

ОЦЕНКА ОСАЖДЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В ПРОБООТБОРНОМ КАНАЛЕ СИСТЕМЫ “БАЙПАС” ОБЪЕКТА “УКРЫТИЕ”

С. А. Довыдьков, Б. И. Огородников

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

В соответствии с Национальным стандартом Украины “Общие принципы отбора проб радиоактивных веществ из воздуха” выполнены расчеты осаждения аэрозолей в пробоотборной трубке системы “Байпас” объекта “Укрытие” ЧАЭС. Найдено, что в трубке с внутренним диаметром 15 мм, длиной горизонтальных участков 30 м и пятью изгибами под углом 90° при линейной скорости протяжки воздуха 1,9 м/с практически все аэрозоли диаметром свыше 5 мкм не дойдут до концевой пробоотборной фильтра. Поскольку средняя величина АМАД радиоактивных аэрозолей в вентиляционной системе “Байпас” составляет около 4 мкм, измеряемая по штатной методике величина выброса в атмосферу из объекта “Укрытие” может быть значительно занижена.

Вентиляционная система “Байпас”

Вентиляционная система “Байпас” была создана в 1986 г. перед окончанием строительства объекта “Укрытие” для отвода воздуха из развала центрального зала 4-го энергоблока ЧАЭС в высотную трубу ВТ-2. Воздух в систему “Байпас” при рутинном режиме эксплуатации поступает за счет естественной тяги и в значительной степени зависит от сезона года и метеоусловий. Объемный расход воздуха составляет от 10000 (летом) до 40000 (зимой) м³/ч. При этом диапазон линейных скоростей потоков составляет 1,8 - 7,2 м/с [1].

Общая схема вентиляционных систем объекта “Укрытие” представлена на рис. 1. Она имеет две ветви. Первая (естественная тяга) начинается воздухопроводом, идущим из центрального зала в забетонированный короб размером 1,5 × 1,5 м на отметке +43 м, находящийся в помещении 2016/2. Далее проложен вертикальный воздухопровод длиной 3,2 м и диаметром 1,4 м, в котором близ отметки +46 м в помещении 2016/2 размещена байпасная задвижка. Затем воздушный поток проходит через помещение 4004/1 на отметке +50 м и через помещение 7001 попадает в трубу ВТ-2.

Вторая (принудительная) ветвь, которая предназначена для работы в условиях опасной радиационно-аэрозольной обстановки, начинается из забетонированного короба в помещении 2016/2. После перекрытия задвижки в системе “Байпас” воздух поступает в помещение 814/1 на отметке +31,5 м, где размещаются ячейки с фильтрами, снаряженными высокоэффективными материалами Петрянова. После этого из коллекторов фильтровальной станции воздух направляется на адсорберы. Очищенный поток вытягивают семь вентиляторов, сбрасывают его в помещение 7001 и затем в трубу ВТ-2.

Вместе с воздухом из центрального зала в систему “Байпас” поступают радиоактивные аэрозольные частицы. Исследования [2, 3] показали, что более 90 % аэрозольной активности связано с “горячими” частицами, имеющими характерные особенности облученного ядерного топлива. Согласно работе [4], “горячие” частицы в объекте “Укрытие” можно условно разделить на два класса. К первому классу относятся крупные, диаметром в несколько микрон частицы, представляющие собой одно или несколько зерен диоксида урана, по границам которых шло разрушение топливных таблеток в первые моменты аварии. Ко второму классу относятся более мелкие, размером около микрона и менее, частицы, формировавшиеся в процессе горения графита, окисления топлива и взаимодействия его с окружающими материалами.

Изучение дисперсности аэрозольных частиц показало, что максимумы распределений частиц как по диаметру, так и по активности приходятся на фракцию 1 - 5 мкм [5, 6]. Как правило, распределение по размерам аэрозольных частиц соответствует логарифмически нормальному.

