

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров О.Е. Применение метода усреднения по радиусу для описания диффузии в газовой центрифуге при неоднородном потоке циркуляции. — Атомная энергия, 1999, т. 86, вып. 3, с. 210—215.
2. Александров О.Е. Идеальная центрифуга. — Там же, 1999, т. 87, вып. 3, с. 213—219.
3. Александров О.Е. Идеальная центрифуга. — Журн. техн. физики, 2000, № 9, с. 24—29.
4. Токманцев В.И. Уточненное уравнение для анализа разделения бинарной смеси изотопов в газовой центрифуге методом усреднения по радиусу. — Атомная энергия, 2002, т. 92, вып. 5, с. 360—366.
5. Токманцев В.И. Ограничения модели центробежного разделения бинарной смеси изотопов, основанной на приближенном разложении Гельмгольца. — Там же, 2003, т. 94, вып. 5, с. 383—391.
6. Cohen K. The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-Scale Production of ^{235}U . McGraw-Hill Book, 1951.
7. Александров О.Е. Сравнение двух подходов анализа разделения в газовой центрифуге методом усреднения по радиусу. — Атомная энергия, 2003, т. 94, вып. 4, с. 146—252.
8. Обогащение урана. Под ред. С. Виллани. М.: Энергоатомиздат, 1983. 318 с.
9. Александров О.Е. Разделительная способность газовой центрифуги и некоторые ошибки ее оптимизации. — Атомная энергия, 2002, т. 92, вып. 3, с. 212—221.

Поступила в Редакцию 5.01.04

УДК 621.039.7

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ВЫБРОСАМИ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ИЗ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

*Огородников Б.И., Будыка А.К. (ГНЦ РФ — НИФХИ им. Л.Я. Карпова),
Павлюченко Н.И. (МНТЦ «Укрытие» НАН Украины)*

Определение количества и состава радиоактивных веществ, выбрасываемых из объекта «Укрытие» в приземный слой атмосферы, является составной частью мониторинга радиационной обстановки внутренних помещений и способствует решению задач по минимизации вредного воздействия разрушенного 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС на окружающую среду. Путей выброса два: через вентиляционную трубу ВТ-2 и неплотности (щели, проемы) внешних конструкций. Рассмотрим эти пути.

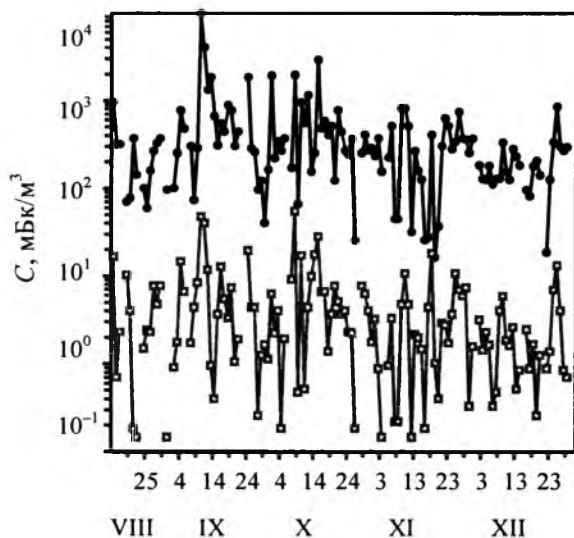
Выбросы через вентиляционную трубу. При проектировании и возведении саркофага в 1986 г. предполагалось, что конвективные потоки, возникающие вследствие остывания ядерного топлива и продуктов его деления, а также аварийные ситуации, сопровождающиеся выделением газоаэрозольных компонентов, удастся регулировать средствами приточной и вытяжной вентиляции. В этих целях была восстановлена и частично модернизирована приточная вентиляционная система второй очереди АЭС. Принципиальные изменения были внесены в систему вытяжной вентиляции [1—3]. Воздух, поступающий из разрушенного центрального зала, можно либо очищать на фильтрационной станции, расположенной в блоке В второй очереди АЭС, и затем направлять в ВТ-2, либо, если его активность невелика, сразу сбрасывать в ВТ-2 по байпасному каналу. В последнем активность аэрозолей контролируют с помощью непрерывно действующей системы РКС-2-02 «Калина» и суточными пробоотборами на фильтры АФА-РМП-20. Все годы эксплуа-

тации объекта «Укрытие» приточная вентиляция и фильтрационная станция остаются законсервированными, поскольку концентрации аэрозолей, проходящих через байпас, не превышают контрольных уровней [4].

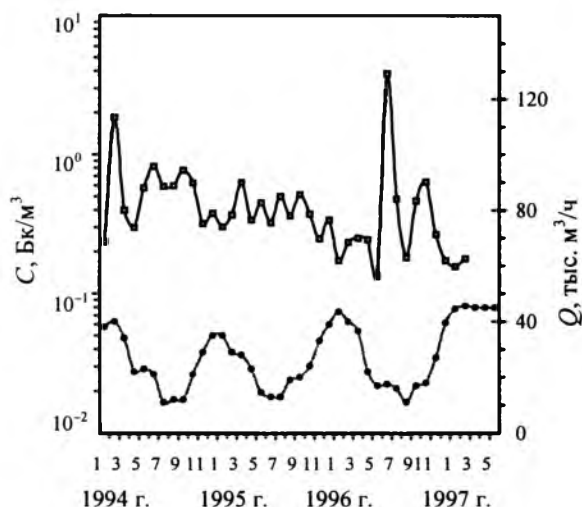
Многолетние наблюдения за радиоактивными аэрозолями, проходящими через байпас, показывают, что их концентрация сильно варьирует. Как видно на рис. 1, за рассматриваемый период минимальная концентрация β -излучающих нуклидов отличалась от максимальной в 1000 раз. Однако чаще всего концентрация составляла 0,2—0,5 Бк/м³. Спустя 5 лет в ноябре—декабре 2000 г. средняя концентрация аэрозолей β -излучающих нуклидов изменилась незначительно [4], однако максимальная не превышала 1 Бк/м³ в отличие от 10 Бк/м³ в сентябре 1995 г. Концентрация аэрозолей α -излучающих нуклидов примерно в 100 раз ниже β -излучающих.

