

УДК 614.876;613.648;612.014.481/482; 614.8; 574::539.1.04

## УЧЕТ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ВДЫХАЕМОЙ ФРАКЦИИ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ АККУМУЛЯЦИИ АЭРОЗОЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ ОТДЕЛАХ ДЫХАТЕЛЬНОГО ТРАКТА ПРИ РАСЧЕТЕ ДОЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ

Горбачева Н.В., Кулич Н.В., Кузьмина Н.Д.

С целью учета влияния распределения частиц газоаэрозольного выброса по размерам диаметров на ингаляционную дозу облучения выполнена модификация модели внутреннего облучения от ингаляции, рекомендованной МКРЗ, в части учета вероятности перехода аэрозольных частиц из вдыхаемого воздуха в различные отделы дыхательного тракта. На основе модифицированной дозиметрической модели выполнена модернизация компьютерной программы RADRISK («ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси), выполняющей расчет атмосферной диффузии радиоактивной примеси и оценку доз облучения населения. Методом имитационного моделирования дисперсного состава радиоактивного аэрозоля, поглощаемого при вдыхании, а также статистических характеристик частиц, осаждаемых в различных отделах легких, выполнены расчеты ингаляционной дозы облучения населения.

*Ключевые слова:* респираторный тракт человека, ингаляционная доза, распределение размеров частиц аэрозоля, вероятностное моделирование.

(Поступила в редакцию 7 июня 2017 г.)

**Введение.** Установлено, что основным фактором, определяющим дозовые нагрузки на организм человека при осаждении частиц радиоактивного аэрозоля в дыхательном тракте, является распределение активности по аэродинамическим диаметрам частиц.

В настоящее время для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) требуется проведение исследований вкладов различных физико-химических форм изотопов йода, цезия в аварийный газоаэрозольный выброс при запроектных авариях с помощью специализированных кодов, например ASTEC (Франция), МАВР-ТА (НИЦ «Курчатовский институт»). Однако, прогноз распределения частиц по размерам в составе аэрозоля указанными расчетами не обеспечивается.

В данной работе с целью учета влияния распределения частиц газоаэрозольного выброса по размерам диаметров на ингаляционную дозу облучения выполнена модификация модели внутреннего облучения от ингаляции, рекомендованной МКРЗ [1], в части учета вероятности перехода аэрозольных частиц из вдыхаемого воздуха в различные отделы дыхательного тракта ( $p_{tr}$ ).

На основе модифицированной дозиметрической модели выполнена модернизация компьютерной программы RADRISK («ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси), выполняющей расчет атмосферной диффузии радиоактивной примеси и оценку доз облучения населения [2]. Методом имитационного моделирования дисперсного состава радиоактивного аэрозоля, поглощаемого при вдыхании, а также статистических характеристик частиц, осаждаемых в различных отделах легких, выполнены расчеты ингаляционной дозы облучения населения.

**Закономерности формирования ингаляционной дозы облучения с учетом распределения частиц по размерам и особенностей дыхательного тракта.** Общие закономерности осаждения частиц аэрозоля в дыхательном тракте представлены в документе [3]. Динамика поступления радиоактивных веществ в организм человека при вдыхании существенно зависит от характеристик аэрозольных частиц, таких, как дисперсность, агрегатное состояние, химический состав. Дальнейшая судьба отложившейся доли радионуклида связана с размером радиоактивных частиц, а также с его физико-химическими свойствами и транспортабельностью в организме. Доля взвешенных в воздухе частиц, вдыхаемых человеком, зависит от свойств частиц, скорости и направления движения воздуха вблизи человека, интенсивности вдыхания, вдыхания через нос или рот. Вдыхаемые частицы могут оседать в какой-либо области дыхательных путей или могут быть выдохнуты. Область оседания и вероятность выдоха частиц зависят от свойств частиц, особенностей строения дыхательных путей, характера дыхания и других факторов.

Частицы жидкостей или растворимые компоненты твердых частиц могут абсорбироваться тканями в области оседания. Радиоактивные частицы могут вызывать поврежде-

ние ткани вблизи области оседания. Нерастворимые частицы кроме дыхательных путей могут попадать и в другие области организма человека, где они могут быть абсорбированы или вызывать биологическое воздействие.

Экспериментальное определение такого распределения практически невозможно, поэтому для оценки ожидаемой дозы на практике используют расчетно-экспериментальные методы, имитирующие респираторный тракт или расчетные физико-математические модели, позволяющие на основании предварительно полученных экспериментальных данных о дисперсности оценить дозу внутреннего облучения.

В основном осаждение происходит в результате трех процессов – инерционного осаждения, седиментации, т. е. осаждения под влиянием силы тяжести, и диффузии. Каждый из них осуществляется в определенном участке дыхательных путей, связанном с размером осаждающихся частиц.

