

1. Ионов А.И., Никитин Ю.М., Новосельский О.Ю. и др. 10-летний период в исследовании черновильской аварии (аналитический обзор): Препринт НИКИЭТ ЕТ/36, 1997. 68 с.
2. Международный семинар «Уроки Чернобыля». Технические аспекты. 15—19 апреля 1996 г. Десногорск, Смоленская АЭС. Сборник докладов, 1996, т. 1, 2.
3. Новосельский О.Ю., Черкашов Ю.М., Чечеров К.П. Технические аспекты аварии на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС: Препринт НИКИЭТ ЕТ-05/70, 2005. 45 с.
4. Давлетбаев Р.И. Последняя смена. — В сб.: Чернобыль. Десять лет спустя. Неизбежность или случайность? М.: Энергоатомиздат, 1995, с. 366—383.
5. Новосельский О.Ю., Скибин А.П., Соловьев С.Л., Шишов А.В. Расчетное исследование с помощью кода STAR_CD гидродинамических характеристик проточной части запорно-регулирующего клапана топливного канала РБМК-1000: Препринт НИКИЭТ ЕТ-03/62, 2003.
6. Юфтин А.П. Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод. М.: Высшая школа, 1965.
7. Новосельский О.Ю., Подлазов Л.Н., Черкашов Ю.М. Чернобыльская авария. Исходные данные анализа. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомная техника и технология, 1994, вып. 1, с. 1—5.
8. Gudiksen P., Sullivan T., Harvey T. The Current Status Of ARAC and its Application to the Chernobyl Event: Preprint Lowrence Livermore National Laboratory UCRL-95562, 1986. 8 p.
9. Страхов В.Н., Старостенко В.И., Харитонов О.М. и др. Сейсмические явления в районе Чернобыльской АЭС. — Геофизический журнал НАН Украины, 1997, т. 19, № 3, с. 3—15.
10. Собонович Э.В., Вальтер А.А., Ольховик Ю.А. и др. Твердые радиоактивные выпадения в ближней зоне Чернобыльской АЭС. — Труды НАН Украины, 1993, № 8, с. 172—176.

Поступила в Редакцию 23.12.05

УДК 621.039.54

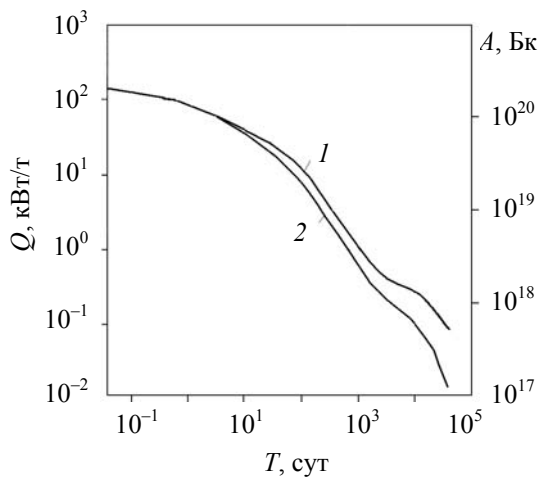
ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО В ОБЪЕКТЕ «УКРЫТИЕ»

Боровой А.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

При ликвидации последствий аварий на Чернобыльской АЭС одним из наиболее важных и трудных вопросов стал перевод в контролируемое состояние ядерного топлива, оставшегося в разрушенном блоке (в границах созданного объекта «Укрытие»). Необходимо было определить месторасположение основных скоплений топливосодержащих материалов, их физико-химические свойства, оценить степень ядерной и радиационной безопасности, создать системы контроля и подготовить необходимые контрмеры на случай возможных аварий. В перспективе следовало извлечь топливо из созданного объекта «Укрытие» и захоронить его. Работы по выполнению этой задачи шли с первых дней после аварии и на протяжении всех 20 прошедших лет. Несмотря на успешное решение многих отдельных вопросов, полностью она до сих пор не решена. Топливосодержащие материалы, оставшиеся в объекте «Укрытие», контролируются не полностью. Это заставляет прибегать к избыточным мерам безопасности, основывающимся на заведомо консервативных предположениях. В настоящей статье сделана попытка описать результаты исследований ядерного топлива, проведенные за 20 лет, и обсудить некоторые аспекты будущих работ.