Непостоянство объемной активности аэрозолей в байпасе определяется многими причинами, в первую очередь, характером и интенсивностью работ в помещениях, а также содержанием радиоактивных веществ на рабочих местах. Немаловажное значение имеет воздухопоток внутри помещений, в коридорах, на лестничных маршах и др. В свою очередь он зависит от метеоусловий во внешней среде, в частности, скорости и направления ветра.

Долговременные наблюдения, выполненные специалистами цеха радиационной безопасности объекта «Укрытие», позволили выявить сезонность расхода воздуха через байпас (рис. 2). В 1994—1997 гг. максимальные среднemesячные значения 40—45 тыс. м³/ч соответствовали зимним месяцам, минимальные 11—13 тыс. м³/ч — летним. К сожалению, в феврале 1997 г. измерительное устройство вышло из строя, и дальнейшее определение количества воздуха стали проводить не чаще одного раза в месяц на срезе байпаса в помещении 4004/1 с помощью переносного анемометра. Как видно из рис. 2, сезонные изменения расхода воздуха не отражались на среднemesячной концентрации радиоактивных аэрозолей. От-



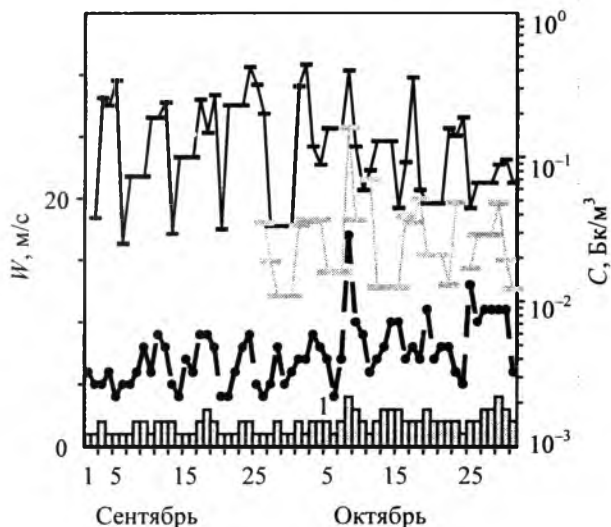
Р и с. 1. Концентрация аэрозолей α - ($\square$) и β -излучающих нуклидов ($\bullet$) в байпасе объекта «Укрытие» в августе—декабре 1995 г.



Р и с. 2. Концентрация аэрозолей β -излучающих нуклидов ($\bullet$) и расход воздуха ($\square$) в байпасе объекта «Укрытие» в 1994—1997 гг.

дельное резкое повышение концентрации (февраль 1994 г., июль 1996 г.), вероятно, было связано с работами в объекте «Укрытие», приводившими к интенсивному образованию и выносу аэрозолей. В целом же на протяжении 1994—1997 гг. концентрация аэрозолей β -излучающих нуклидов систематически снижалась с 0,7—0,8 до 0,2—0,3 Бк/м³.

Поскольку «Укрытие» не является герметичным сооружением, а выбросы воздуха через ВТ-2 происходят за счет естественной тяги, то скорость и направление ветра должны влиять на внутренние воздушные потоки, концентрацию и суммарный выброс аэрозолей. Один из наиболее высоких уровней 0,4 Бк/м³ наблюдался 8 октября 2002 г. (рис. 3). Еще некоторые значительные выбросы совпали с высо-



Р и с. 3. Концентрация аэрозолей β -излучающих нуклидов (—) и ^{137}Cs (---) в байпасе объекта «Укрытие», среднесуточная скорость (гистограмма) и максимальный порыв ветра (●) в сентябре—октябре 2002 г.

Его порывы стали достигать 17 м/с. В полдень была зарегистрирована максимальная средняя скорость ветра 12 м/с.

Естественно, скорость ветра является не единственным фактором, который определяет концентрацию радиоактивных аэрозолей, выносимых в атмосферу через байпас. Высокая объемная активность 0,25—0,45 Бк/м³ была зарегистрирована также 3, 5, 25 сентября, 1, 2 и 17 октября, когда ветер был умеренный. Вероятно, в эти дни повышенное содержание радиоактивных аэрозолей в вентиляционном потоке было обусловлено другими причинами, например, работами, проводимыми внутри объекта «Укрытие».

Примером влияния ветра на концентрацию радиоактивных аэрозолей в байпасе стали наблюдения, выполненные в конце ноября — начале декабря 2002 г. (рис. 4). Сведения о скорости ветра, как и в предыдущем случае, были получены с метеостанции «Чернобыль». Результаты радиометрии проб аэрозолей поступили из лаборатории радиозэкологического мониторинга.

Из рис. 4 следует, что почти синхронно со скоростью ветра изменялась концентрация радиоактивных аэрозолей в байпасе. К сожалению, точно зафиксировать начало роста концентрации не удалось, поскольку из-за выходных дней (с пятницы

ккой скоростью ветра, например, 11, 12, 17—19, 23 и 24 сентября. В эти дни среднесуточная скорость ветра была не менее 2 м/с, порывы превышали 8 м/с. При этом объемная активность достигала 0,2—0,3 Бк/м³. Всплеск концентрации аэрозолей 8 октября заслуживает особого внимания из-за сложной метеоситуации. Накануне на АЭС поступило штормовое предупреждение. В ночь с 7 на 8 октября с 21 ч до 7 ч 15 мин выпало 15,8 мм осадков, что значительно уменьшило ветровой подъем пыли с промплощадки. Это имело существенное значение, поскольку с 5 ч 25 мин началось усиление ветра.