Установлено, что, благодаря механизму инерционного осаждения, верхние дыхательные пути отфильтровывают практически все крупные частицы диаметром более 1 мкм. Частицы диаметром менее 1 мкм, которые избежали инерционного осаждения в верхних дыхательных путях, поступают в легкие. Главной причиной осаждения частиц здесь является действие силы тяжести. В легочных альвеолах, где скорость движения воздуха ничтожна, оседают в основном самые мелкие частицы – диаметром около 0,1 мкм и менее. Механизм осаждения включает здесь броуновское движение и диффузию. Для количественной характеристики процесса осаждения аэрозольных частиц в дыхательном тракте пользуются так называемым коэффициентом отложения, или задержки, который характеризует долю частиц, отложившихся в том или ином участке дыхательных путей, относительно полного их содержания во вдыхаемом воздухе. Вдыхаемая фракция – доля взвешенных в воздухе частиц, которые находятся около носа и рта человека.

Ингаляционную дозу облучения формируют радионуклиды, содержащиеся на частицах, попадающих в дыхательные пути за пределы гортани при вдыхании аэрозоля. Доля частиц аэрозоля, задержанная в дыхательной системе, и их локализация зависит от размера радиоактивных частиц во вдыхаемом воздухе, минутного объема и частоты дыхания.

Эквивалентная доза за счет ингаляции  $i$ -го нуклида при прохождении радиоактивного облака определяется по формуле:

$$H_{inh,\gamma}^{i,E} = A_{\gamma,i}^v \varepsilon_i^{inh} v^a (t_1 - t_0), \quad (1)$$

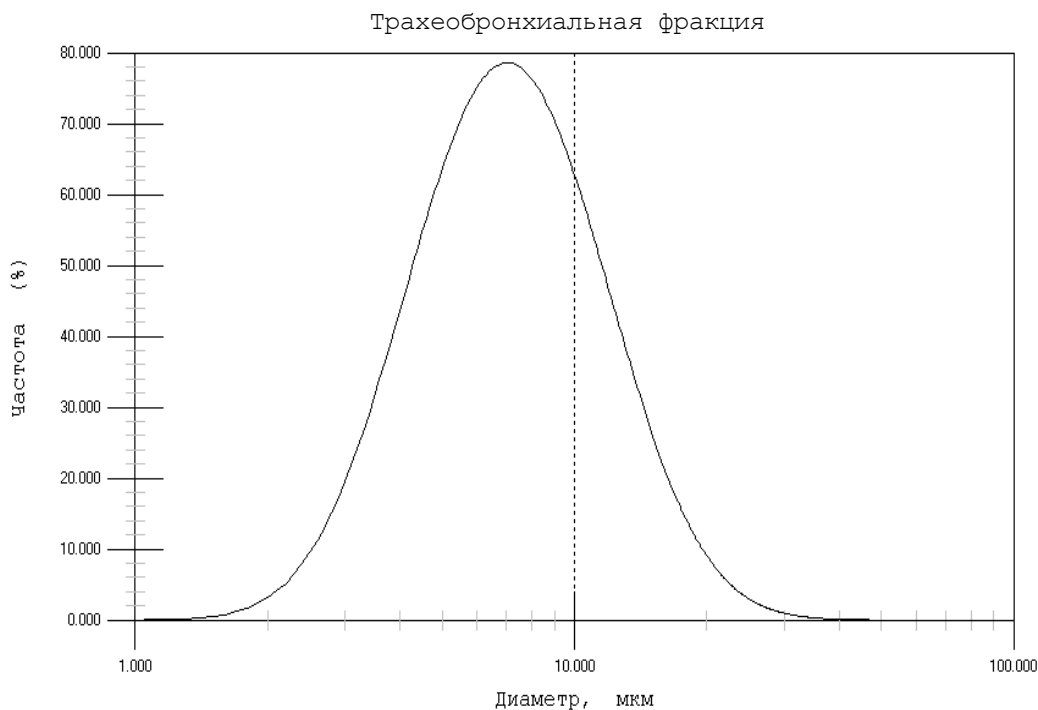
где  $A_{\gamma,i}^v$  – объемная активность  $i$ -го радионуклида в воздухе, Бк/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_i^{inh}$  – дозовый ингаляционный коэффициент, Зв/Бк;  $v^a$  – скорость (частота) дыхания для лиц возрастной группы «а», м<sup>3</sup>/с;  $(t_1 - t_0)$  – время накопления дозы после поступления радиоактивного вещества в организм, с.

Норматив по скорости дыхания  $v^a$  и значения дозовых ингаляционных коэффициентов для населения  $\varepsilon_i^{inh}$  установлены в Гигиеническом нормативе Республики Беларусь «Критерии оценки радиационного воздействия» [4].