К моменту аварии активная зона реактора содержала 1659 ТВС. Их большая часть представляла собой ТВС первой загрузки выгоранием 11—15 МВт·сут/кг урана. Среднее выгорание по зоне составляло 10,9 МВт·сут/кг урана. В активной зоне находилось и некоторое количество свежего топлива. Масса урана в каждой кассете составляла ~115 кг, полная масса топлива, загруженного в активную зону, 190,2 т.

Сразу после аварии обнаружилось значительное расхождение расчетного и измеренного количества основных радионуклидов, накопленных в топливе 4-го блока за период его работы до аварии. Поэтому были выполнены работы, в которых эти расчеты уточнялись [1—3]. Основные характеристики топлива иллюстрирует рис. 1 [1].



Р и с. 1. Зависимость изменения удельного тепловыделения топлива 4-го энергоблока (1) и его суммарной активности (2) от времени, прошедшего после аварии

1986—1987 гг. Проникновению в

разрушенный блок и исследованиям находящихся там скоплений топливосодержащих материалов препятствовали огромные радиационные поля, завалы конструкций и бетон, заливший при строительстве «Укрытия» десятки помещений. Поэтому в 1986—1987 гг. основным достижением стала оценка полного количества топлива, оставшегося в разрушенном блоке. Наиболее достоверные оценки были сделаны на основании определения количества топлива, выброшенного при аварии за пределы объекта [1, 4—6]. В настоящей статье остановимся только на главных принципах таких оценок. После аварии стало ясно, что выброс урана и трансурановых элементов происходил в виде топливных частиц, в состав которых входили и другие труднолетучие радионуклиды, оставшиеся в топливной матрице. Это позволило заменить сложные радиохимические анализы почвенных проб на уран и изотопы плутония $^{238-240}\text{Pu}$ оперативным определением в них ^{144}Ce по его γ -излучению [4]. При этом использовали корреляционное соотношение

$$A(\text{Pu}) = K_{\text{Pu}} A(^{144}\text{Ce}),$$

где $A(\text{Pu})$ — суммарная α -активность $^{238-240}\text{Pu}$; K_{Pu} — коэффициент корреляции; $A(^{144}\text{Ce})$ — γ -излучение ^{144}Ce в образце. На 26 апреля 1986 г. $K_{\text{Pu}} \sim 9 \cdot 10^{-4}$.

В измерениях применяли трехуровневую систему определения топливного загрязнения:

определение мощности дозы γ -излучения с помощью аэрогаммаразведки (первое, «грубое» приближение, использующее соотношение мощность дозы—количество топлива);

оперативное исследование почвенных проб с помощью полупроводниковых гамма-спектрометров (уточняющие измерения с помощью коэффициента корреляции K_{Pu});

медленные и тщательные радиохимические анализы (проверка устойчивости коэффициента K_{pu}).

К осени 1986 г. измерения, проведенные специалистами РНЦ «Курчатовский институт», некоторых НИИ, служб Госкомгидромета и военных организаций, позволили оценить выброс топлива. Он оказался равным $3 \pm 1,5\%$ всего количества, находившегося в активной зоне 4-го блока перед аварией (см. таблицу). В дальнейшем в 1987—2000 гг. анализ десятков тысяч проб подтвердил, что выброс топливных частиц мал (менее 5%) [6].

Распределение топлива после аварии

Месторасположение топлива	Количество топлива, % загрузки
В границах будущего «Укрытия»	> 96
Площадка станции	< 0,3
80-км зона (исключая площадку)	< 1,5
Остальная территория СССР	< 1,5
За границей	< 0,1

Таким образом, можно считать установленным, что внутри объекта «Укрытие» осталось более 95% топлива начальной загрузки, т.е. более 184 т (по урану).

Отметим, что выброс легколетучих радиоактивных веществ — радиоактивных бла-

городных газов, иода, цезия, теллура и др. происходил независимо. Например, цезий выносился из реактора на активной стадии аварии, сорбируясь на легких аэрозолях, поднимающихся на значительную высоту с потоком теплого воздуха. «Радиоактивные облака» удалялись на большое расстояние и здесь в силу выпадения дождя или из-за сложного характера воздушных течений загрязняли территорию. Именно эти загрязнения обусловили огромные масштабы аварии.

