

шется в виде

$$R = \frac{1}{(l\rho)^2} \sum_{n,m=1}^{\infty} \sum_{i,j} \frac{P_i P_j \mu_n \mu_m}{\omega_n \omega_m \kappa(\mu_n) \kappa(\mu_m)} y_n(x_i) y_m(x_j) \times \\ \times y_n(x) y_m(x) e^{-\alpha_n \tau} (\sin \omega_n(t - \tau_i) \sin \omega_m(t - \tau_j + \tau) \times \\ \times e^{-(\alpha_n + \alpha_m)(t - \tau_i)} \eta(t - \tau_i) \eta(t - \tau_j + \tau)).$$

Усредняя по моменту вылета (т. е. полагая $i = j$) и месту вылета осколка и по переданному импульсу с учетом $y_n^2(x_i) = \kappa(\mu_n)/\mu_n$, получаем

$$R = \frac{1}{(l\rho)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n P_i^2}{\omega_n^2 \kappa(\mu_n)} y_n^2(x) e^{-\alpha_n \tau} \cos \omega_n \tau \times \\ \times \left\langle \sum_i \eta(t - \tau_i) e^{-2\alpha_n(t - \tau_i)} \right\rangle.$$

Пусть образец представляет собой волокно диаметром D , на которое нанесен слой толщиной δ_0 изотопа с периодом полураспада $T_{1/2}$, причем плотность атомов распадающегося вещества n_0 . Тогда число распадов в единицу времени, сопровождающихся передачей телу импульса, равно

$$\frac{1}{2} \frac{l\pi D \delta_0 n_0}{T_{1/2}}.$$

Таким образом,

$$\sum_i \eta(t - \tau_i) e^{-2\alpha_n(t - \tau_i)} = \frac{l\pi D \delta_0 n_0}{2T_{1/2}} \int_{-\infty}^t \eta(t - \tau_i) \times \\ \times e^{-2\alpha_n(t - \tau_i)} d\tau_i = \frac{1}{4} \frac{l\pi D \delta_0 n_0}{\alpha_n T_{1/2}},$$

откуда

$$R_n = \frac{\pi D \delta_0 n_0}{4l\rho^2 \alpha_n T_{1/2}} \frac{\mu_n P_i^2}{\omega_n^2 \kappa(\mu_n)} y_n^2(x) e^{-\alpha_n \tau} \cos \omega_n \tau.$$

В качестве примера рассмотрим проволоку диаметром 10 мкм, на которую нанесен слой ^{244}Cm толщиной 1 мкм. Число атомов, уносимых при вылете одного осколка, в данном случае $\sim 4 \cdot 10^4$ [3]. Период полураспада ^{244}Cm 17,6 года, причем испускаемые α -частицы имеют энергию 5,8 МэВ и импульс $P_i = 0,88 \cdot 10^{-14}$ т·см/с. Пусть длина волокна 1 см, тогда наименьшая собственная частота колебаний $\omega_1 \approx 200$ Гц (полагая $E \approx 10^{12}$ дин/см²; 1 дин = 10^{-5} Н). Максимальная амплитуда достигается

на свободном конце волокна ($x = l$), причем $y_1^2(l)/\kappa(\mu_1) \approx \approx \text{sh } \mu_1$. Тогда

$$R_1 = 10^{-12} e^{-\alpha_1 \tau} \cos \omega_1 \tau \text{ (см}^2\text{)},$$

амплитуда колебаний $\sqrt{R_1} \approx 100 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$). Для сравнения укажем, что амплитуда тепловых колебаний проволоки тех же геометрических размеров составляет 4 \AA [11]. Малые колебания с подобными амплитудами надежно регистрируются современными экспериментальными методами, в частности методом спектроскопии оптического смещения и корреляции фотонов [7, 14].