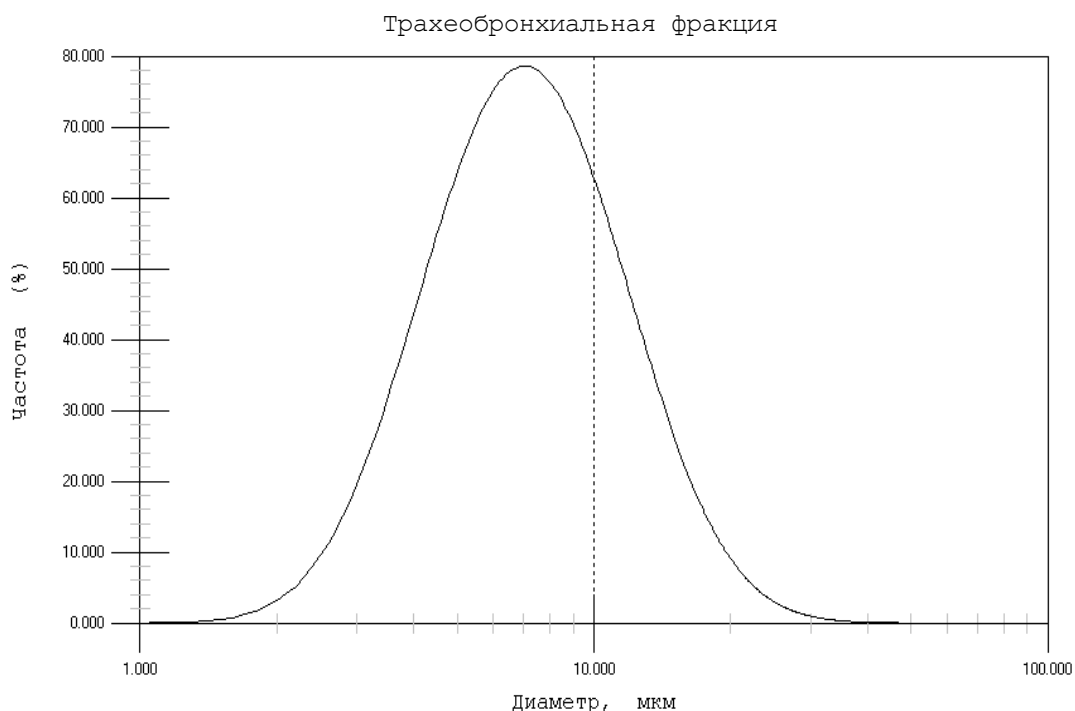
В данной работе с целью учета влияния распределения частиц в различных отделах респираторного тракта человека в зависимости от их размеров авторами использованы положения стандарта «Качество воздуха. Определение гранулометрического состава частиц при санитарно-гигиеническом контроле» (ГОСТ Р ИСО 7708-2006) [3,5]. В этом документе установлены нормативы по отбору проб воздуха для вдыхаемой, торакальной и респираторной фракций, в соответствии с которым регламентируются массовые доли аэродисперсных частиц, поступаемые в организм, в зависимости от области дыхательных путей. Массовые доли однозначно связаны с общей площадью поверхности и числом частиц поглощенного при ингаляции вещества.

При исследовании вдыхаемой фракции и компонентов, попадающих в дыхательные пути за пределы гортани, установлены следующие характеристики. Вероятность по вдыхаемой фракции частиц с аэродинамическим диаметром  $D$ , задается интегральным нормальным логарифмическим распределением с медианой  $\mu = 4,25$  мкм и геометрическим стандартным отклонением  $\sigma = 1,5$ . Для групп населения повышенного риска (детей и взрослых с определенными заболеваниями дыхательных путей) установлен второй норматив по респираторной и трахеобронхиальной фракциям. Значения  $E_R$  в процентах норматива по вдыхаемой фракции частиц, которые должны быть собраны при аэродинамическом диа-

метре  $D$ , мкм, задается интегральным нормальным логарифмическим распределением с медианой  $\mu=2,5$  мкм и геометрическим стандартным отклонением  $\sigma=1,5$ .



**Рисунок 1.** – Плотность распределения массовой доли по диаметрам частиц (в %) трахеобронхиальной фракции для взрослого населения ( $\mu = 4,25$  мкм;  $\sigma = 1,5$ )



**Рисунок 2.** – Плотность распределения массовой доли частиц по диаметрам (в %) трахеобронхиальной фракции для группы повышенного риска ( $\mu = 2,5$  мкм;  $\sigma = 1,5$ )

На рисунках 1, 2 изображены вероятности аккумуляции частиц аэрозоля в трахеобронхиальном отделе респираторного тракта в зависимости от размеров частиц, выраженные через массовую долю частиц для взрослого контингента и лиц из группы повышенного риска.

**Математическое моделирование распределения радиоактивных частиц аэрозоля во вдыхаемом воздухе.** В качестве тестового расчета выполнено моделирование воздействия газоаэрозольного выброса при аварии на АЭС с ВВЭР-1000. Выброс содержит радиоактивные благородные газы  $^{85m}\text{Kr}$ ,  $^{133,135}\text{Xe}$ , изотопы йода –  $^{131-135}\text{I}$ , изотопы цезия –  $^{134,137}\text{Cs}$ . Суммарная активность смеси изотопов йода равна  $1,5 \cdot 10^3$  ТБк. Суммарная активность смеси аэрозолей цезия  $2,9 \cdot 10^2$  ТБк.