Окончательные оценки [1] таковы: выброс ^{137}Cs и ^{134}Cs за пределы объекта «Укрытие» составил $33 \pm 10\%$ накопленного в активной зоне перед аварией, долгоживущего ^{137}Cs — $2,3 \pm 0,7$ МКи.

1988—1991 гг. Для продолжения исследований и получения информации о ядерной и радиационной безопасности топлива в «Укрытии» была разработана специальная программа [7]. Следуя ей, очистили и дезактивировали помещения сначала с западной, позднее с южной стороны блока. В них установили буровые станки, и через бетон и металлические конструкции пробурили скважины к местам предполагаемых скоплений топливосодержащих материалов. Визуальными наблюдениями (перископы, телевизионные камеры), а также с помощью специально разработанных тепловых, гамма- и нейтронных детекторов был проведен большой объем исследований. Одновременно анализировали отобранные при бурении образцы материалов. С 1988 г. дозиметрические, спектрометрические и радиохимические исследования образцов топливосодержащих материалов стали проводиться в созданной в Чернобыле лаборатории. К анализам образцов подключились также научные центры Москвы, Киева и Ленинграда. К концу названного периода число скважин превысило 100.

Исследования этого периода позволили:

оценить внутренние разрушения реактора, выяснить состояние конструкций блока;

определить основные места скоплений топливосодержащих материалов и изучить их модификации;

создать систему постоянно работающих датчиков, максимально приближенных к топливосодержащим материалам (система «Финиш»).

В ходе работ для оценки больших скоплений топлива, доступ к которым был затруднен, применялся теплотрический метод. Он основан на том, что полный поток тепла, выходящий из помещения со скоплением топливосодержащих материалов, определяется мощностью остаточного тепловыделения этого скопления, т.е. массой облученного топлива. В условиях объекта «Укрытие», когда такие скопления часто покрыты метровыми слоями свежего попавшего при строительстве «Укрытия» бетона, теплотрический метод оказывался незаменимым.

Результаты исследований этих лет были обобщены в документе [8]. В нем общее количество топлива, которое удалось обнаружить в помещениях «Укрытия», оценено как 135 ± 30 т. Часть топливосодержащих материалов оставалась недоступной для исследований.

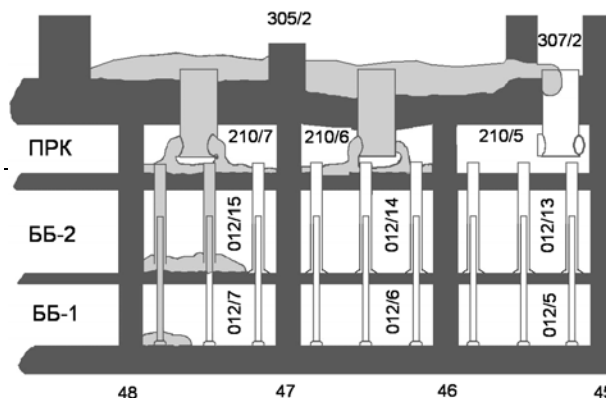
Как уже говорилось, важным результатом исследований было изучение физико-химических свойств различных модификаций топливосодержащих материалов. Таких модификаций было найдено четыре:

фрагменты разрушенной активной зоны, ТВС, твэлы, топливные таблетки и их отдельные части были выброшены на верхние отметки объекта, остались в шахте реактора и подаппаратном помещении 305/2, которое после взрыва оказалось объединенным с шахтой реактора;

радиоактивные топливосодержащие частицы, которые в «Укрытии» внедрились в бетонные стены, полы, потолки помещений, находились в воздухе в виде аэрозолей;

лавообразные материалы. Эти материалы, содержащие в среднем 7% по массе ядерного топлива, были обнаружены во многих подреакторных помещениях. Их образование происходило во время активной стадии аварии. Центром процесса стала юго-восточная часть подаппаратного помещения 305/2. Под действием выделяющегося тепла расплавлялись материалы активной зоны, строительные конструкции, металл, бетонные блоки, попавшие в шахту реактора. По мере увеличения массы расплав распространялся по полу помещения 305/2, достигал паросбросных клапанов, переливался внутрь и попадал в нижние помещения, созданные для локализации пара при проектной аварии, парораспределительный коридор (ПРК) и два этажа бассейна-барботера (ББ-1, -2), расположенные на отметках 6,00, 3,00 и 0,00 м соответственно (рис. 2). Одновременно расплав распространялся и в горизонтальном направлении, так как в стене между помещениями 305/2 и 304/3 при аварии образовался пролом;

