществ по внутренним помещениям «Укрытия» относительно мала.

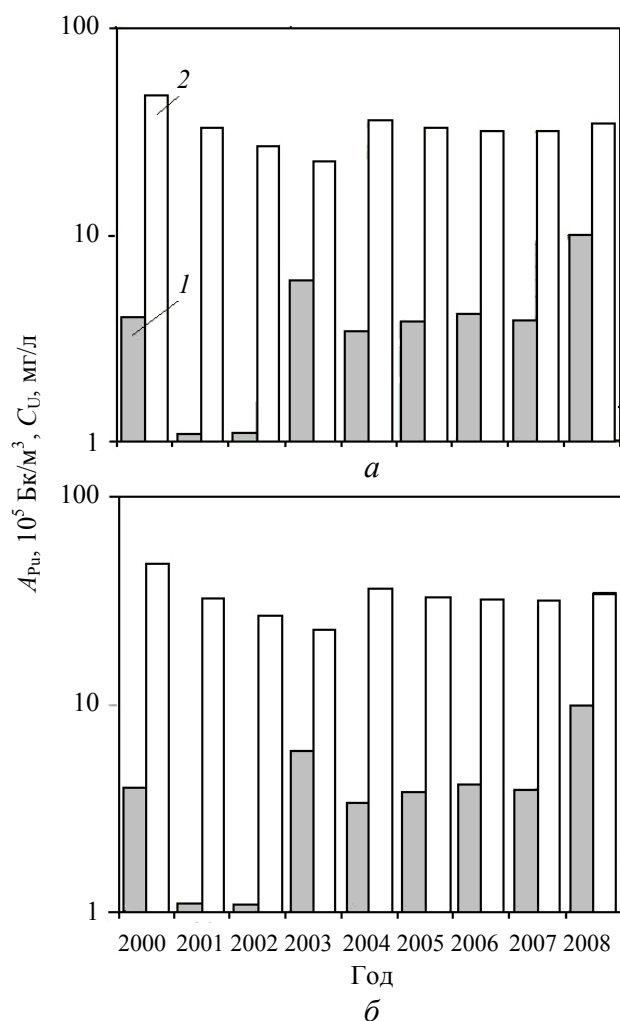
Т а б л и ц а 2. Содержание радионуклидов в скоплениях воды по усредненным данным за 2007 г. [5]

Нуклид	Точка наблюдения	
	№ 30	№ 6
^{90}Sr , ГБк/ м^3	2,1	7,6
^{137}Cs , ГБк/ м^3	7,5	38
$^{238+239+240}\text{Pu}$, МБк/ м^3	1,4	3,9
U, мг/ дм^3	7,8	32

Потоки воды, протекающие через загрязненные помещения «Укрытия», могут дать важную информацию о том, не происходит ли нарастающее со временем разрушение топливосодержащих материалов где-либо в объекте. Это тем более актуально, что, начиная с конца 1990-х годов, активно обсуждается гипотеза, согласно которой лава под действием собственного излучения может разрушиться. Предсказы-

вают, что это разрушение может произойти в ближайшие годы, будет развиваться стремительно, в процессе развития лава превратится в субмикронную пыль [6—8]. Такие предсказания вызывают беспокойство, поскольку конструкция создающейся новой защитной оболочки не предусматривает возможность удержания сотен тонн радиоактивной субмикронной пыли в течение десятков лет и ее последующего извлечения и захоронения.

Результаты многолетних наблюдений за содержанием в воде скоплений плутония и урана представлены на рис. 3. Видно, что за этот период концентрация плутония в среднем возрастала, особенно сильно в последние годы и особенно в помещении 001/3 (точка наблюдения № 30). Концентрация урана изменялась волнообразно. Ничто не указывает на стремительное разрушение лавы внутри объекта и превращение ее вещества в субмикронную пыль. Нарастание концентрации плутония может объясняться по-



Р и с. 3. Содержание в воде $^{238+239+240}\text{Pu}$ (1) и урана (2) в точке наблюдения № 30 (а) и № 6 (б)

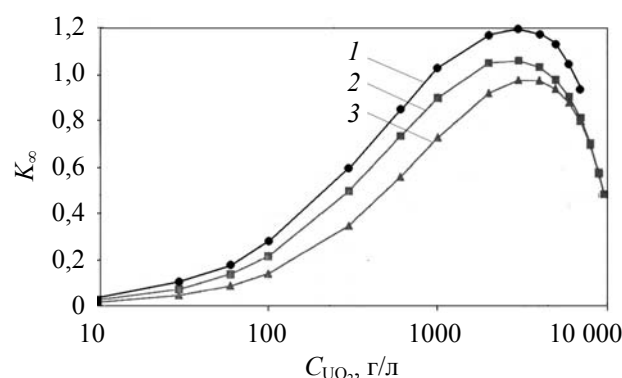
степенным макроскопическим разрушением лавы и увеличением поверхности, омываемой водой.

В работе [4] активность $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях помещения 001/3 оценивается $2,51 \cdot 10^{12}$ Бк, при этом доля валового количества ^{239}Pu равна 430 г. Суммарное количество урана составляет 80 274 г, содержание ^{235}U (1,07%) равно 860 г. С нашей точки зрения точность оценок не может быть лучше $\pm 30\%$.