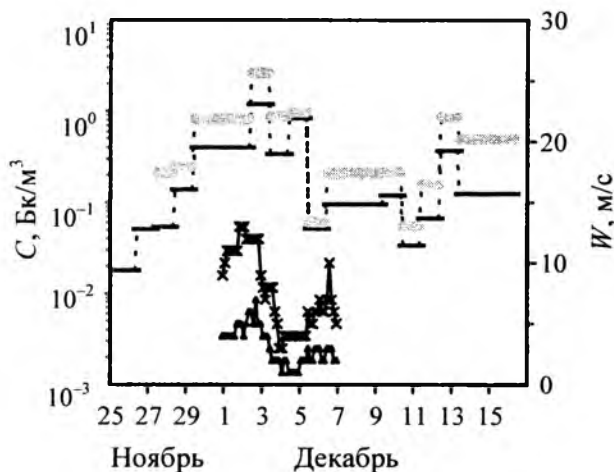
29 ноября до понедельника 2 декабря) фильтр экспонировали 3 сут. Судя по гистограмме скорости ветра, максимальная концентрация аэрозолей могла наблюдаться 1 декабря. Однако даже та, которая была зафиксирована при последующей суточной экспозиции фильтра 2, 3 декабря, в 5—8 раз превосходила максимальную активность аэрозолей β -излучающих нуклидов, зафиксированную в байпасе в сентябре—октябре 2002 г. (см. рис. 3).

Можно предположить, что различия в концентрации аэрозолей, зарегистрированных 2, 3 декабря и, например, 8 октября, когда порывы ветра достигали 17 м/с, связаны с длительностью воздействия сильного ветра за период экспозиции фильтра. Поскольку его экспонируют 1 сут или более, то при короткой ветровой нагрузке повышенный вынос аэрозолей может нивелироваться средней концентрацией, характерной для низкой и умеренной скорости ветра. В рассматриваемом примере порывы ветра более 10 м/с продолжались 1, 2 декабря в течение 48 ч, 8 октября — лишь около 20 ч.

Выбросы через неплотности внешних конструкций. Выброс аэрозолей через неплотности внешних строительных конструкций часто относят к неорганизованным. Этим путем воздух выходит в приземный слой атмосферы через многочисленные проемы и щели, оставшиеся при возведении саркофага или возникшие позднее для обеспечения функционирования его различных помещений и систем, в частности, пожаротушения, пылеподавления, контроля нейтронных потоков и др.

Оценка утечек через неплотности долгие годы остается дискуссионной. Во-первых, щелей много, и расположены они в разных местах. Во-вторых, трудно оптимально разместить аэрозольный пробоотборник в различных по форме щелях, обеспечить работу воздуходувки, проконтролировать направление и скорость воздушных потоков. В-третьих, обслуживание пробоотборных устройств связано с большими трудо- и дозозатратами. Исходя из этого, для получения оценки выноса радиоактивных веществ из щелей объекта «Укрытие» было решено использовать простые и дешевые планшеты из марли. Этот метод назвали пассивным [5, 6]. Он является лишь «сторожем» квазистационарности миграции радиоактивных аэрозолей.

Для выбора мест размещения планшетов в 1989 и 1992—1993 гг. были обследованы щели. Воздушные потоки на крыше объекта «Укрытие» измеряли с помощью переносного анемометра АП-1 в люках и щелях над центральным залом. В некоторых точках скорость потоков менялась в 2—3 раза в зависимости от порыва ветра. Принимая во внимание комплекс факторов, для получения оценки выноса радиоактивных аэрозолей из щелей «Укрытия» было решено установить планшеты



Р и с. 4. Концентрация аэрозолей β -излучающих нуклидов (—) и ^{137}Cs (—) в байпасе объекта «Укрытие», среднесуточная скорость (▲) и максимальный порыв ветра (X) в ноябре—декабре 2002 г.

над четырьмя технологическими люками. Над ними были размещены стойки, каждая из которых укомплектована двумя вертикальными планшетами, расположенными под прямым углом один к другому, и двумя горизонтальными. Последние разделены железным листом. Поэтому нижний планшет, находящийся в 0,2—0,3 м от среза люка, собирает преимущественно аэрозоли, поступающие из объекта «Укрытие». Для удерживания аэрозолей марлю в первые годы пропитывали специальным составом на основе виниловых сополимеров с аккумулялирующими добавками, позже нефтепродуктами (литолом-24 и автомобильным маслом). Естественно, что такая система может лишь качественно характеризовать выброс радиоактивных аэрозолей из люков кровли. Планшеты не могут дать сведений об объемах прошедшего воздуха и концентрации аэрозолей. Поэтому распространять полученные данные на другие щели и неплотности можно лишь с большими оговорками.

В 1996—2000 гг. были изучены параметры воздушных потоков в проемах стен объекта «Укрытие», определены объемная активность, радионуклидный и дисперсный состав аэрозолей [7]. На северной стороне были выбраны три проема в местах примыкания каскадных стен к блоку В, а также к контрфорсной стене. Горизонтальный проем № 1 площадью $10,4 \text{ м}^2$ ($\sim 2,5 \times 4 \text{ м}$) расположен в месте примыкания строительного бетонного каскада № 4 к блокам В и 4, вертикальный № 2 площадью $6,6 \text{ м}^2$ ($1,2 \times 5,5 \text{ м}$) — в месте примыкания каскада № 3 к блоку В, вертикальный № 3 площадью $2,25 \text{ м}^2$ ($0,35 \times 6 \text{ м}$) — в месте примыкания каскада № 4 к контрфорсной стене. Для отбора аэрозолей использовали аспиратор производительностью $70 \text{ м}^3/\text{ч}$, массой 10 кг, в котором размещали фильтр ФПП-15-1,5 размером $0,2 \times 0,25 \text{ м}$. Аспиратор располагали на легкой раме, закрепленной в центре проема. Воздух непрерывно прокачивали 1—6 сут. Направление и скорость воздуха в проеме определяли с помощью анемометра чувствительностью $0,05 \text{ м/с}$ в диапазоне скорости $0,05—30 \text{ м/с}$. Измерения выполняли, как правило, один раз в сутки около 9—11 ч дня. Среднюю скорость потока рассчитывали по 6—12 измерениям в разных точках проема, условно разбитого на прямоугольники.