растворимые формы топлива. В сентябре 1990 г. на поверхности застывших струй лавы, находящихся в парораспределительном коридоре, были обнаружены ярко-желтые пятна и разводы. Содержание изотопов плутония в этих новообразованиях в сотни раз ниже, а массовая доля урана в несколько раз выше, чем в лавообразных топливосодержащих материалах. Эти растворимые соединения урана могли переноситься потоками воды, накапливаться в помещениях объекта, проникать в окружающую среду.



Р и с. 2. Вертикальные потоки застывшей лавы (серый цвет) на нижних отметках объекта «Укрытие»

III. 4, АПРЕЛЬ 2006

1992—1997 гг. Бурение скважин внутри объекта было приостановлено. Однако продолжалась работа исследовательских групп и накапливалась информация от систем контроля и диагностики. Проводился постоянный анализ проб топливосодержащих материалов. Роботы, созданные в

РНЦ «Курчатовский институт» специально для работы в помещениях «Укрытия», смогли взять пробы лавы из-под застывшего бетона [9].

В это время были предложены новые интегральные методы оценки количества лавы в нижних помещениях — по выбросу цезия и химическому составу. Полный выброс ^{137}Cs составил по активности около 2 МКи, т.е. ~28% накопленной в реакторе до аварии (7 МКи) [10]. Цезий выходил именно из лавы, что доказано анализами проб, и это привело к тому, что топливо в лаве оказалось обедненным им в среднем до 0,37 начального количества, т.е. выброшено 63%. Эти 63% соответствовали активности 2 МКи. Следовательно, вначале активность ^{137}Cs в топливе, вошедшем в состав лавы, составляла $2 \text{ МКи} / 0,63 = 3,2 \text{ МКи}$. Эту активность имела $3,2 \text{ МКи} / 7 \text{ МКи} = 0,46$ части топлива. Следовательно, в лаве до выброса цезия было 46% всего топлива, т.е. около 90 т.

Информация о топливосодержащих материалах суммирована в документе [11], который стал одним из основных для выдачи лицензии на эксплуатацию объекта «Укрытие». В нем были сделаны выводы и относительно полного количества топлива, оставшегося в «Укрытии». Позднее на большем материале они были повторены в редакции 2001 г. [1]: «При самом осторожном подходе экспертов к оценке общего количества топлива, когда любые сомнения толкуются только в «минус», цифра получается всегда большая 125 т (для топлива из разрушенного реактора). Менее осторожная оценка около 150 т. На площадке объекта под слоем гравия, песка, бетона находится примерно 0,75 т топлива».

До сих пор нет информации о топливе, находящемся в центральном зале, под слоем сброшенных материалов, под каскадной стеной, внутри больших скоплений в помещениях 305/2, 307/2.

1997—2005 гг. Несмотря на дополнительные работы по укреплению конструкций объекта (1988—1989 гг.), уже к 1989 г. стало ясно, что в существующем виде «Укрытие» не может считаться объектом, безопасность которого гарантирована на десятки лет. Поэтому впервые предлагалось возвести над существующим «Укрытием» герметичное сооружение «Укрытие-2», которое могло бы простоять многие десятилетия, со временем разработать технологию и под защитой «Укрытия-2» разобрать разрушенный блок, вывезти и захоронить топливо [12]. С самого начала было ясно, что такое преобразование «Укрытия» явится очень дорогим мероприятием и потребует международной помощи. Так и произошло. Понадобились масса усилий и значительное время, прежде чем правительству Украины удалось договориться о создании Чернобыльского фонда и получить согласие западных стран передать в него 760 млн дол. Для этого в 1996—1997 гг. на основе предыдущих исследований специалистов России и Украины был разработан План проведе-

ния работ на объекте «Укрытие» [13]. 1998 г. можно считать началом его реализации. Рекомендуемые действия содержат следующие три фазы:

стабилизация и другие краткосрочные меры (предложены специалистами РНЦ «Курчатовский институт» в 1995 г. [14]);

подготовка к преобразованию в экологически безопасное состояние, создание нового безопасного «Укрытия-2» [12];

преобразование в экологически безопасное состояние.