Выполнено моделирование распределения частиц по размерам диаметров для аэрозолей йода и цезия для трех вариантов статистических характеристик. Распределение частиц по диаметрам во вдыхаемом воздухе описывается следующими статистическими характеристиками.

Вариант 1. Дисперсные характеристики газоаэрозольного выброса соответствуют «стандартному аэрозолю»: медиана  $\mu = 1$  мкм, геометрическое стандартное отклонение  $\sigma = 2$  (по условию, введенному в гигиеническом нормативе [4] для дозовых коэффициентов при пероральном поступлении).

Вариант 2. Дисперсный состав газоаэрозольного выброса описывается логарифмическим нормальным распределением с медианой  $\mu = 11,64$  мкм и геометрическим стандартным отклонением  $\sigma = 2$ .

Вариант 3. Дисперсный состав газоаэрозольного выброса описывается нормальным логарифмическим распределением с медианой  $\mu = 2,5$  мкм и геометрическим стандартным отклонением  $\sigma = 2$ .

Результаты моделирования с использованием логарифмически нормального распределения дисперсного состава аварийного выброса аэрозолей йода (изотопы  $^{131-135}\text{I}$ ) и цезия ( $^{134,137}\text{Cs}$ ) для трех указанных выше вариантов приведены в таблице 1. В силу неопределенности данным по дисперсным характеристикам газоаэрозольного выброса авторами рассмотрен диапазон от 0,03 до 100 мкм.

**Таблица 1. – Относительная доля частиц различных диаметров на шкале размеров от 0,03 до 100 мкм**

Диапазон диаметров частиц, мкм	$\mu=1$ мкм, $\sigma=2$	$\mu=11,6$ мкм, $\sigma=2$	$\mu=2,5$ мкм, $\sigma=2$
0,03–0,1	0,0008	—	—
0,1–0,3	0,0394	—	0,0012
0,3–1	0,4514	0,0004	0,0892
1–3	0,4476	0,0238	0,512
3–10	0,0608	0,3816	0,3738
10–30	—	0,508	0,0238
30–100	—	0,0862	—

В таблице 2 приведены распределения активностей аэрозолей йода и цезия, аккумулярованные на частицах с различными диаметрами.

**Таблица 2. – Распределение активности аэрозолей йода и цезия на частицах различных диаметров, Бк**

$D_{\text{част.}}, \text{мкм}$	$\mu=1$ мкм, $\sigma=2$		$\mu=11,6$ мкм, $\sigma=2$		$\mu=2,5$ мкм, $\sigma=2$	
	$^{(131-135)}\text{I}$	$^{134,137}\text{Cs}$	$^{(131-135)}\text{I}$	$^{134,137}\text{Cs}$	$^{(131-135)}\text{I}$	$^{134,137}\text{Cs}$
0,03–0,1	0.12E+13	0.23E+11	—	—	—	—
0,1–0,3	0.60E+14	0.11E+13	—	—	0.18E+13	0.34E+11
0,3–1	0.69E+15	0.13E+14	0.61E+12	0.11E+11	0.13E+15	0.26E+13
1–3	0.68E+15	0.13E+14	0.36E+14	0.68E+12	0.78E+15	0.15E+14
3–10	0.93E+14	0.17E+13	0.58E+15	0.11E+14	0.57E+15	0.11E+14
10–30	—	—	0.77E+15	0.14E+14	0.36E+14	0.68E+12
30–100	—	—	0.13E+15	0.24E+13	—	—

**Расчет доз внутреннего облучения от ингаляционного пути поступления радионуклидов с учетом дисперсного состава аэрозольной фракции выброса кодом RADRISK.** Расчет прогнозируемых доз облучения выполнен с использованием ПК RADRISK путем уточненной модели формирования ингаляционной дозы облучения. Для учета влияния распределения частиц по размерам (дисперсного состава) при ингаляции газоаэрозольного выброса выполнена модификация дозиметрической модели и модернизация ПК RADRISK в части учета вероятности перехода аэрозольных частиц из вдыхаемого воздуха в различные отделы дыхательного тракта ( $p_{tr}$ ).

В таблице 3 приведены эмпирические данные по скоростям оседания частиц, ис-

пользуемых в модели атмосферной диффузии радиоактивной примеси, полученные по данным работы [6].