Из данных, полученных в 1997 г., была выявлена связь между концентрацией ^{137}Cs и направлением воздушного потока в проемах [7]. Так, 10—12 и 16 июля в проеме № 1 воздух со скоростью 1—3 м/с поступал внутрь, концентрация ^{137}Cs в пробе, отобранной 11—16 июля, была низкая — около $0,08 \text{ Бк/м}^3$. Спустя 10 сут 23 и 24 июля в проеме № 3 воздух со скоростью около 1 м/с вновь поступал внутрь, и концентрация ^{137}Cs в пробе, отобранной 22—25 июля, оказалась еще меньше — $0,044 \text{ Бк/м}^3$. Повторные наблюдения, проведенные 9—30 октября в проеме № 1, подтвердили связь концентрации радиоактивных аэрозолей с направлением воздушных потоков. На этот раз в девяти из 11 измерений воздух со скоростью $0,4—3,3 \text{ м/с}$ поступал из объекта «Укрытие», и как следствие во всех шести отобранных пробах концентрация ^{137}Cs превышала $0,3 \text{ Бк/м}^3$, в одной достигла $5,2 \text{ Бк/м}^3$, что оказалось максимальной для данной серии исследований.

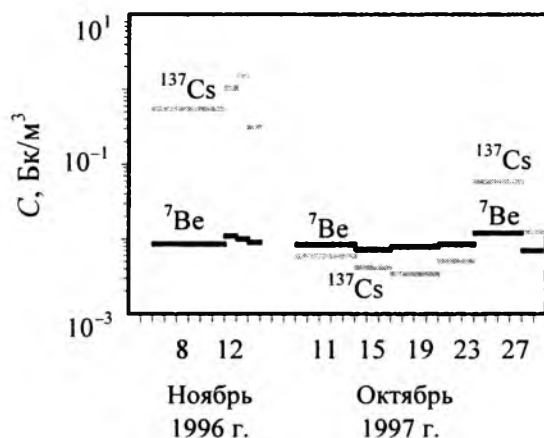
Помимо прямых измерений концентрации аэрозолей в проемах, которые подтвердили вынос радиоактивных веществ через неплотности внешних строительных конструкций, удалось сопоставить аэрозольную обстановку при наличии проема № 2 и после его ликвидации. Результаты четырех пробоотборов в открытом проеме № 2, выполненных в ноябре 1996 г., показали, что концентрация ^{137}Cs составляла

0,3—1,5 Бк/м³ (рис. 5). Последующие шесть пробоотборов были выполнены в том же месте в октябре 1997 г., когда проем был ликвидирован. Результаты анализов показали, что в пяти пробах концентрация ¹³⁷Cs не превышала 0,01 Бк/м³. Следовательно, она соответствовала регистрируемой на промплощадке [8]. Лишь в одной пробе концентрация ¹³⁷Cs достигала 0,06 Бк/м³. Таким образом, ликвидация отверстия привела к прекращению истечения аэрозолей через проем № 2 и существенному снижению содержания радиоактивных аэрозолей в его районе на внешней стороне объекта «Укрытие».

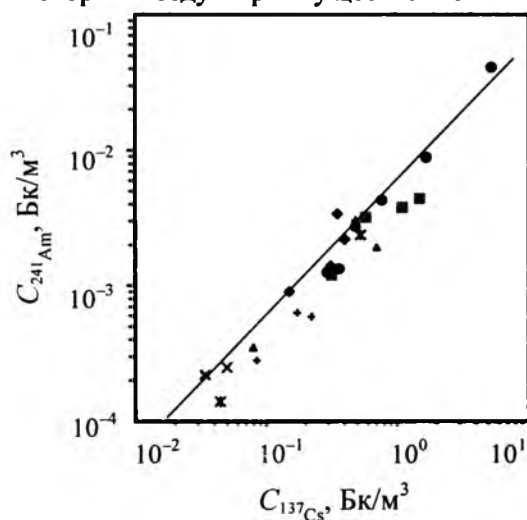
Подтверждением того, что колебания концентрации ¹³⁷Cs были обусловлены поступлением воздуха из помещений в проемы или его засасыванием из внешней среды, является динамика концентрации аэрозолей космогенного ⁷Be. Как видно из рис. 5, его содержание в пробах стабильно находилось на уровне 7—11 мБк/м³. Это показывает, что в периоды исследований не происходило вторжения стратосферных масс воздуха, в которых содержание ¹³⁷Cs намного меньше, чем в воздухе на промплощадке, тем более внутри «Укрытия».

По результатам γ-спектрометрии проб, отобранных в проемах в 1996—1999 гг., было рассчитано отношение активности ¹³⁷Cs и ²⁴¹Am. Для построения графика на рис. 6 использованы данные 24 проб, при которых воздух преимущественно вытекал из неплотностей. Как видно, наблюдается хорошая корреляция между концентрацией двух радионуклидов. Прямая проведена для среднеарифметического отношения ¹³⁷Cs/²⁴¹Am, равного 228. Для сравнения укажем, что на промплощадке это отношение было существенно ниже и в 2000 г. находилось в диапазоне 50—70 [8], что близко к рассчитанному для ядерного топлива выгоранием около 11 МВт-сут/кг урана [9]. Таким образом, аэрозоли в выбросах обогащены ¹³⁷Cs и тем самым отличались от аэрозолей на промплощадке.

Исследования неорганизованных выбросов продолжили в 2002 г. сотрудники ОЯРБ МНТЦ «Укрытие». Пробы отбирали через два люка из межкровельного пространства для определения концентрации и дисперсного состава



Р и с. 5. Концентрация аэрозолей ⁷Be и ¹³⁷Cs в проеме № 2 северной стены объекта «Укрытие» в ноябре 1996 г. и после его ликвидации в октябре 1997 г.



Р и с. 6. Соотношение концентрации аэрозолей ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs при исследовании потоков воздуха в проемах объекта «Укрытие» в 1996—1999 гг.: ♦, ■ — проем № 1, 2, ноябрь 1996 г.; ▲, ×, * — проем № 1, 2, 3, июль 1997 г.; ● — проем № 1, октябрь 1997 г.; + — проем № 4, ноябрь 1999 г.

радиоактивных аэрозолей. Автономные воздуходувки «Тайфун» размещали на легкой кровле, фильтродержатель с трехслойным пакетом опускали на 50—80 см в люк. Это соответствовало примерно трети расстояния между трубным накатом (основным перекрытием разрушенного 4-го энергоблока) и легкой кровлей, которая защищает объект «Укрытие» от осадков и по которой проложены противопожарные и технологические магистрали. Пробы отбирали около 1 ч, прокачивая 6—7 м³ воздуха.