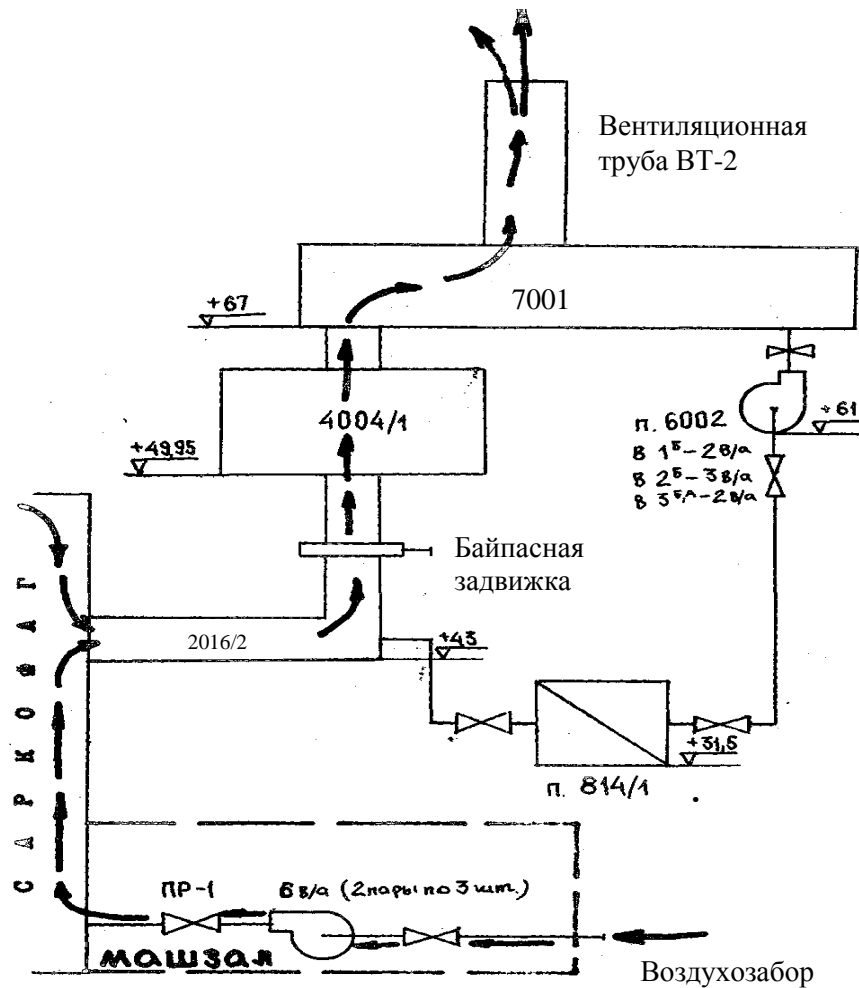


Рис. 1. Схема вентиляционных систем объекта «Укрытие».

Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из развала центрального зала в трубу ВТ-2 осуществляется с помощью пробоотборной линии, соединяющей внутреннее пространство цилиндрической части системы «Байпас» с радиометрической установкой, расположенной в помещении 2015 на отметке +43 м 3-го энергоблока. Пробоотборная линия представляет собой трубку с внутренним диаметром 15 мм, которая вварена выше задвижки в стенку системы «Байпас» и введена внутрь на 80 мм. Срез трубки прямой, без «носика», направленного навстречу потоку. Длина пробоотборной трубки составляет 35 м. При этом на горизонтальные участки приходится 30 м и на вертикальные – 5 м. Трубка имеет пять изгибов под прямым углом и три изгиба с углами от 15 до 45° [1].

Расчет осаждения аэрозолей в модели пробоотборной трубки

Для расчета осаждения аэрозольных частиц в пробоотборной трубке рассмотрим ее модель, имеющую длину горизонтальных участков 30 м, вертикальных 5 м и пять изгибов с углом 90°. При регламентном контроле расход отбираемого через пробоотборную трубку воздуха составляет 20 л/мин, что соответствует воздушному потоку 190 см/с. Число Рейнольдса системы составляет $Re = 1992$. Это при наличии изгибов позволяет рассматривать поток воздуха в трубке как турбулентный.

Согласно Национальному стандарту Украины [7] в рассматриваемой модели следует учесть следующие механизмы осаждения частиц: гравитационный на горизонтальных участках трубки, турбулентный на вертикальных участках и инерционный на изгибах трубки.

На каждом участке осаждение частиц можно характеризовать коэффициентом

$$W_i = \frac{\Delta C_i}{C_{i-1}},$$

где $\Delta C_i = C_{i-1} - C_i$; C_i и C_{i-1} – концентрации частиц в конце и в начале i -го участка соответственно.