Таблица 3. – Скорости оседания частиц в зависимости от диаметра частиц

Диаметр частиц, мкм	Скорость оседания, м/с
0–0,03	$0,87 \cdot 10^{-16} - 0,35 \cdot 10^{-14}$
0,03–0,1	$0,35 \cdot 10^{-14} - 8,7 \cdot 10^{-7}$
0,1–0,3	$8,7 \cdot 10^{-7} - 4,2 \cdot 10^{-6}$
0,3–1	$4,2 \cdot 10^{-6} - 35 \cdot 10^{-6}$
1–3	$3,5 \cdot 10^{-5} - 2,8 \cdot 10^{-4}$
3–10	$2,8 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}$
10–30	$3 \cdot 10^{-3} - 2,7 \cdot 10^{-2}$
30–100	$2,7 \cdot 10^{-2} - 3,0 \cdot 10^{-1}$

Модель формирования ингаляционной дозы облучения уточнена путем корректировки параметра – скорости вдыхания воздуха с учетом рассчитанной вероятности перехода  $p_{tr}$  аэрозольных частиц из вдыхаемого воздуха в различные отделы дыхательного тракта. Значение вероятности  $p_{tr}$  получено методом, известным в теории надежности, как метод «нагрузка» – «несущая способность», где в качестве «нагрузки» предложена вероятностная модель аэродисперсного состава источника (газоаэрозольного выброса), а в качестве «несущей способности» – восприимчивость отделов дыхательного тракта к аккумуляции аэрозоля различной дисперсности (по ГОСТ Р ИСО 7708-2006). Тестовые расчеты ингаляционной дозы облучения населения в аварийной ситуации в случае газоаэрозольного выброса выполнены с использованием модернизированного ПК RADRISK.

С использованием логарифмически-нормального закона выполнено математическое моделирование распределения частиц по размерам диаметров для аэрозоля, поступающего из воздуха, и для частиц, осаждаемых в различных отделах легких. Расчет доз облучения выполнен с учетом дозовых коэффициентов при пероральном поступлении радионуклидов, регламентированных Гигиеническим нормативом для различных категорий населения [1]. Тестовые расчеты ингаляционной дозы облучения населения в аварийной ситуации в случае газоаэрозольного выброса выполнены с использованием модернизированного ПК RADRISK.

Результаты моделирования ингаляционной дозы облучения приведены на рисунке 3–5. Значения ингаляционной дозы облучения  $D_{inh}$  в рассмотренных случаях приведены на оси следа. Во всех трех случаях дисперсные характеристики для фракций выброса изотопов йода и цезия соответствует «стандартному аэрозолю»: медиана распределения частиц по размерам диаметров  $\mu = 1$  мкм, геометрическое стандартное отклонение  $\sigma = 2$ .

На рисунке 3 приведена зависимость ингаляционной дозы облучения для лиц категории «дети», для которой распределение частиц по размерам диаметров в трахеобронхиальном отделе легких имеет медиану  $\mu = 2,5$  мкм и среднегеометрическое стандартное отклонение  $\sigma = 2$ . Для данного соотношения рассчитанная вероятность перехода частиц  $p_{tr} = 0,65$ . Максимальное значение ингаляционной дозы  $D_{inh}$  равно 3,0 мЗв (вклад в дозу изотопов йода равен 2,93 мЗв; цезия – 0,0431 мЗв).

На рисунке 4 приведена зависимость ингаляционной дозы облучения для лиц категории «взрослые», распределение числа частиц по размерам диаметров в трахеобронхиальном отделе легких имеет медиану  $\mu = 4,25$  мкм и среднегеометрическое стандартное отклонение  $\sigma = 2$ . Для данного соотношения оцененная вероятность перехода частиц  $p_{tr} = 0,53$ . Максимальное значение ингаляционной дозы облучения равно  $D_{inh} = 2,43$  мЗв (вклад в дозу изотопов йода равен 2,39 мЗв; цезия – 0,0352 мЗв).

На рисунке 5 приведена зависимость ингаляционной дозы облучения для лиц категории «взрослые», распределение числа частиц по размерам диаметров в торакальном отделе легких, имеет медиану  $\mu = 11,4$  мкм и среднегеометрическое стандартное отклонение  $\sigma = 2$ . Для данного соотношения оцененная вероятность перехода частиц  $p_{tr} = 0,4$ . Максимальное значение ингаляционной дозы облучения (на следе) равно  $D_{inh} = 1,83$  мЗв (вклад в дозу изотопов йода равен 1,81 мЗв; цезия – 0,0265 мЗв).