Как следует из табл. 1, концентрация ¹³⁷Cs при параллельных пробоотборах была почти одинаковой, хотя люки находились на расстоянии около 20 м. Однако в разные дни она была столь же непостоянной, как и в проемах северной стены. Диапазон концентрации составлял 0,13—2,3 Бк/м³, что совпадало с данными [7].

Таблица 1. Концентрация, активностный медианный аэродинамический диаметр и стандартное геометрическое отклонение аэрозолей-носителей ¹³⁷Cs в межкровельном пространстве объекта «Укрытие» в 2002 г.

Дата	Люк А (восточная часть кровли)			Люк № 32 (центр кровли)		
	С, Бк/м ³	Д, мкм	σ	С, Бк/м ³	Д, мкм	σ
31 января	2,3	—	—	—	—	—
15 апреля	0,67	0,94	2,8	1	0,74	1,5
11 июня	0,13	—	—	0,13	—	—
8 октября	1,58	1,06	1,7	1,26	1,24	1,6
10 декабря	0,91	—	—	2,16	~1,8	~2,5

В пробе от 31 января помимо ¹³⁷Cs, концентрация которого 2,3 Бк/м³ оказалась максимальной в этой серии исследований, были идентифицированы ¹³⁴Cs, ¹⁵⁴Eu и ²⁴¹Am. Около 97% в суммарное γ-излучение вносил ¹³⁷Cs. Отношение активности ¹³⁷Cs/²⁴¹Am составляло 56. Из этого можно заключить, что при отборе пробы основное загрязнение воздуха в межкровельном пространстве было обусловлено топливными аэрозольными частицами.

Отбор проб из межкровельного пространства 8 октября начался в 10 ч 5 мин и продолжался 1 ч. Он совпал с наибольшей ветровой нагрузкой. Концентрация ¹³⁷Cs в обоих люках оказалась равной ~1,5 Бк/м³. Все пробы из люков, кроме первой (31 января), были отобраны на трехслойные пакеты фильтров, что позволило определить не только концентрацию и радионуклидный состав, но и дисперсность аэрозолей. Пакет состоял из следующих слоев: ФПА-70-0,105, ФПА-70-0,16 и АФА-РМП-20. Скорость воздуха составляла 0,83 м/с. Метод расчета дисперсного состава аэрозолей представлен в работе [10]. В пробе от 11 июня низкая концентрация радиоактивных веществ не позволила определить дисперсность аэрозолей.

В межкровельном пространстве аэрозоли-носители ¹³⁷Cs принадлежали микронному классу. Активностный медианный аэродинамический диаметр составлял 0,7—1,8 мкм. Во многих случаях близкие результаты были получены в 1996—1997 гг. при исследовании аэрозолей в проемах северной стены [7] и в 2000 г. при исследовании аэрозолей в помещении 207/5 [11].

Обсуждение результатов. Хотя с начала эксплуатации объекта «Укрытие» (30 ноября 1986 г.) прошло уже немало лет, появляются новые обстоятельства, характеризующие состояние этого уникального сооружения. К ним относится сезонность расхода воздуха, поступающего из развала центрального зала через байпас в вентиляционную трубу ВТ-2. Четырехлетние наблюдения показали, что максимальная естественная тяга 45—47 тыс. м³/ч приходится на зимние месяцы, минимальная 7—11 тыс. м³/ч — на летние. Вероятно, это связано с тепловой инерционностью внутренних сооружений, в которых средняя летняя температура примерно на 5 °С ниже, зимняя на столько же градусов выше, чем в атмосфере. Казалось бы, различие в расходе воздуха должно отражаться на концентрации радиоактивных аэрозолей, поступающих через байпас в ВТ-2. Однако, судя по данным рис. 2, этого не происходит.

Обнаружено, что высокая скорость ветра во внешней среде вызывает увеличение концентрации аэрозолей в байпасе. Пороговая скорость, превышение которой отражается на росте концентрации радиоактивных веществ, составляет, очевидно, 4—5 м/с. Можно предположить, что, как и при ветровом подъеме пылевых частиц во внешней среде, важное значение имеет скорость и частота порывов ветра. Эти пульсации через неплотности строительных конструкций достигают помещений и способствуют сдуву частиц с подстилающих поверхностей. В первую очередь это отражается на радиационной обстановке в помещениях, имеющих неплотности, и смежных с ними, в частности, в разрушенном центральном зале.

Обнаруженная связь скорости ветра и выноса аэрозолей из объекта «Укрытие» представляет значительный интерес как с точки зрения воздухообмена во внутренних помещениях, так и воздействия выносимых радиоактивных веществ на окружающую среду. Необходимо дальнейшее накопление статистического материала о связи выноса с направлением, скоростью, продолжительностью воздействия высокой скорости ветра, а также с атмосферным давлением, относительной влажностью воздуха в приземном слое атмосферы и внутри объекта «Укрытие».

Измерения, проведенные в 1996—1997 гг. в проемах северной стены [7] и в 2002 г. в межкровельном пространстве (см. табл. 1), показали, что в воздухе, выходящем через неплотности во внешнюю среду, концентрация аэрозолей-носителей ¹³⁷Cs находится обычно в диапазоне 0,7—5 Бк/м³. Поскольку проемы и межкровельное пространство сообщаются с развалом центрального зала, то в нем должны регистрироваться близкие значения. Однако, судя по данным на рис. 3, 4, концентрация в байпасе, который широким коротким воздуховодом (длиной не более 10 м) связан с центральным залом, в 10—100 раз ниже. Причины расхождений пока не ясны. Возможно, одна из них, как было указано специалистами НИТИ им. А.П. Александрова, связана с погрешностью отбора аэрозолей из байпаса с помощью тонких и длинных трубок, имеющих несколько изгибов под прямым углом [4].