Полный коэффициент осаждения W на N участках определяется выражением

$$1 - W = (1 - W_1)(1 - W_2)...(1 - W_N).$$

Гравитационное осаждение можно оценить по формуле [1]

$$W_g = 1 - \exp(-\mu_{st}),$$

где $\mu_{st} = 4V_s L_e / (\pi D_{mp} V)$; $V_s = \tau g$ – скорость седиментации частиц, см/с; L_e – суммарная длина горизонтальных участков пробоотборной трубки, см; g – ускорение свободного падения, см/с; $\tau = \rho_c d^2 / (18\eta)$ – время релаксации частиц; $\rho_c = 2,7 \text{ г/см}^3$ – плотность частиц; d – диаметр частиц, см; $\eta = 1,84 \cdot 10^{-4} \text{ г/(см}\cdot\text{с)}$ – динамическая вязкость воздуха; $D_{mp} = 1,5 \text{ см}$ – диаметр пробоотборной трубки.

Турбулентное осаждение можно оценить по формуле [1]

$$W_m = 1 - \exp(-\mu_t),$$

где $\mu_t = 4V_t L_e / (D_{mp} V)$; $V_t = 7,25 \cdot 10^{-4} (\mu_\rho^2 \tau_+)^2 V_+$; $\mu_\rho = (1 + \omega_E \tau)^{-1/2}$; $\omega_E = V / D_{mp}$; $\tau_+ = \tau V_+^2 / \nu$; $V_+ = 0,2V / Re^{1/8}$; $Re = V D_{mp} \rho_a / \eta$ – число Рейнольдса; $\nu = \eta / \rho_a$; L_e – суммарная длина вертикальных участков пробоотборной трубки, см; $\rho_a = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ – плотность воздуха.

Осаждение частиц на изгибах трубки можно оценить по формуле [1]

$$W_u = 1 - (2 / \pi) \arccos(\theta \cdot St) + (1 / \pi) \sin(2 \arccos(\theta \cdot St)),$$

где θ – угол изгиба трубки; $St = 2\tau V / D_{mp}$ – число Стокса.

Реальные значения диаметров аэрозольных частиц в объекте “Укрытие” охватывают диапазон 0,1 – 50 мкм. Для расчета коэффициентов осаждения разобьем его на восемь интервалов: 0,1 – 0,2, 0,2 – 0,5, 0,5 – 1, 1 – 2, 2 – 5, 5 – 10, 10 – 20, 20 – 50 мкм. В качестве опорных точек возьмем середины интервалов. Результаты расчетов коэффициента осаждения для каждой опорной точки по приведенным выше формулам представлены в табл. 1.

Таблица 1. Величины коэффициента осаждения в пробоотборной трубке

Осаждение частиц	Середина интервала диаметров частиц, мкм							
	0,15	0,35	0,75	1,5	3,5	7,5	15	35
Гравитационное	$2 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,06	0,2	0,7	1,0	1,0	1,0
Турбулентное	$6 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,03	0,3	1,0
Инерционное на пяти изгибах под углом 90°	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,2	0,7	1,0	1,0
Суммарное	0,0022	0,011	0,065	0,25	>0,7	~1,0	~1,0	~1,0

Из табл. 1 видно, что основной вклад в осаждение аэрозольных частиц в пробоотборной трубке вносит гравитационный эффект на горизонтальных участках. Причем если частиц диаметром 0,35 мкм осаждается около 1 %, то диаметром 3,5 мкм – уже 70 %. Частицы диаметром свыше 5 мкм осаждаются полностью. При диаметрах частиц более 3,5 мкм ощутимый вклад (более 20 %) вносит осаждение на изгибах трубки. Вклад турбулентного осаждения становится заметен только для крупных частиц диаметром более 10 мкм.

Суммарное осаждение за счет всех трех механизмов можно считать незначительным (менее 10 %) только для частиц диаметром менее 0,75 мкм. Если же аэрозоли вдвое крупнее, то суммарное осаждение составляет уже 30 %. Частицы крупнее 7,5 мкм в пробоотборной трубке осаждаются практически полностью. Следует отметить, что поскольку коэффициент суммарного осаждения имеет существенно разные значения для разных диаметров частиц, то

по мере их продвижения в пробоотборной трубке в результате осаждения существенно меняется вид функции их распределения по диаметру.