Развертывание работ привлекло особое внимание к состоянию топливосодержащих материалов, находящихся в «Укрытии». Потребовалось не только получение новой информации, но и более тщательный и целенаправленный анализ всех уже имеющихся данных. Поэтому одновременно с обследованиями помещений в этот период выполняется большой объем аналитических и расчетных исследований, проводится верификация результатов анализов более чем 300 проб и данных систем контроля за прошедшие годы. Главная задача — от общих описаний объекта перейти к конкретным помещениям и, главное, более точно оценить радиационную и ядерную опасность скоплений топлива в них. Вот некоторые из проведенных работ.

В 1997—1999 гг. проводились комплексные исследования топливосодержащих материалов на верхних отметках объекта [15]. Их цель — собрать необходимый экспериментальный материал о свойствах топливной пыли.

В 1998 г. были проведены сбор и анализ всех имевшихся данных о количестве и расположении топливных материалов в помещении 304/3 [16]. Дополнительно исследованы отобранные пробы черной лавы.

В 1999 г. аналогичная работа была проведена для нижних отметок «Укрытия» (0,00, 3,00 и 6,00 м) [17].

В 2001 г. в РНЦ «Курчатовский институт» в рамках французско-германской инициативы закончились работы по созданию базы данных [18], в которой сосредоточены информация о 97 больших скоплениях топливосодержащих материалов в помещениях объекта и более 6000 отдельных записей по результатам анализа проб.

2003—2005 гг. Разрушение лавообразных топливосодержащих материалов (долгосрочный прогноз). Преобразование «Укрытия» в экологически безопасное состояние предполагает, что окончательное извлечение топливосодержащих материалов из объекта и их захоронение начнется не скоро (через десятки лет) и займет значительный промежуток времени. Это понятно — в настоящее время не решены даже на уровне концепции связанные с этим сложнейшие технические и финансовые вопросы. Таким образом, конструкция нового укрытия должна обеспечить безопасное для внешней среды и персонала хранение радиоактивных материалов в течение этих десятков лет (в техническом задании до 100 лет).

Естественно возникает вопрос о том, что произойдет с топливосодержащими материалами за это время, как изменятся их физико-химические свойства.

В 1997—2002 гг. в печати появилось несколько статей [19—21], в которых говорилось о возможности близкого по времени (3—4 года) и стремительного (недели) превращения всех 1200 т лавы под действием собственного α -излучения в субмикронную пыль с тяжелыми радиоэкологическими последствиями.

Отметим, что вопрос о том, правильна ли гипотеза о внезапном разрушении лавы под действием внутреннего облучения, важен не только для чернобыльской проблемы. Такое разрушение может стать одним из главных препятствий на пути работ по ликвидации последствий тяжелых аварий на АЭС, сопровождающихся образованием лавы. Поэтому в 2003—2005 гг. РНЦ «Курчатовский институт» и Институт проблем безопасности АЭС Национальной академии наук Украины выполнили независимые исследования по этой тематике. Совместные выводы говорят о том, что после создания нового защитного укрытия примерно в 2007 г. в течение 30—50 лет разрушение топливосодержащих материалов будет носить такой характер, при котором ни радиоактивная пыль, ни радиоактивная вода не смогут выйти за его пределы в опасном для окружающей среды и персонала количестве [22].

Приведем данные, которые позволили специалистам РНЦ «Курчатовский институт» прийти к выводам, что разрушение лавы, вызванное внешними и внутренними процессами, будет носить постепенный, а не внезапный характер с образованием макроскопических фрагментов и радиоактивной пыли с аэродинамическим медианным диаметром 2—5 мкм. Полученные результаты опирались на три источника информации. Прежде всего это были результаты прямых наблюдений и экспериментов по динамике поведения лавы в «Укрытии» за прошедшие годы. Разрушение скоплений лавы, например, так называемой «слоновой ноги», появление на ее поверхности растворимых солей урана, их перенос водяными потоками, образование топливной пыли наблюдались и действительно говорили о том, что за десятилетия, отделяющие сегодняшний день от момента извлечения топливосодержащих материалов, их геометрия, структура, даже тип могут измениться. При этом очевидной и главной причиной таких изменений является вода. Так, под воздействием влаги на поверхности лавы образуется слой вторичных продуктов эрозии, представляющих собой преимущественно комплексные соединения оксикарбонатов урана. Анализ свидетельствует о том, что подобные новообразования являются продуктами растворения силикатной матрицы. В то же время процессы растворения развиваются медленно. Экспериментальные оценки скорости разрушения водой поверхности лавы оказались равными $\sim 10^{-7}$ г/(см²·сут) [23, 24]. Это небольшая величина в сравнении с оценками полной массы лавы в «Укрытии» ~ 1200 т, и она не свидетельствует о развитии катастрофических процессов.