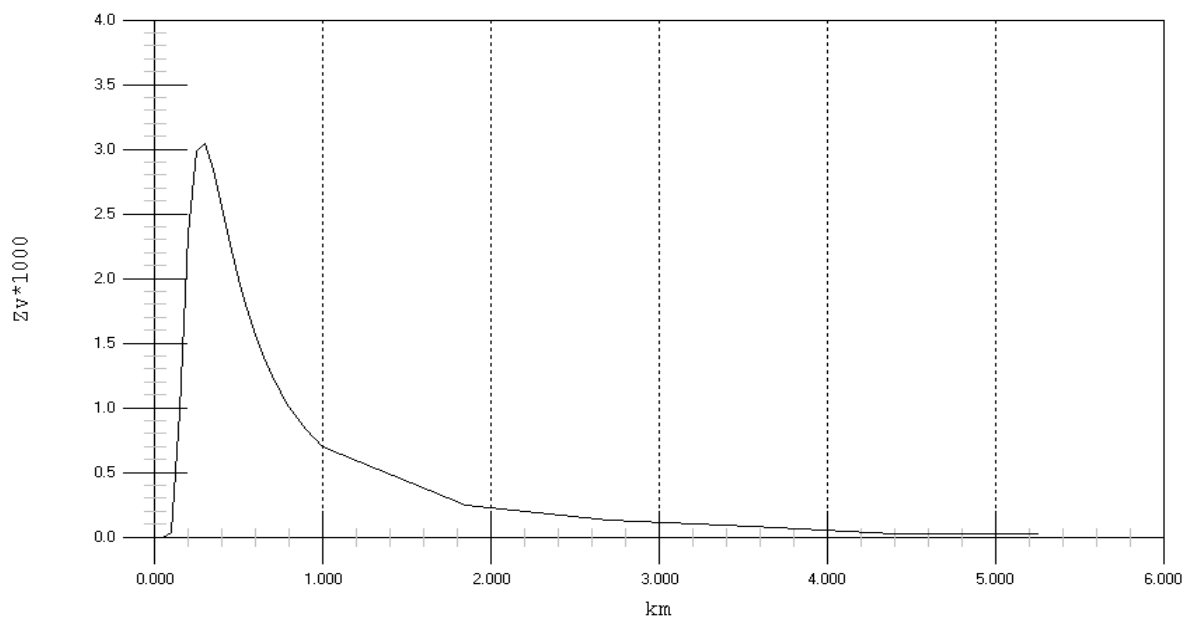


Рисунок 3. – Зависимость ингаляционной дозы облучения для лиц категории «ослабленные лица и дети» ( $ptr = 0,65$ ;  $\mu = 2,5$  мкм;  $\sigma = 2$ )

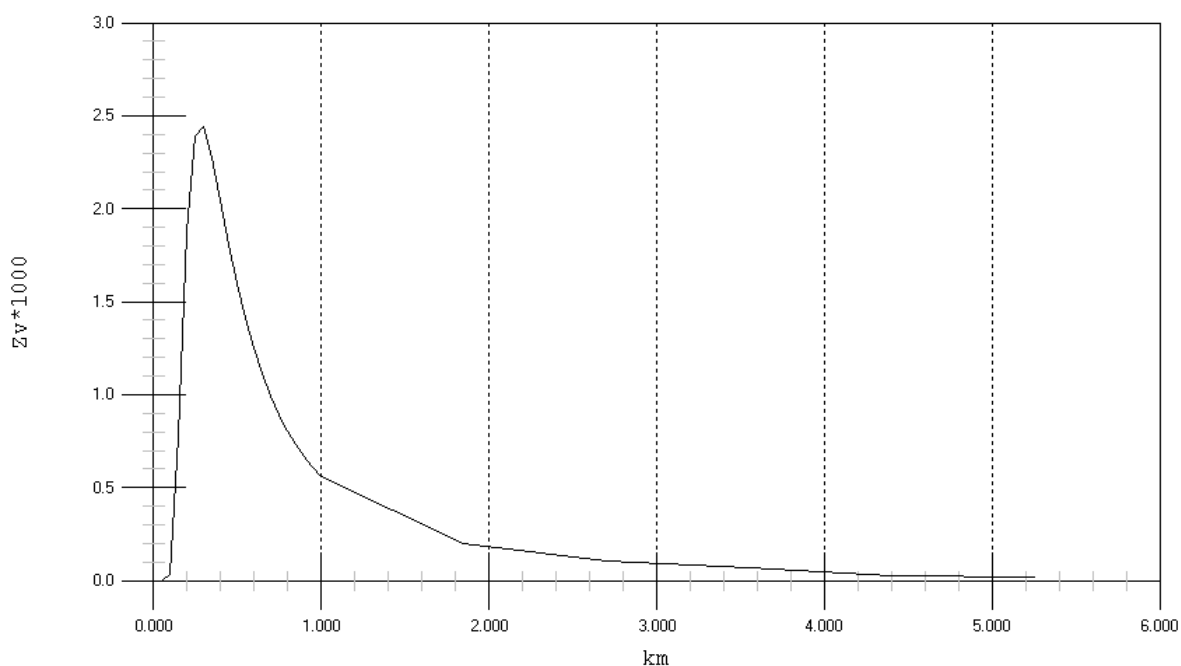
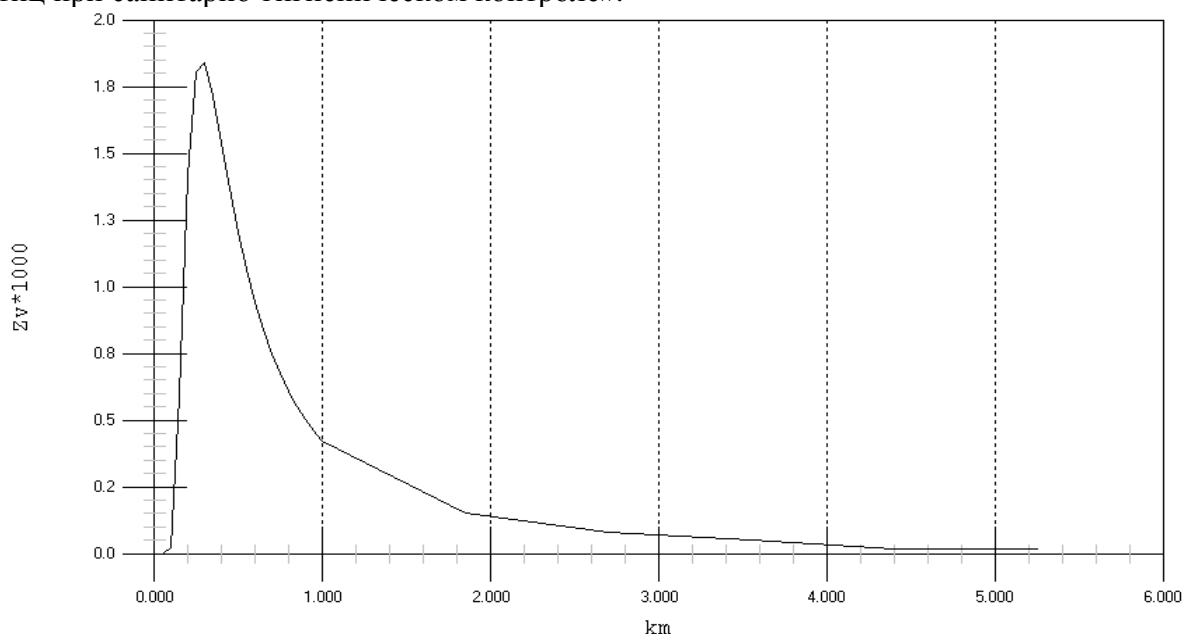