Ядерная безопасность скоплений воды.

Опасность накопления ядерного топлива в воде в виде растворенных солей урана или взвеси подробно исследовалась в работе [9]. На рис. 4 видно, что коэффициент размножения $K_{\infty} = 0,95$ достигается при концентрации ядерного топлива в гомогенной смеси ~ 1500 г/л (при 2%-ном начальном обогащении ^{235}U и выгорании 11 кВт·сут/кг). Если в скоплении воды находится растворимая соль гадолиния концентрацией 0,1 г/л и более, самоподдерживающаяся цепная реакция становится невозможной при любой концентрации такого топлива. В скоплениях воды в «Укрытии» концентрация урана составляет десятки мг/л, что во много раз меньше ядерно опасных значений. В некоторых скоплениях обнаружены соли гадолиния, поступающие туда с водой от системы пылеподавления. Так, по данным на май 2006 г. в воде помещения 001/3 содержалось 0,2—0,3 мг/л гадолиния.

Отметим, что на все крупные скопления воды, кроме расположенного в помещении 001/3, накладывается и еще один запрет возникновения самоподдерживающейся цепной реакции — их малая глубина, менее 0,5 м. Так, в точке № 6 она составляет ~ 10 см.



Р и с. 4. Зависимость K_{∞} от концентрации UO_2 для гомогенных смесей с водой и гадолинием при начальном обогащении 2%: 1 — свежее топливо без гадолиния; 2, 3 — топливо выгоранием 11 кВт·сут/кг без гадолиния и содержащее 0,1 г/л гадолиния соответственно

Рассмотрим безопасность донных отложений в помещении 001/3. Примем для них модель гомогенной смеси, состоящей из трех компонентов — $\text{UO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$, поскольку исследования показывают, что основную часть отложений составляет песок. При равномерном распределении концентрация урана составляет $\sim 0,8$ г/л, выгорание может лежать в пределах 9—13 МВт·сут/кг. В случае бесконечной среды такого состава можно воспользоваться результатами работы [10], в которой рассмотрена аналогичная система. В ней предполагается, что содержание воды в каждой точке таково, что K_∞ максимален (наиболее консервативный подход). На рис. 5 видно, что отложения в помещении 001/3 ядерно безопасны. Учет любых дополнительных параметров, например, наличия других химических элементов, входящих в состав топливосодержащих материалов, присутствие поглотителей и др. только усиливает это утверждение. В то же время согласно критериям ПБЯ-06-00-88 проведение дальнейших работ с таким скоплением уже требует особого внимания.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о ядерной безопасности водных скоплений в объекте «Укрытие» в настоящее время. Однако продолжающиеся процессы вымывания урана и его накопление в донных осадках, особенно если интенсивность этих процессов со временем будет нарастать, требуют постоянного контроля до момента, пока пути попадания воды в объект не будут перекрыты.

Опасность скоплений воды после сооружения арки и в период ожидания разборки «Укрытия». Сейчас работы по преобразованию «Укрытия» в экологически безопасное состояние развертываются при финансовой, техниче-

ской и организационной помощи международного сообщества, в том числе и нашей страны. Первая крупная работа по преобразованию объекта — стабилизация строительных конструкций, завершенная в 2007 г., выполнила поставленные задачи, но не повлияла решающим образом на водный баланс внутри «Укрытия». Поэтому можно считать, что существующая ситуация с водой сохранится до того, как будет сооружена новая безопасная защитная оболочка в форме арки, надвинутой на «Укрытие» и закрывающей ее с боковых сторон. Ожидается, что это произойдет в 2012 г. Арка перекроет пути поступления атмосферных осадков. Это означает, что внутрь «Укрытия» в год будет попадать воды примерно на 2000 м^3 меньше. Тепловая инерция здания сильно возрастет, средняя температура воздуха в «Укрытии» повысится за счет дополнительной теплоизолирующей оболочки и продолжающегося тепловыделения топлива и техногенных источников тепла. Скорость естественного воздухообмена в помещениях объекта понизится. Все это должно привести к существенному уменьшению образования конденсированной влаги.

Предварительные оценки количества воды, которая может попасть в объект в результате технологических процессов, например, пылеподавления при разборке части конструкций, до создания детальной программы организации работ сделать нельзя. Должны быть выработаны соответствующие технические и организационные меры, сводящие к минимуму воздействие влаги на топливосодержащие материалы.