В заключение отметим, что развитый подход может быть легко обобщен на случаи колебаний (вследствие распыления) других механических систем — тонких пленок, пластин, капель, мембран различных конфигураций. Описанный метод исследования распыления радиоактивных веществ осколками деления может найти применение как в лабораторной практике (например, для определения среднего импульса осколков), так и в качестве безопасного бесконтактного способа контроля процесса распыления радиоактивных веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаптева Ф. С., Эршлер Б. В. — Атомная энергия, 1956, т. 4, с. 63.
2. Rogers M., Adam J. — J. Nucl. Mater., 1962, v. 6, p. 182.
3. Горшков В. К., Львов Л. Н. — Атомная энергия, 1966, т. 20, вып. 4, с. 327.
4. Александров Б. М. и др. — Там же, 1972, т. 33, вып. 4, с. 824.
5. Гарбер Р. и др. — Там же, 1970, т. 28, вып. 5, с. 406.
6. Петряк К., Бак М. — ЖТФ, 1970, т. 25, с. 636.
7. Спектроскопия оптического смещения и корреляция фотонов. М., Мир, 1978.
8. Бенедек Дж. — Успехи физ. наук, 1972, т. 106, с. 481.
9. Быковский Ю. А. и др. — Квантовая электроника, 1975, т. 2, с. 1803.
10. Быковский Ю. А. и др. — Журн. прикл. спектроскопии, 1975, т. 23, с. 966; Оптика и спектроскопия, 1977, т. 42, с. 867.
11. Колесов В. Л. и др. — Журн. прикл. спектроскопии, 1980, т. 33, с. 919.
12. Калечиц В. И. и др. — Письма в ЖТФ, 1979, т. 5, с. 485; с. 1184.
13. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М., Наука, 1972, с. 145.
14. Buchave P. Экспресс-информация «Испытательные стенды и приборы», 1976, вып. 1, реф. 6.

Поступило в Редакцию 09.06.80

УДК 621.039.76

Радионуклидный состав и дисперсность газо-аэрозольных выбросов БАЭС им. И. В. Курчатова

ПОГОДИН Р. И., ДИДЕНКО Л. Г., ВОДОВОЗОВА И. Г., ПОЛЯКОВА Э. А.,
КОЛТИН И. И., ФАТЬКИН А. Г.

Приведены результаты исследования радионуклидного состава и дисперсности газо-аэрозольных выбросов БАЭС в 1976—1978 гг.

Многочисленные расчеты и оценки показывают, что самый большой вклад в дозу облучения населения вблизи АЭС обычно вносят радиоактивные благородные газы (РБГ). Эта доза существенно зависит от соотношения радионуклидов в смеси РБГ. В табл. 1 приведены данные о составе радионуклидов в смеси РБГ по результатам анализа проб из трубок контроля вентиляционных труб первой очереди БАЭС. Состав выбросов реакторов БАЭС

довольно близок к составу выбросов BWR 18 зарубежных АЭС [1]. Наибольшее отличие наблюдается в содержании короткоживущего ^{138}Xe , что, вероятно, связано с конструктивными особенностями систем выдержки летучих отходов перед выпуском их в атмосферу.

Исследования показали, что на долю трития в выбрасываемом воздухе приходится 0,05% суммарной активности газовых выбросов БАЭС. При этом 75 \pm 12% его находится в окисленной форме в виде НТО.

С точки зрения формирования дозовых нагрузок большое внимание следует уделять также выбросам радиоак-

Таблица 1

Состав РБГ, выбрасываемых БАЭС и BWR

Нуклид	Доля суммарной активности выброса, %		Нуклид	Доля суммарной активности выброса, %	
	БАЭС	BWR		БАЭС	BWR
⁴¹ Ag	5,4±1,8	—	¹³³ Kr	8,6±2,6	14,0
⁸⁵ Kr	6,7±1,4	5,0	¹³⁵ Xe	41,7±6,7	26,0
⁸⁷ Kr	10,0±3,5	12,0	^{135m} Xe	5,6±2,6	4,0
⁸⁸ Kr	19,8±4,6	14,0	¹³⁸ Xe	2,2±0,9	13,0

Примечание. ⁴¹Ag вместе с ^{83m}Kr, ^{85m}Kr, ^{133m}Xe и ¹³⁷Xe дает 12% суммарной активности смеси.

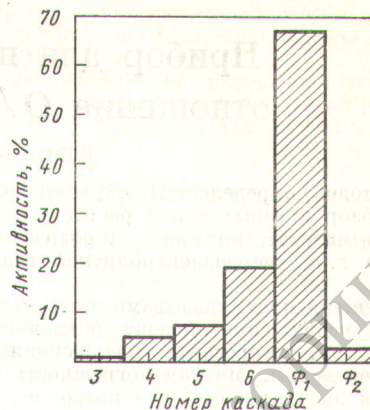
тивных изотопов пода. Результаты исследования задержки ¹³¹I аэрозольным фильтром РМШ-20, лентой СФЛ-2И-50 и колонкой с активированным углем свидетельствуют о том, что в газо-аэрозольных выбросах БАЭС на долю дисперсной фракции приходится в среднем 5%, газообразных элементарного пода и йодидов — 25%, органических трудноулавливаемых соединений — 70% ¹³¹I. При этом эффективность улавливания пода одним слоем ленты СФЛ-2И-50, рекомендуемой для контроля содержания ¹³¹I в воздухе, из газового потока вентиляционной трубы БАЭС после удаления дисперсной фазы составила в среднем 30%.