Рисунок 4. – Зависимость ингаляционной дозы облучения для категории «взрослые» облучение обусловлено осаждением частиц в трахеобронхиальном отделе легких ( $ptr = 0,53$ ;  $\mu = 4,5$  мкм;  $\sigma = 2$ )

Таким образом, методом математического моделирования с помощью доработанного ПК RADRISK установлена закономерность формирования ингаляционной дозы облучения при вдыхании аэрозоля радиоактивного выброса, обусловленная вероятностью перехода аэрозольных частиц из вдыхаемого воздуха в различные отделы дыхательного тракта. Данная вероятность определяется соотношением между статистическими характеристиками распределения радиоактивных частиц по размерам во вдыхаемом воздухе и осаждающихся в различных отделах дыхательного тракта.

**Заключение.** В данной работе представлен методический подход и математический аппарат, обеспечивающий учет восприимчивости различных отделов респираторного тракта человека к аккумуляции различных размеров частиц газоаэрозольного выброса. Значение вероятности перехода аэрозольных частиц из вдыхаемого воздуха в различные отделы дыхательного тракта  $p_{tr}$  получено методом, известным в теории надежности, как метод «нагрузка» – «несущая способность», где в качестве «нагрузки» предложена вероятностная

модель аэродисперсного состава источника (газоаэрозольного выброса), а в качестве «несущей способности» – восприимчивость отделов дыхательного тракта к аккумуляции аэрозоля различной дисперсности. Характеристики респираторного тракта описываются по ГОСТ Р ИСО 7708-2006 «Качество воздуха. Определение гранулометрического состава частиц при санитарно-гигиеническом контроле».



**Рисунок 5.** – Зависимость ингаляционной дозы облучения для категории «взрослые» – облучение обусловлено осаждением частиц в торакальном отделе легких ( $ptr = 0,4$ ;  $\mu = 11,4$  мкм;  $\sigma = 2$ )

Для учета вероятности перехода аэрозольных частиц из вдыхаемого воздуха в отделы дыхательного тракта при ингаляции газоаэрозольного выброса выполнена модификация стандартной модели формирования ингаляционной дозы облучения и модернизация на ее основе модуля, выполняющего расчет ингаляционной дозы ПК RADRISK.