Выполненные модельные расчеты показывают, что в используемой в объекте “Укрытие” пробоотборной трубке может наблюдаться значительное осаждение аэрозольных частиц. Из табл. 1 следует, что на аналитический фильтр, расположенный на конце пробоотборной трубки в помещении 2015, аэрозольные частицы крупнее 5 мкм вообще не поступают, а размером от 2 до 5 мкм не более половины. Очевидно, при проектировании канала пробоотбора из системы “Байпас” было сделано предположение, что активностный медианный аэродинамический диаметр (АМАД) частиц, поступающих из объекта “Укрытие” будет близок к 1 мкм. Но такие и более мелкие частицы характерны только для выбросов АЭС, прошедших очистку на высокоэффективных волокнистых фильтрах, например из материалов Петрянова. Наблюдения, выполненные в системе “Байпас” в 2003 - 2006 гг. [8, 9], показали, что величины АМАД аэрозолей-носителей продуктов Чернобыльской аварии, как правило, превышают 1 мкм и в среднем составляют 3,8 мкм.

Расчет осаждения аэрозолей в пробоотборной трубке системы “Байпас” по результатам натуральных определений дисперсного состава

Рассмотрим пробы аэрозольных частиц, взятые непосредственно в системе «Байпас». Для одновременного определения радионуклидного и дисперсного составов их отбирали на пакеты трехслойных фильтров Петрянова. Использовали воздуходувку Н810, которую размещали на срезе цилиндрического вентиляционного канала в помещении 4004/1. Через фильтры площадью 20 см² воздух прокачивали со скоростью около 100 л/мин в течение 1 – 2 ч. Для обеспечения изокинетичности отбора аэрозолей перед пакетом располагалась конусная насадка, направленная навстречу вентиляционному потоку, скорость которого составляла 3 - 5 м/с.

Измерения β -активности каждого из трех входящих в пакет фильтров проводили с помощью радиометра КРК-1 через 4 - 5 сут после окончания пробоотбора, чтобы исключить влияние дочерних продуктов радона и торона. При измерениях основной вклад в $\Sigma\beta$ -активность вносили радионуклиды чернобыльского генезиса $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{137}Cs и ^{241}Pu . Присутствием космогенного ^7Be пренебрегали. В некоторых случаях для идентификации γ -излучающих нуклидов использовали полупроводниковый спектрометр. Величины $\Sigma\beta$, зарегистрированные на каждом слое пакета фильтров, использовали для расчета параметров логнормального распределения аэрозолей по размерам АМАД и σ (стандартное геометрическое отклонение) в соответствии с методикой [10].

Для характеристики дисперсного состава аэрозолей-носителей радиоактивных продуктов Чернобыльской аварии были выбраны несколько проб, отобранных из системы “Байпас” в 2005 г. Их отличали условия генерации аэрозолей. Пробы 2 и 3 были отобраны в отсутствие интенсивной техногенной деятельности 1 и 2 сентября за один-два часа перед началом сеансов пылеподавления в центральном зале объекта “Укрытие”. Пробу 1 отобрали 31 августа с 11⁴⁰ до 13¹⁶ при распылении с 11³⁸ в течение 13 мин локализирующего состава (5 м³) и промывочного раствора (2,5 м³) через 17 форсунок коллектора № 3 в северной части объекта “Укрытие”. Проба 4 была отобрана 22 ноября через сутки после сильного ветра, порывы которого в течение 8 - 9 ч достигали 10 - 11 м/с. Затем ветер стих, и в течение примерно 12 ч перед пробоотбором и в процессе его наблюдался штиль. Это привело к тому, что аэрозоли, поднятые накануне турбулентными вихрями в подкровельном пространстве объекта “Укрытие”, очистились от крупных частиц за счет гравитационного осаждения. Поэтому в день пробоотбора основными носителями радиоактивных продуктов Чернобыльской аварии в центральном зале оказались субмикронные аэрозоли, которые и поступали в систему “Байпас”. Сводные характеристики отобранных проб представлены в табл. 2.

На основании параметров распределений размеров частиц, представленных в табл. 2, были построены графики в вероятностно-логарифмической сетке (рис. 2). Их использовали

Таблица 2. Характеристики проб, отобранных в системе “Байпас” в 2005 г.