Важной характеристикой для оценки радиационной обстановки в центральном зале и распространения выбросов радиоактивных веществ в окружающей среде является дисперсность аэрозолей. Сведения о размере частиц необходимы, в частности, для понимания того, что и в каком количестве могут улавливать марлевые планшеты, экспонируемые на легкой кровле над технологическими люками и используемые для расчета неорганизованных выбросов. К сожалению, за период экс-

плуатации объекта «Укрытие» дисперсный состав аэрозолей, выходящих через кровлю, не измеряли. Пять проб, отобранных в апреле—декабре 2002 г. с помощью пакетов трехслойных фильтров, позволили впервые определить, что носителями ^{137}Cs были частицы микронного размера. Активностный медианный аэродинамический диаметр составил 0,7—1,8 мкм. Это коррелировало с наблюдениями с помощью импакторов в 1996—1997 гг. в проемах северной стены [7]. Из полученных результатов следует, что такие аэрозоли, выходя из проемов на высоте 50—60 м, уносятся ветром на большое расстояние, поскольку имеют малую скорость гравитационного осаждения. Их выпадение на промплощадке будет незначительным. В полной мере это относится и к аэрозолям, выбрасываемым через ВТ-2 на высоте 150 м, если они имеют такие или меньшие размеры. К сожалению, дисперсный состав аэрозолей в байпасе и ВТ-2 также никогда не определяли.

Измерение дисперсного состава аэрозолей в межкровельном пространстве показало, что существующая система контроля неорганизованных выбросов содержит методические неопределенности. Главная заключается в том, что неизвестно, какая доля аэрозолей, выходящих из люка, задерживается нижним горизонтальным планшетом. В работе [5] предполагается, что на нем оседают все аэрозоли. Однако фильтрующие характеристики марли далеки от столь высокой оценки. Марля выполнена из нитей диаметром 0,2—0,3 мм, образующих ячейки площадью около 2 мм². Таким образом, сквозные отверстия составляют около 80% площади марли. В такой структуре в соответствии с теорией фильтрации аэрозолей волокнистыми материалами при скорости потока свыше нескольких см/с основными механизмами осаждения частиц будут инерционный и касания [12]. Диффузионный и электростатический механизмы проявятся незначительно. Полностью будет отсутствовать гравитационный механизм осаждения аэрозолей, поскольку в рассматриваемой системе воздух поступает на планшет снизу. Пропитка марли нефтепродуктами способствует лишь удержанию частиц, коснувшихся нитей, но не изменяет механизмов их движения в ячейках.

Фильтрующая способность марли при контроле неорганизованных выбросов была оценена с помощью аэрозолей природных радионуклидов, всегда присутствующих в атмосферном воздухе. Для этого были рассмотрены γ -спектры нескольких проб, которые были отобраны почти одновременно в декабре 2002 г. — январе 2003 г. фильтровальной установкой, работавшей на промплощадке, и на планшеты, экспонированные над люком № 10 на легкой кровле. На планшетах (вертикальном и горизонтальном нижнем) отсутствовали фотопики с энергией γ -квантов 46 и 487 кэВ, принадлежащие ^{210}Pb и ^7Be . Однако в материале ФПП-15-1,5 они имелись. Отсутствие этих радионуклидов на планшете объясняется тем, что их носителями являются субмикронные аэрозоли, эффективность улавливания которых марлей крайне низка.

Из многочисленных исследований, проведенных в 1988—2002 гг. в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС [13, 14], известно, что активностный медианный аэродинамический диаметр частиц-носителей ^7Be и ^{210}Pb равен 0,3—0,6 мкм. Марлевый планшет, как и следует из теории фильтрации, пропускал частицы такого размера. Наличие в обоих γ -спектрах (особенно марлевого планшета) фотопиков ^{60}Co , $^{134, 137}\text{Cs}$, ^{154}Eu и ^{241}Am — продуктов аварии на Чернобыльской АЭС показывает, что носителями этих радионуклидов были более крупные частицы, чем ^7Be и

^{210}Pb . Это подтверждают измерения дисперсного состава аэрозолей в межкровельном пространстве (см. табл. 1). В частности, в пробе, отобранной в люках легкой кровли 10 декабря 2002 г. одновременно с началом экспозиции марлевого планшета, ^{137}Cs находился преимущественно на частицах диаметром $\sim 1,8$ мкм.

Кроме того, отсутствие на нижнем планшете ^7Be и ^{210}Pb может быть связано не только с низкой фильтрующей эффективностью марли, но и с наличием металлического листа в двух сантиметрах над планшетом. Не исключено, что поток воздуха, выходящий из люка, прижимает к нему марлю и просто оmyвает планшет, не проникая через марлю. При таком течении лишь крупные пылевые частицы могут сохранить скорость восходящего потока, сместиться с линий тока воздуха и за счет инерции достичь марли. В этом режиме планшет представляет собой своеобразную ступень импактора. При такой гидродинамике осаждение частиц-носителей ^7Be и ^{210}Pb вряд ли возможно, поскольку максимальная зарегистрированная скорость потока из люка составляла 3,4—3,6 м/с [6], чего недостаточно для инерционного осаждения на планшете частиц диаметром 0,3—0,6 мкм.

Таким образом, использование планшетов в качестве средств оценки неорганизованных выбросов из объекта «Укрытия» требует исследования как дисперсного состава аэрозолей-носителей продуктов аварии на Чернобыльской АЭС, так и закономерностей их улавливания марлей.

Дополнительный непрерывный контроль за выбросами радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» проводят также на уровне земли. В 60—100 м от его стен на промплощадке размещены три фильтровальные установки производительностью 500 м³/ч [8]. Еще одна с расходом 1200 м³/ч находится в 0,5 км к югу на территории ОРУ-750. Для улавливания аэрозолей используют материал ФПП-15-1,5 площадью 0,8 м² на промплощадке и 0,31 м² на ОРУ-750. Фильтры экспонируют 7—15 сут. В январе—апреле 2002 г. для одновременного определения концентрации и дисперсного состава аэрозолей на ОРУ-750 воздух прокачивали через пакеты трехслойных фильтров, аналогичных применявшимся на кровле «Укрытия» (табл. 2, рис. 7).

Т а б л и ц а 2. Концентрация, активностный медианный аэродинамический диаметр и стандартное геометрическое отклонение при исследовании аэрозолей на ОРУ-750 в 2002 г.