Разработанный математический аппарат обеспечивает реалистичный прогноз ингаляционной дозы облучения на основе эмпирических либо экспертных оценок дисперсного состава аварийного выброса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection / ICRP Publication 66. – Ann. ICRP. – N 1/3.–1994.
2. Harbachova, N. Simulation model of disperse structure of the aerosol release in the AES-2006 licensing application of the code RADRISK / N. Harbachova // Technical Meeting on Best Estimate plus Uncertainty (BEPU) Methods in Safety Analyses: Proc. Technical Meeting on BEPU Methods in Safety Analysis, Pisa, Italy, June 10–14, 2013 / San Piero a Grado Nuclear Research Group University of Pisa. – IAEA, 2013.
3. Качество воздуха. Определение гранулометрического состава частиц при санитарно-гигиеническом контроле: ГОСТ Р ИСО 7708-2006. – Введ. 01.11.2006. – Минск: Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем, 2006.
4. Критерии оценки радиационного воздействия: Гигиенический норматив: утв. пост. Минист. здравоохр. Респ. Беларусь, 28 дек. 2012 г. № 213 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2013. – 8/26850.
5. Карев, А.Е. Применение соглашения о вдыхаемой, торакальной и респираторной фракциях (ГОСТ Р ИСО 7708-2006) для стационарного и индивидуального контроля объемной активности радиоактивных аэрозолей на предприятиях атомной отрасли / А.Е. Карев, А.Г. Цовьянов // Аппаратура и новости радиационного контроля. – 2015, № 4. – С. 43-50.
6. Уоррен, Р. Радиоактивность после Чернобыля. / Р. Уоррен. – М.: Мир, 1999. – 256 с.

## ACCOUNTING OF THE DISPERSED COMPOSITION OF THE INTRAFACED FRACTION AND THE REGULARITIES OF AEROSOL'S ACCUMULATION IN VARIOUS DEPOSITS OF THE RESPIRATORY TRACT WHEN CALCULATING DOSES OF INTERNAL IRRADIATION

Natallia Harbachova, Candidate of Technical Sciences

Mikalai Kulich

Natallia Kuzmina

State Scientific Institution «The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny» of NAS of Belarus, Minsk, Belarus

*Purpose.* The objective of the study was to establish by means of probabilistic simulation the radiation dose formation in connection with the probability of the transition of aerosol particles from the inhaled air to various sections of the respiratory tract.

*Methods.* The radiological inhalation model of the International Commission on Radiological Protection was modified taking into account the probability of the transition of aerosol particles from the inhaled air to different sections of the human respiratory tract. The computer code RADRISK was modified by the authors on the basis of the above mentioned inhalation model. Dependence of inhalation dose with the distribution of aerosol particles sizes was derived from probabilistic simulation with the use of code RADRISK.

*Application field of research.* Realistic forecast of radiological consequences to population in case of radiological accidents at nuclear power facilities.

*Conclusion.* The paper presents a methodical approach and a mathematical apparatus that takes into account the susceptibility of different parts of the human respiratory tract to different particle sizes accumulation of the radioactive aerosol release. To take into account the probability of the transition of aerosol particles from the inhaled air to human respiratory tract during inhalation of aerosol release, a standard model of an inhalation dose was modified and introduced into the code RADRISK.

*Keywords:* human respiratory tract, inhalation dose, distribution of aerosol particles sizes, probabilistic simulation.

(The date of submitting: June 7, 2017)

### REFERENCE

1. Human Repository Tract Model for Radiological Protection. *ICRP Publication 66. Ann. ICRP.* No. 1/3. 1994.
2. Harbachova N. Simulation model of disperse structure of the aerosol release in the AES-2006 licensing application of the code RADRISK. Technical Meeting on Best Estimate plus Uncertainty (BEPU) Methods in Safety Analyses: *Proc. Technical Meeting on BEPU Methods in Safety Analysis, Pisa, Italy*, June 10–14, 2013. San Piero a Grado Nuclear Research Group University of Pisa. IAEA, 2013.
3. Air quality. Particle size fraction definitions for health-related sampling.: *GOST R ISO 7708-2006.* Enter. 01.11.2006. Minsk: Nauchno-issledovatel'skij centr kontrolja i diagnostiki tehniceskikh sistem, 2006. (rus)
4. *Kriterii otsenki radiatsionnogo vozdeystviya: Gigienicheskiy normativ* [Radiation impact assessment criteria]: utv. postanovleniem Miniserstva zdravokhraneniya Resp. Belarus' ot 28.12.2012 No. 213. Nats. reestr pravovykh aktov Resp. Belarus'. 2013, 8/26850. (rus)
5. Karev A.E., Tsov'yanov A.G. Primenenie soglasheniya o vdykhaemoy, torakal'noy i respirabel'noy fraktsiyakh (GOST R ISO 7708-2006) dlya stacionarnogo i individual'nogo kontrolya ob'emnoy aktivnosti radioaktivnykh aerorozley na predpriyatiyakh atomnoy otrasli [Application of an agreement on inhaled, thoracic and respirable fractions (GOST R ISO 7708-2006) for stationary and individual monitoring of volumetric activity of radioactive aerosols at nuclear enterprises]. *Apparatura i novosti radiacionnogo kontrolja.* 2015, No. 4. Pp. 43-50. (rus)
6. Uorren R. *Radioaktivnost' posle Chernobylya* [Radioactivity after Chernobyl]. Moscow: Mir, 1999. 256 p. (rus)