Вследствие того, что прямых экспериментов было выполнено немного, распространение их результатов на все скопления лавы, в том числе и недоступные для исследования было бы не совсем корректно. Поэтому следующим источником информации стал анализ косвенных параметров, которые могли бы указывать на нарастание негативных тенденций. Исследования сотен проб воды и воздуха, взятых внутри «Укрытия» и на его площадке за почти два десятилетия, показали, что не наблюдается каких-либо опасных тенденций в интегральных выбросах и сбросах из объекта. Для аэрозольного выброса, скорее, можно предполагать долговременную (с начала 1990-х годов) тенденцию к регулярному снижению радионуклидов, выходящих за пределы «Укрытия» [1], для содержания радионуклидов и урана в воде внутренних помещений — тенденцию к слабому повышению [1]. Вообще, вода, попадающая в помещения «Укрытия», а это, в основном, дождевая, от таяния снега и конденсирующаяся из воздуха влага, служит своеобразным индикатором состояния топливосодержащих материалов, в том числе и тех скоплений, которые недоступны прямому контролю. Омывая эти скопления и собираясь в нижних помеще-

ниях объекта, она несет с собой информацию о процессах их деструкции. Исследования показывают, что в помещениях реакторного отделения 4-го блока растворяется и выносится за его пределы менее 10 кг урана в год ($5,5 \cdot 10^{-5}$ часть оставшегося в «Укрытии») [1]. Наблюдения не указывают на развитие каких-либо быстро нарастающих процессов разрушения.

После сооружения нового безопасного укрытия ситуация должна существенно измениться [25]. Создание арки приведет к полному исключению попадания в «Укрытие» дождевой и талой воды и существенному уменьшению количества конденсированной влаги. Скорость разрушения лавы при этом сильно замедлится.

Наконец, третий источник информации — анализ динамики разрушения материалов, которые являются аналогами лавы. Здесь учитывалось то, что матрица лавообразных топливосодержащих материалов не представляет собой какого-нибудь уникального материала и близка по своим свойствам к обычным щелочным стеклам. Поэтому были проанализированы десятки работ, в которых изучали динамику поведения различных стекол с введенными в них радиоактивными добавками (долговременную стабильность остеклованных отходов). Из рассмотрения экспериментов по радиационным повреждениям стекол следовало, что поглощенная доза, при которой радиационные эффекты начинают заметно влиять на их характеристики, составляет для α -излучения $\sim 10^{18}$ распадов на 1 г стекла, β -, γ -излучения 10^8 — 10^9 рад. Внешне радиационные повреждения проявляются в распухании или уменьшении объема стекла на несколько процентов, аморфизации кристаллических фаз, появлении микротрещин и увеличении интенсивности растворения поверхности в несколько раз. В стеклообразной матрице лавы за 100 лет доза α -излучения составит не более $2 \cdot 10^{16}$ распадов на 1 г, для β -, γ -излучения $(2\text{—}5)10^7$ рад [25]. Таким образом, оценки показывают, что по прошествии даже 100 лет после аварии поглощенная доза в силикатной матрице лавы все еще будет по крайней мере на порядок меньше той, при которой наблюдаются первые признаки разрушения в стеклах. Поэтому никаких катастрофически быстро развивающихся процессов разрушения с образованием большого количества субмикронной пыли лаве не грозит. В то же время внутри помещений «Укрытия» будут продолжаться медленные постепенные разрушения топливосодержащих материалов, которые могут привести к изменению (ухудшению) радиационной обстановки.