Проба	Дата	$\Sigma\beta$, Бк/м ³	АМАД, мкм	σ
1	31.08	9,4	7,6	2,3
2	01.09	1100	4,3	2,0
3	02.09	61	6,4	1,3
4	22.11	1,9	0,34	1,1

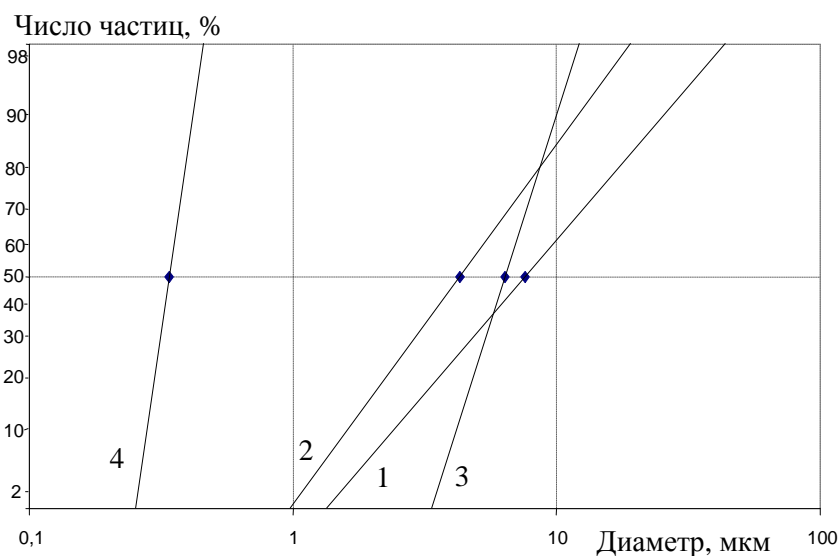


Рис. 2. Распределение частиц по диаметрам в пробах 1, 2, 3, 4 (цифры у кривых).

для расчета осаждения аэрозолей в пробоотборной трубке системы “Байпас”. Оценим осаждение аэрозольных частиц для данных конкретных проб. По аналогии с модельными расчетами рассмотрим распределения диаметров частиц по интервалам. Для пробы 1 в соответствии с рис. 2 имеем: 6 % частиц имеют диаметры в диапазоне 1 - 2 мкм, 24 % – 2 - 5 мкм, 31 % – 5 - 10 мкм, 26 % – 10 - 20 мкм, 13 % – 20 - 50 мкм. На основании представленных в табл. 1 значений коэффициента суммарного осаждения для опорных точек интервалов получаем $W = 0,9 \pm 0,2$. Следовательно, при проведении сеанса пылеподавления в пробоотборной трубке осаждалось около 90 % аэрозольных частиц. Это может приводить к занижению значения объемной активности в 10 раз по сравнению с реальным значением в выбросе. Аналогично для пробы 2 получаем: 14 % частиц – 1 - 2 мкм, 43 % – 2 - 5 мкм, 30 % – 5 - 10 мкм, 13 % – 10 - 20 мкм; $W = 0,8 \pm 0,2$. Для пробы 3: 18 % частиц – 2 - 5 мкм, 75 % – 5 - 10 мкм, 7 % – 10 - 20 мкм; $W = 1,0 \pm 0,2$. Следовательно, даже при малой техногенной деятельности, но при величинах АМАД около 5 и 8 мкм занижение активности, выбрасываемой в атмосферу из объекта “Укрытие”, было очень значительное. Только для пробы 4 осаждение частиц в пробоотборной трубке очень мало, что связано с небольшим диаметром частиц (100 % частиц – 0,2 - 0,5 мкм). Однако, как показывают наблюдения 2003 - 2006 гг. [8, 9], такая аэрозольная обстановка внутри объекта “Укрытие” складывается крайне редко.

Выводы

Из расчетов, выполненных в соответствии с Национальным стандартом Украины [7], следует, что осаждение аэрозольных частиц в пробоотборной трубке системы “Байпас” может существенно влиять на измеряемые значения выброса радиоактивных аэрозолей из объекта “Укрытие”.