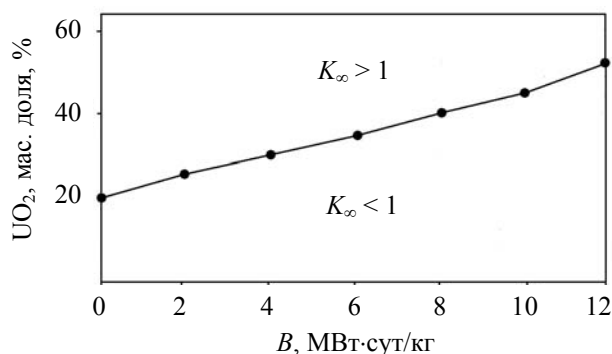
Следующим наиболее трудным этапом преобразования «Укрытия» должно стать извлечение ядерного топлива и радиоактивных материалов и их окончательное захоронение. По оценкам подготовка и выполнение этих операций могут занять многие десятки лет. За годы ожидания разборки:

пересохнут потоки и скопления воды и повысится ядерная безопасность объекта;

замедлятся процессы разрушения топливосодержащих материалов, поскольку их главной причиной является вода;

уменьшится влажность воздуха, которая благоприятно скажется на долгосрочной прочности металлоконструкций объекта.

Может произойти и дополнительное образование радиоактивной пыли, способной при любых возмущениях подниматься в воздух в виде



Р и с. 5. Зависимость коэффициента размножения нейтронов от содержания урана и выгорания топлива в системе $\text{UO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

аэрозолей. Источники такой пыли — высохшие скопления воды и пыль, удерживаемая сейчас силами адгезии на стенах, потолках, полах помещений. В состав последнего вида может войти часть пыли, связанной с разрушением под действием радиации пылеподавляющих покрытий (пленок), многие десятки тонн которых были нанесены на поверхности внутренних помещений «Укрытия» во время проведения в них работ. Новые источники пыли могут стать важным фактором опасности при работах по извлечению из «Укрытия» ядерного топлива и радиоактивных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отчет МНТЦ «Укрытие» № 3836. Чернобыль, 2001. 337 с.
2. Богатов С.А., Боровой А.А., Пазухин Э.М. Результаты исследований долговременного поведения чернобыльских лав в объекте «Укрытие»: Препринт ИАЭ-6565/3, 2009. 37 с.
3. Мейер В.А., Ваганов П.А. Основы ядерной геофизики. Л.: Недра, 1978. 347 с.
4. Панасюк Н.И., Скорбун А.Д., Подберезный С.С. и др. Подсчет количества радионуклидов в донных осадках помещения 001/3 объекта «Укрытие». — Проблемы безопасности атомных электростанций в Чернобыле. Вып. 2. Чернобыль, 2005, с. 46—48.
5. Боровой А.А. Потенциальная опасность скоплений воды в объекте «Укрытие»: Препринт ИАЭ-6571/3, 2009. 11 с.
6. Барьяхтар В.Г., Гончар В.В., Жидков А.В., Ключников А.А. О пилегенерирующей способности аварийного облученного топлива и лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие»: Препринт МНТЦ «Укрытие» № 97-10. Чернобыль, 1997. 20 с.
7. Жидков А.В. Топливосодержащие материалы объекта «Укрытие» сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния. — Проблемы Чернобыля, 2001, вып. 7, с. 23—40.
8. Baryakhtar V., Gonchar V., Zhidkov A., Zhydkov V. Radiation damages and self-sputtering of high-radioactive dielectrics: spontaneous emission of submicron dust particles. — Condense Matter. Phys., 2002, v. 5, № 3(31), p. 449—471.
9. Гмаль Б., Мозер Е., Претш Г., Кваде У. Анализ и оценка Технического обоснования ядерной безопасности объекта «Укрытие». Поведение критичности TCM на объекте «Укрытие». Отчет GRS по проекту SR-2075/8-1, рабочий пункт 1, GRS-A-2414. 1997. 44 с.
10. Боровой А.А. Материалы по ядерной безопасности объекта «Укрытие»: Препринт ИАЭ-6458/11, 2007. 17 с.

Поступила в Редакцию 15.06.09

УДК 621.039.566

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЧЕЛОВЕКА И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА ВСЕХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПЛАВУЧИХ АТОМНЫХ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ*

Горлинский Ю.Е., Кутьков В.А., Лысцов В.Н., Макаров В.И., Мурзин Н.В., Павлов В.Д.
(РНЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Плавучая атомная теплоэлектростанция является объектом использования атомной энергии, предназначенным для снабжения электрической и тепловой энергией удаленных береговых территорий. Прежде всего речь идет о снабжении электроэнергией и теплом предприятий и жилых поселков в районах Крайнего Севера, которые не охвачены единой энергетической системой и нуждаются в автономных источниках энергии.

*Журнальный вариант доклада на межотраслевой научно-практической конференции «Плавучие АТЭС — обоснование безопасности и экономичности, перспективы использования в России и за рубежом (ПАТЭС-2008)», состоявшейся 25—26 ноября 2008 г. в Нижнем Новгороде.

Ближайшими аналогами такой станции являются ледокольные суда с ядерно-энергетической установкой на борту, десятки лет работающие в Северном Ледовитом океане. Они эксплуатируются на значительном удалении от мест компактного проживания населения, а длительная стоянка, техническое обслуживание, включающее перегрузку топлива и ремонт, проходят на территории специального предприятия в условиях, когда защита персонала и населения при нормальной эксплуатации и проектных авариях обеспечивается конструкцией ядерно-энергетической установки, при запроектных авариях — береговой инфраструктурой. Близость предполагаемых пунктов размещения пла-