Радионуклид	Начало отбора								
	11 января			19 марта			30 марта		
	Экспозиция, ч								
	288			264			172		
	С, Бк/м³	D, мкм	σ	С, Бк/м³	D, мкм	σ	С, Бк/м³	D, мкм	σ
¹³⁷ Cs	0,11	3,25	1,7	0,86	3,42	1,9	1,66	3,46	1,6
²⁴¹ Am	—	—	—	—	—	—	0,016	2,84	1,8
⁷ Be	1,68	0,63	1,04	3,02	0,54	1,01	5,58	0,18	5,6
²¹⁰ Pb	—	—	—	0,25	—	—	0,83	0,16	3,2
²¹⁴ Pb	—	0,23	2,7	—	—	—	—	0,14	—
²¹⁴ Bi	—	0,16	2,1	—	0,08	1,03	—	0,12	—
²⁰⁸ Tl	—	0,23	4,4	—	0,36	1,8	—	0,06	—
²¹² Pb	—	0,2	5,1	—	0,38	1,5	—	0,02	—

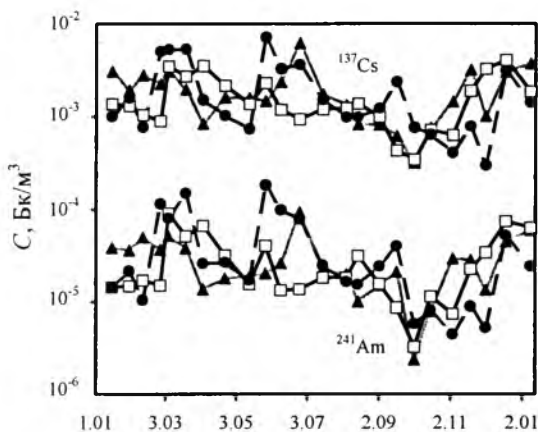


Рис. 7. Концентрация аэрозолей-носителей ^{137}Cs и ^{241}Am в северной (▲), северо-западной (□) и южной части (●) локальной зоны объекта «Укрытие» в январе—декабре 2002 г.

рис. 6). Оно почти не отличается от результатов 2000 г. [8]. Таким образом, загрязнение воздуха на промплощадке объекта «Укрытие» обусловлено топливными частицами [9]. В пробе, отобранной в марте—апреле 2002 г. на ОРУ-750, отношение $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ равно 107, в пробах, полученных в проемах и щелях «Укрытия» в 1996—1999 гг. [7], еще выше — в среднем 228. Следовательно, они значительно обогащены ^{137}Cs и этим отличаются от аэрозолей на промплощадке. Они относятся к конденсационным аэрозолям. Эти данные свидетельствуют, что аэрозоли, наблюдаемые в выбросах объекта «Укрытие» и его ближайших окрестностях, имеют разные источники.

Необходимо также отметить различие радиоактивных аэрозолей и по такому важному параметру, как дисперсность. Обработка распределения радионуклидов по слоям пакетов фильтров показала, что носителями ^{137}Cs на ОРУ-750 являются частицы с активностным медианным аэродинамическим диаметром 3,2—3,5 мкм, т.е. в 2—4 раза крупнее, чем на кровле. Аэрозоли-носители радионуклидов аварийного происхождения размером свыше 3 мкм стали наблюдаться во внешней среде после завершения строительства объекта «Укрытие». Их происхождение и концентрация определяются ветровым подъемом пыли с загрязненных поверхностей [14, 15].

Следует отметить также различия в дисперсном составе аэрозолей — носителей радиоактивных веществ, появившихся в воздухе в результате аварии, и носителей природных радионуклидов. Из табл. 2 следует, что ^7Be ассоциирован с частицами, имевшими активностный медианный аэродинамический диаметр в диапазоне 0,2—0,6 мкм, дочерние продукты радона и торона — с более мелкими 0,1—0,4 мкм. Эти субмикронные аэрозоли присутствуют как во внешней среде, так и в помещениях «Укрытия». Поэтому их целесообразно использовать в качестве метки воздушных потоков при разработке средств аэрозольного мониторинга, включая выбросы из объекта. Различия в дисперсном составе позволяют создать методы экспрессного определения трансурановых элементов путем отделения их аэрозолей-носителей от дочерних продуктов радона и торона в специальных волокнистых

Как видно из рис. 7, на промплощадке концентрация ^{137}Cs колебалась в диапазоне 0,5—5 мБк/м³. Подобным же образом вели себя аэрозоли-носители ^{241}Am при концентрации 0,08—0,8 мБк/м³. Полученные данные близки к показателям 2000 г. [8]. На ОРУ-750 концентрация ^{137}Cs в январе 2002 г. оказалась в 10 раз ниже, чем на промплощадке, в марте—апреле почти совпала.

Важной характеристикой аэрозолей, раскрывающей отчасти их происхождение, служит отношение активности $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ в диапазоне 50—70 (см.

фильтрах или импакторах [16]. Эта проблема актуальна, поскольку полоний и америций определяют ныне дозовую нагрузку персонала объекта «Укрытие» при ингаляционном поступлении радионуклидов.