Заключительные замечания. В настоящее время (конец 2005 г.) работы по преобразованию «Укрытия» продвигаются успешно. Уже осуществлены два из восьми запланированных крупных мероприятий по стабилизации строительных конструкций объекта. Завершается конкурс на проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию нового безопасного укрытия. Какие первоочередные шаги следует, по нашему мнению, осуществить в отношении ядерного топлива, оставшегося в помещениях «Укрытия»? Хотя и через десятилетия, но его предстоит извлекать из объекта, и эта задача по своей технической сложности, радиационным и финансовым затратам не уступает предыдущим работам. Поэтому надо стремиться максимально облегчить ее уже сейчас. Перед началом извлечения топлива и радиоактивных материалов необходимо точно знать геометрические и физико-химические свойства их скоплений. Как уже говорилось, эти свойства могут претерпеть существенные изменения в течение длительного срока ожидания. Поэтому предлагается приступить к созданию системы мониторинга топливосодержащих материа-

лов в объекте «Укрытие». Постоянный мониторинг, отслеживающий изменения их состояния, позволит принять правильные решения по извлечению и избавит от необходимости заново повторять разведку и исследования, которые уже были выполнены в 1986—2005 гг. Есть и второй, как нам кажется, важный аспект этой проблемы. Можно назвать его социальным. После того как «Укрытие» будет закрыто новым безопасным, начнутся десятилетия подготовки к полному извлечению топлива. Все это время необходимо будет постоянно знать и периодически сообщать информацию о состоянии топлива в «Укрытии» как государственным контролирующим органам, так и общественности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отчет МНТЦ «Укрытие» № 3836. Чернобыль, 2001. 337 с.
2. Бегичев С.Н., Боровой А.А., Бурлаков Е.В. и др. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС: Препринт ИАЭ № 5268/3, 1990. 21 с.
3. Боровой А.А., Довбенко А.А., Смолянкина М.В., Строганов А.А. Определение ядерно-физических характеристик топлива 4-го энергоблока ЧАЭС. Отчет ИБРАЭ АН СССР № 52/11-20, 1991. 18 с.
4. Devel I., Guntay S., Powers D.A. The Chernobyl Reactor Accident Source Term. OCDE/GD (96) 12, Paris, 1996. 29 p.
5. Кашпаров В.А. Поведение ^{90}Sr в ближней зоне аварии на ЧАЭС. — В сб.: Проблемы ведения АПП на радиоактивно загрязненных с/х землях в отдаленный после чернобыльской катастрофы период. М., 1999, с. 19—23.
6. Боровой А.А., Гагаринский А.Ю. Выброс радионуклидов из разрушенного блока Чернобыльской АЭС. — Атомная энергия, 2001, т. 90, вып. 2, с. 137—145.
7. Borovoj A.A. Analytical Report (Post-Accident Management of Destroyed Fuel from Chernobyl). Vienna: IAEA, 1990. 100 p.
8. Беляев С.Т., Боровой А.А., Волков В.Г. и др. Техническое обоснование ядерной безопасности объекта «Укрытие». Чернобыль, 1990. 160 с.
9. Богатов С.А., Боровой А.А., Высоцкий Е.Д. и др. Работы по обеспечению безопасности объекта «Укрытие» (1996—2001 гг.): Препринт ИАЭ № 6226/11, 2001. 23 с.
10. Израэль Ю.А. Радиационное загрязнение природных сред после чернобыльской аварии. Основные этапы исследований. Тезисы докл. конф. «Радиоэкологические, медицинские и социально-экономические последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Реабилитация территорий и населения». Москва, 1995, с. 15—17.
11. Borovoj A.A. e.a. The Shelter Current Safety Analysis and Situation Development Forecasts (Update Version). TACIS, European Commission, 1998. 103 p.
12. Беляев С.Т., Боровой А.А. О преобразовании объекта «Укрытие». Отчет ИАЭ № 57-05/110, 1989. 8 с.
13. The EC-TACIS Nuclear Safety Program and the US-DoE-INSP-Program: Chernobyl Unit 4 — Shelter Implementation Plan, 1997. 232 p.
14. Концепция и программа проведения работ на объекте «Укрытие». РНИЦ «Курчатовский институт» (1995—2000 гг.), 1995. 11 с.
15. Получение экспериментальных данных для определения современного состояния пылевых загрязнений и проведение количественных оценок последствий радиационной аварии на «Укрытии». Отчет МНТЦ «Укрытие». Чернобыль, 1997. 52 с.
16. Borovoj A.A., Lagunenkov A.S., Pazukhin E.M. Radiochemical and selected physicochemical characteristics of lava and concrete samples from subreactor room no.304/3 of the fourth unit of ChNPP find their connection with the accident scenario. — Radiochemistry, 1999, v. 41, № 2, p. 187—192.
17. Боровой А.А., Лагуненко А.С., Пазухин Э.М. Новые оценки количества ядерного топлива, находящегося на нижних отметках объекта «Укрытие». — В сб.: Проблемы Чернобыля, 2000, вып. 6, с. 13—16.