На основании определений дисперсного состава аэрозолей-носителей продуктов Чернобыльской аварии, выполненных в 2003 - 2006 гг. в системе “Байпас”, установлено, что их АМАД в среднем составляет 3,8 мкм. Такие аэрозоли вследствие гравитационного, турбулентного и инерционного осаждения эффективно задерживаются в пробоотборной трубке системы “Байпас” и не поступают на концевой аналитический фильтр. Вследствие этого измеряемые штатной пробоотборной системой выбросы радиоактивных аэрозолей в атмосферу из объекта “Укрытие” через систему “Байпас” могут быть занижены на величину до 100 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Разработка* структуры комплекса технических средств системы контроля выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта “Укрытие” ПО ЧАЭС через “Байпас”: (Отчет о НИР) / НИТИ. - № 5-96-1020. - Сосновый Бор, 1996.
2. *Богатов С.А., Боровой А.А.* О некоторых свойствах топливосодержащих частиц, образовавшихся при аварии на Чернобыльской АЭС и особенностях формирования топливного выброса. - Москва, 1991. - 18 с. - (Препр. / ИАЭ им. И. В. Курчатова; 5344/3).
3. *Богатов С.А., Лебедева Л.И., Левина Л.А. и др.* Физико-химические характеристики радиоактивных аэрозолей во внутренних помещениях “Саркофага”. - Москва, 1991. - 18 с. - (Препр. / ИАЭ им. И. В. Курчатова; 5435/3).
4. *Богатов С.А., Боровой А.А., Дворецкий В.И. и др.* Исследование устойчивости радиологически опасных нуклидов в различных формах топливного выброса Чернобыльской аварии. - Москва, 1990. - 18 с. - (Препр. / ИАЭ им. И. В. Курчатова; 5022/3).
5. *Исследование* методов экспресс-анализа загрязненности воздуха в помещениях объекта “Укрытие”: (Отчет о НИР) / КЭ при ИАЭ им. И. В. Курчатова. - Инв. № 11.07/39. - Чернобыль, 1990.
6. *Определение* эффективности фильтровальной ткани ФПП и респираторов ШБ-1 “Лепесток-200” в условиях объекта “Укрытие”: (Отчет о НИР) / КЭ при ИАЭ им. И. В. Курчатова. - Инв. № 11.07-06/07. - Чернобыль, 1990.
7. *Національний стандарт України. Захист від радіації. Загальні принципи відбирання проб радіоактивних речовин із повітря (ISO 2889:1975, IDT). ДСТУ ISO 2889-2001.* - К.: Держспоживстандарт України, 2003.
8. *Огородников Б.И., Павлюченко Н.И., Будыка А.К., Краснов В.А.* Пылеобразование в объекте “Укрытие” под воздействием техногенных и природных факторов // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2005. - Вип. 3, ч. 1. - С. 31 - 44.
9. *Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.К. и др.* Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта “Укрытие” в 2005 г. // Там же. - 2006. - Вип. 6. - С. 85 - 94.
10. *Budyka A.K., Ogorodnikov B.I., Skitovich V.I.* Filter pack technique for determination of aerosol particle sizes // J. of Aerosol Sci. - 1993. - Vol. 24, Suppl. 1. - P. S205 - S206.

Поступила в редакцию 02.02.07

13 ОЦІНКА ОСІДАННЯ РАДІОАКТИВНИХ АЕРОЗОЛІВ У ПРОБОВІДІБРНОМУ КАНАЛІ СИСТЕМИ “БАЙПАС” ОБ’ЄКТА “УКРИТТЯ”

С. А. Довидьков, Б. І. Огородников

Згідно з Національним стандартом України “Загальні принципи відбирання проб радіоактивних речовин із повітря” виконано розрахунки осадження аерозолів у пробовідбірній трубці системи “Байпас” об’єкта “Укриття” ЧАЕС. Знайдено, що в трубці з внутрішнім діаметром 15 мм, довжиною горизонтальних ділянок 30 м і п’ятьма вигинами під кутом 90° при лінійній швидкості протягання повітря 1,9 м/с практично всі аерозолі діаметром понад 5 мкм не дійдуть до кінцевого пробовідбірного фільтра. Унаслідок того, що середня величина АМАД радіоактивних аерозолів у вентиляційній системі “Байпас” дорівнює приблизно 4 мкм, вимірювана за штатною методикою величина викиду в атмосферу з об’єкта “Укриття” може бути значно занижена.

13 THE ESTIMATION OF RADIOACTIVE AEROSOLS DEPOSITION IN SAMPLE-TAKING CHANNEL OF “BUYPASS” SYSTEM OF THE OBJECT “UKRYTTYA”

S. A. Dovydkov, B. I. Ogorodnikov

In accordance with National standard of Ukraine “The main principles of radioactive matter samples taking from the air” calculations of aerosol deposition in sample-taking tube of “Buypass” system of the “Ukryttya” object of Chernobyl NPP are made. It is found, that in the tube with inner diameter 15 mm, length of horizontal parts 30 m and five rounds in angle 90° with linear velocity of air flow 1,9 m/s almost the all aerosols with diameter more then 5 μm won't pass to the ending sample-taking filter. Because of the average value of AMAD of radioactive aerosols in “Buypass” ventilation system is near 4 μm , the measured by standard methodic value of release to atmosphere from the “Ukryttya” object may be strongly lower.