Выводы. При контроле выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» детализирована сезонность расхода воздуха, поступающего за счет естественной тяги из разрушенного центрального зала через байпас в вентиляционную трубу ВТ-2. Максимальный расход 45—47 тыс. м³/ч приходится на зимние месяцы, минимальный 7—11 тыс. м³/ч — на летние. Сезонность в расходе воздуха не отражается на концентрации радиоактивных аэрозолей, проходящих через байпас. Установлено, что к увеличению концентрации радиоактивных аэрозолей в байпасе приводит, в частности, повышение скорости ветра во внешней среде. Предварительные оценки показывают, что при средней скорости ветра более 5 м/с и его порывах свыше 10 м/с концентрация аэрозолей может возрасти в 10 раз и более относительно значений, наблюдаемых при слабом ветре. Впервые в практике контроля неорганизованных выбросов в январе—декабре 2002 г. отобраны девять проб аэрозолей из межкровельного пространства объекта «Укрытие» через технологические люки легкой кровли. Установлено, что при истечении воздуха в приземный слой атмосферы концентрация ¹³⁷Cs составляет 0,7—2,3 Бк/м³. Эти результаты близки к полученным в 1996—1997 гг. при исследовании аэрозолей в потоках, выходящих через проемы и щели северной стены объекта «Укрытие». Методом трехслойных фильтров определено, что аэрозоли-носители ¹³⁷Cs в потоках, выходящих через люки легкой кровли, имеют активностный медианный аэродинамический диаметр в диапазоне 0,7—1,8 мкм при стандартном геометрическом отклонении 1,5—2,8. Аэрозоли таких размеров, имея малую скорость гравитационного осаждения, почти не выпадают на промплощадке. Носителями ¹³⁷Cs в окрестностях объекта «Укрытие», как и в прежние годы после его ввода в эксплуатацию, являются частицы с активностным медианным аэродинамическим диаметром 3—7 мкм. Аэрозоли ⁷Be, дочерних продуктов радона и торона ассоциированы с субмикронными аэрозолями. Это позволяет отделять их от аэрозолей — носителей радиоактивных веществ, появившихся в воздухе в результате аварии, в специальных волокнистых фильтрах и импакторах. Тем самым создается основа для экспрессного измерения концентрации трансурановых элементов в воздухе объекта «Укрытие», которые определяют дозовые нагрузки при вдыхании воздуха в ходе работ по эксплуатации этого уникального сооружения. Марлевые планшеты, используемые над технологическими люками легкой кровли при контроле неорганизованных выбросов, вследствие низкой эффективности фильтрации не задерживают ⁷Be и ²¹⁰Pb, находящиеся в атмосферном воздухе на субмикронных аэрозолях. Если аэрозоли — носители радиоактивных веществ, появившихся в воздухе в результате аварии, в силу каких-то причин будут находиться на аналогичных по размеру частицах, то они также не будут задержаны марлей. Тем самым возможно занижение выброса радиоактивных аэрозолей через неплотности внешних конструкций объекта «Укрытие».

Авторы благодарят Б.Ю. Муратова и А.И. Заграя за возможность использования базы данных о расходе воздуха и концентрации радиоактивных аэрозолей в

байпасе, А.К. Калиновского за расшифровку γ -спектров проб аэрозолей, В.П. Ковальчука и Н.И. Грецкого за помощь при отборе проб на крыше объекта «Укрытие», В.В. Деревца, С.И. Киреева и М.Н. Попова за организацию отбора и γ -спектрометрию проб аэрозолей с территории ОРУ-750, сотрудников метеостанции «Чернобыль» за сведения о метеобстановке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поташиников П.Ф. Особенности дезактивационных работ на ЧАЭС. — В сб.: Чернобыль. Долг и мужество. М.: 4-й филиал Воениздата, 2001, т. 1, с. 68—92.
2. Огородников Б.И. Концепция аэрозольной фильтровальной станции при проектировании и эксплуатации объекта «Укрытие». — Проблемы Чернобиля, 2002, вып. 10, ч. 1, с. 230—235.
3. Огородников Б.И., Павлюченко Н.И., Пазухин Э.М. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие» (обзор). 1. Аэрозольная обстановка на промплощадке ЧАЭС при строительстве объекта «Укрытие»: Препринт НАН Украины. Межотраслевой научно-технический центр «Укрытие». Чернобыль, 2002. 47 с.
4. Огородников Б.И., Павлюченко Н.И., Пазухин Э.М. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие» (обзор). 2. Концентрации радиоактивных аэрозолей. 2.1. Концентрации радиоактивных аэрозолей внутри объекта «Укрытие»: Препринт НАН Украины. Межотраслевой научно-технический центр «Укрытие». Чернобыль, 2003. 56 с.
5. Боровой А.А., Евстратенко А.С., Криницын А.П. и др. Динамика радиационной обстановки в объекте «Укрытие». — В сб.: Объект «Укрытие» — 10 лет. Основные результаты научных исследований. Чернобыль. 1996, с. 100—111.
6. Borovoy A., Beskorovainyi V., Bogatov S. et al. The Shelter's Current Safety Analysis and Situation Development Forecasts (Updated Version). Brussel, Tacis, 1998.
7. Гаргер Е.К., Кашпур В.А., Корнеев А.А., Курочкин А.А. Результаты исследований выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие». — Проблемы Чернобиля, 2002, вып. 10, ч. 2, с. 60—71.
8. Огородников Б.И. Происхождение и компоненты радиоактивных аэрозолей на промплощадке объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС. — Атомная энергия, 2002, т. 93, вып. 5, с. 375—383.
9. Бегичев С.Н., Боровой А.А., Бурлаков Е.В. и др. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС: Препринт ИАЭ-5268/3, 1990. 21 с.
10. Budyka A.K., Ogorodnikov B.I., Skitovich V.I. Evaluation of the aerosol particle size by means of the three filters. — In: PARTEC-98, 7th European Symp. Particle Characterisation, Nurnberg, Germany, 10—12 March 1998, Prepr. III, p. 1239—1245.
11. Огородников Б.И., Будыка А.К. Мониторинг радиоактивных аэрозолей в объекте «Укрытие». — Атомная энергия, 2000, т. 91, вып. 6, с. 471—475.
12. Петрянов И.В., Козлов В.И., Басманов П.И., Огородников Б.И. Волокнистые фильтрующие материалы ФП. М., Знание, 1968.
13. Скитович В.И., Будыка А.К., Огородников Б.И. Наблюдение за размерами радиоактивных аэрозольных частиц в 30-километровой зоне ЧАЭС в 1986—1987 гг. — В сб.: Охрана окружающей среды, вопросы экологии и контроль качества продукции. М., НИИТЭХИМ, 1992, вып. 1, с. 53—64.
14. Будыка А.К., Огородников Б.И. Радиоактивные аэрозоли чернобыльского генезиса. — Журн. физ. химии, 1999, т. 73, № 3, с. 375—384.
15. Будыка А.К., Огородников Б.И. Размеры радиоактивных частиц-носителей радионуклидов в приземном слое воздуха вблизи объекта «Укрытие» в 1987—2000 гг. — Проблемы Чернобиля, 2002, вып. 10, ч. 2, с. 199—202.
16. Меленевский А.Э. Экспрессное измерение концентраций и дисперсного состава радиоактивных аэрозолей объекта «Укрытие». — Там же, вып. 11, с. 102—110.