18. **Borovoј A., Gavrilov S.** Development of the Database «Nuclear Fuel and Radioactive Waste in the Shelter of Chernobyl NPP»: Preprint IBRAE-2001-01. 28 p.
19. **Барьяхтар В.Г., Гончар В.В., Жидков А.В., Ключников А.А.** Радиационные повреждения в лавообразных топливосодержащих материалах объекта «Укрытие»: Препринт МНТЦ «Укрытие» № 98-12, 1998. 23 с.
20. **Жидков А.В.** Топливосодержащие материалы объекта «Укрытие» сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния». — В сб.: Проблемы Чернобыля, 2001, вып. 7, с. 23—40.
21. **Baryakhtar V., Gonchar V., Zhidkov A., Zhidkov V.** Radiation damages and self-sputtering of high radioactive dielectrics: spontaneous emission of submicron dust particles. — Condensed Matter Phys., 2002, v. 5, № 3(31), p. 449—471.
22. **Development** of Estimated-Analytical FCM Behaviour Forecast Model. Common Conclusions. SIP FCMP 03 0 BAM 01 01, 2004. 9 p.
23. **Богатов С.А., Боровой А.А., Киселев А.Н. и др.** Оценка скорости эрозии топливосодержащих масс внутри «Саркофага» и характеристики образующихся частиц: Препринт ИАЭ № 5434/3, 1991. 21 с.
24. **Богатов С.А., Боровой А.А., Евстратенко А.С., Херувимов А.Н.** Динамика поведения топливных масс в объекте «Укрытие»: Препринт МНТЦ «Укрытие» № 92-29. Чернобыль, 1992. 19 с.
25. **Разработка** расчетно-аналитической прогнозной модели поведения TCM. SIP FCMP 03 2 EAM 01, 2004. 72 с.

Поступила в Редакцию 8.12.05

УДК 614.876

РАДИОЭКОЛОГИЯ И АВАРИЯ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Алексахин Р.М., Санжарова Н.И. (ВНИИСХРАЭ), Фесенко С.В. (МАГАТЭ)

В комплексе проблем, возникших в связи с аварией на Чернобыльской АЭС в 1986 г., — технологических, медицинских, экономических, социальных и других важное место заняли экологические, потому что именно загрязнение природной среды явилось во многом определяющим при преодолении ее последствий [1, 2]. Одновременно авария высветила значение экологических аспектов, так как доказательство отсутствия негативного влияния на здоровье человека и окружающую среду и ее устойчивого существования и развития рассматривается как обязательное условие достижения прогресса при производстве энергии на основе ядерных реакций.

При анализе последствий аварии следует иметь в виду не только непосредственное действие ионизирующего излучения на растения и животных и их популяции и экосистемы в целом, радиоактивное загрязнение природных и хозяйственных объектов (в первую очередь продукции сельского, лесного и водного хозяйства), ограничившее или даже исключившее их использование человеком, но и многие смежные вопросы, касающиеся непосредственно экологического воздействия аварии. Прежде всего нужно принять во внимание озабоченность населения и общественности опасностью радиоактивного загрязнения окружающей среды вне контекста накопленных данных о последствиях радиационных аварий, а во многих случаях даже в противовес этой научной информации в связи с недоверием к ученым. Некоторые медицинские последствия, несомненно относящиеся к числу основных в этой аварии, фактически должны соотноситься с влиянием экологических факторов. Так, заболевание раком щитовидной железы, в первую очередь детей, — одно