Дисперсность радиоактивных аэрозолей изучали с помощью шестикаскадного импактора. Результаты исследований представлены на рисунке. Из приведенных данных видно, что 85% аэрозолей осаждается на шестом каскаде и фильтре импактора, т. е. приходится на частицы диаметром менее 1 мкм. Аэродинамический медианный диаметр частиц, отобранных из трубки контроля газо-аэрозольных выбросов БАЭС, составил 0,52 мкм. Исследование распределения ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs и ¹⁰⁶Ru по каскадам импактора и спада их активности во времени показали, что в исследуемом диапазоне дисперсности не наблюдается какого-либо фракционирования нуклидов по размерам частиц. Следовательно, нуклидный состав выпадений во всех точках следа, образованного воздушными выбросами станции, должен быть одинаков и не должен отличаться от нуклидного состава аэрозолей в газовой струе. При этом учитывается время жизни нуклидов при условии, что в облаке отсутствуют источники образования дополнительных аэрозольных частиц.

Таблица 2

Состав радиоактивных аэрозолей, осажденных на фильтры РМШ-20

Нуклид	Доля суммарной активности, %		Нуклид	Доля суммарной активности, %	
	первый блок	второй блок		первый блок	второй блок
⁸⁹ Sr	30,7	14,8	¹³⁷ Cs	7,6	3,6
⁹⁰ Sr	3,3	0,7	¹⁴⁰ Ba	33	56,5
⁹⁵ Zr	3,2	12,6	¹⁴⁴ Ce	7,6	6,7
¹⁰⁶ Ru	9,3	2,0	⁶⁰ Co	4,0	1,2
¹³⁴ Cs	1,3	1,9			



Гистограмма распределения общей активности осажденных аэрозольных частиц по каскадам и фильтру импактора

Результаты исследования радионуклидного состава осадка для 36 сборок, состоящих из последовательно соединенных аэрозольного и «сорбционного» на основе ленты СФЛ-2И-50 фильтров, свидетельствуют о том, что в среднем 20% ⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ¹⁴⁴Ce и ⁶⁰Co проходит через фильтр РМШ-20 и задерживается лентой СФЛ-2И-50.

Радионуклидный состав аэрозольных выбросов БАЭС оценивали по результатам γ -спектрометрического и радиохимического анализов фильтров РМШ-20 после их суточной и месячной экспозиции. Аэрозольная фракция газового потока вентиляционных труб представляет собой в основном обычный набор продуктов деления и ⁶⁰Co. Кроме того, в ряде проб обнаружен ⁵⁴Mn, активность которого соизмерима с активностью ⁹⁰Sr.

В табл. 2 приведен вклад отдельных радионуклидов в суммарную активность фильтров после их месячной экспозиции. Наибольший вклад вносят ⁸⁹Sr и ¹⁴⁰Ba. На долю долгоживущих ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs приходится 4—10% суммарного содержания идентифицированных и количественно определенных нуклидов. Отношение активности ¹³⁷Cs к активности ¹³⁴Cs довольно постоянно во времени и составляет в среднем для первого блока 5,2, для второго 1,7. Увеличение относительного содержания ¹³⁴Cs в газовых выбросах второго блока соответствует увеличению плотности потока нейтронов в нем по сравнению с первым реактором [2].

Отношение среднемесячных концентраций ⁸⁹Sr и ⁹⁰Sr в фильтрах изменяется в довольно широких пределах — от 2 до 25. Аналогичные изменения наблюдаются и для отношения активности ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Воздух, выбрасываемый из вентиляционных труб станции, в 2—20 раз больше обогащен летучим ¹³⁷Cs, чем ⁹⁰Sr. Наибольшим постоянством в рассматриваемый период отличалось отношение активности ⁹⁰Sr и ¹⁰⁶Ru (0,3—0,4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство ядерной энергии. Докл. Научного комитета ООН по действию атомной радиации N A/AC, 82/R, 343, N.Y., 1977.
2. Петросьянц А. М. Современные проблемы атомной науки и техники в СССР. М., Атомиздат, 1976.

Поступило в Редакцию 08.12.80