

## ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ОБЛАКА ПРИ ВЫБРОСАХ АЭС

© 2018 А.И. Ксенофонов, А.П. Елохин, Е.А. Алалем

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

Рассматривается применение интегрального и метода Монте-Карло в задачах радиационного мониторинга окружающей среды. В качестве таковых рассматриваются задачи оценки мощности дозы внешнего облучения, создаваемой инертными радиоактивными газами при их выбросе через венттрубу АЭС в условиях планового профилактического ремонта и радиационной аварии; оценка полной объёмной активности ИРГ в выбросе и другие характеристики, связанные с использованием  $\gamma$ -детекторов автоматизированной системы контроля радиационной обстановки окружающей среды и беспилотных дозиметрических комплексов, используемых в рамках этой системы. С целью оценки корректности расчётов методом Монте-Карло проводится сравнение результатов расчётов указанным методом с аналогичными характеристиками, полученными интегральным методом, которые показали удовлетворительное согласие.

*Ключевые слова:* радиационный выброс на АЭС, мощность дозы внешнего облучения, ионизирующее излучение, радиоактивное загрязнение окружающей среды, метод Монте-Карло, интегральный метод, радиационный мониторинг, АЭС в Иордании.

Поступила в редакцию: 24.05.2018

Расчётные оценки радиационных характеристик радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере в результате радиационных аварий, на АЭС или других объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) требуют знания как метеопараметров атмосферы, характеризующих её состояние устойчивости, функциональную зависимость объёмной активности от величины последних, так и непосредственно радиационных характеристик самой примеси, определяемых радионуклидным составом, величиной полной активности и энергией  $\gamma$ -излучения.

Таблица 1 – Усреднённые характеристики метеопараметров [1] [Averaged characteristics of meteorological parameters]

Сезон времени года	$\bar{u}$ , м/с	$\bar{k}$ , м <sup>2</sup> /с	$\bar{b}$ , м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	$L$ , м	$\nu^*$
Зима, 20:00	3,057	0,684	0,041	17	0,139
Весна, 20:00	3,836	11,743	1,129	-5	0,232

В работе [1] для определения функциональной зависимости объёмной активности радиоактивной примеси от координат  $q(x, y, z)$  и метеопараметров атмосферы в рамках модели её приземного слоя [2, 3] проводился расчет метеорологических характеристик указанного слоя атмосферы (скорости приземного ветра  $u(z)$ , коэффициента турбулентной диффузии  $k(z)$  и энергии турбулентных пульсаций  $b(z)$  как функций высоты  $z$ ), основанных на показаниях метеодатчиков, измеряющих температуру и скорость приземного ветра на нескольких уровнях (высотах), включая температуру уровня земли, при использовании методики градиентных наблюдений. С целью получения наиболее простого решения уравнения турбулентной диффузии, описывающего перенос примеси в атмосфере в рамках её приземного слоя, функциональные зависимости указанных метеорологических параметров усреднялись по высоте и в уравнении использовались их средние величины  $\bar{b}$ ,  $\bar{k}$ ,  $\bar{u}$  как постоянные коэффициенты [4, 5], представленные в таблице 1, в которой  $L$ ,  $\nu^*$  – масштаб приземного слоя атмосферы (масштаб Монина-Обухова) и

динамическая скорость соответственно. Окончательно, ограничиваясь долгоживущими радионуклидами, объемную активность газоаэрозольной радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, вычисляли по формуле (1), в которой выражение  $\exp(-y^2/2\sigma_y^2(x))/\sqrt{2\pi\sigma_y(x)}$ , описывает гауссово (поперечное) уширение струи, определяемое выражением (2), в котором  $\sigma_y(x)$  – её дисперсия;  $S(x, z)$  – двумерная функция распределения примеси [2], определяемая выражением (3) [4, 5]:

$$q(x, y, z) = \frac{S(x, z)}{\sqrt{2\pi\sigma_y(x)}} \exp(-y^2/2\sigma_y^2) \quad (1)$$

$$\sigma_y^2(x) = \bar{b}x^2/\bar{u}^2(1 + ax\bar{b}/\bar{k}\bar{u}) \quad (2)$$

где  $a = 0,015$ ;

$$S(x, z) = \frac{M}{2} \exp\left(-\left[\frac{\sigma_0 x}{\bar{u}} + \frac{w^2 x}{4\bar{k}\bar{u}} + \frac{w(z - h_{эф})}{2\bar{k}}\right]\right) \left\{ \frac{\exp(-[z + h_{эф}]^2 \bar{u}/4\bar{k}x) + \exp(-[z - h_{эф}]^2 \bar{u}/4\bar{k}x)}{\sqrt{\pi\bar{k}x}} - \frac{(2\beta - w)}{\bar{k}\bar{u}} \exp\left[-\frac{(2\beta - w)(z + h_{эф})}{2\bar{k}} + \left(\frac{2\beta - w}{2\bar{k}}\right)^2 \frac{\bar{k}x}{\bar{u}}\right] \times \right. \quad (3)$$

$$\left. \times \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{2\beta - w}{2\bar{k}}\right)\sqrt{\bar{k}x/\bar{u}} + \frac{(z + h_{эф})}{2\sqrt{\bar{k}x/\bar{u}}}\right] \right\}$$

где  $M$  – величина мощности выброса (Бк/с);

$w$  – гравитационная скорость осаждения радиоактивной примеси (м/с);

$\sigma_0$  – постоянная вымывания примеси из атмосферы (1/с);

$\beta$  – скорость сухого осаждения примеси (м/с);

$h_{эф}$  – эффективная высота выброса (м) (рис. 1).

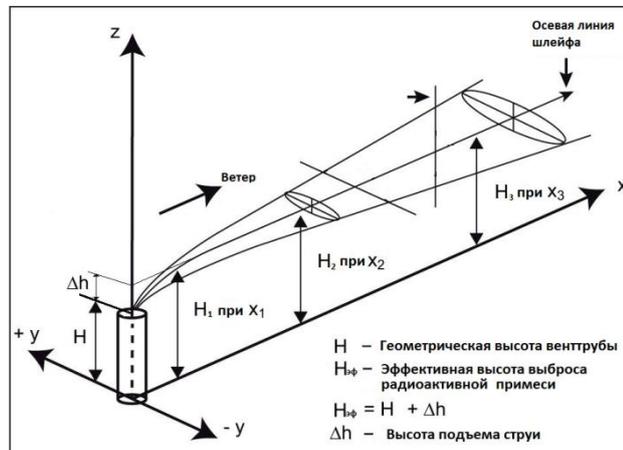


Рисунок 1 – Геометрия расчёта объемной активности радиоактивной примеси при формировании факела выбросов из вентиляционной трубы АЭС [Geometry of calculation of radioactive admixture volumetric activity at formation of emission plume out of NPP ventilation pipe]

## ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД

Расчёт указанных характеристик интегральным методом [6], при котором область распределения радиоактивной примеси (область определения функции), распространяющейся в атмосфере, представляют в виде совокупности элементарных источников с соответствующими текущими координатами, в каждом из которых распределение примеси предполагают равномерным, задают расстояние  $r$ , определяемое формулой (4) между точкой детектирования и соответствующим элементарным источником, и находят величину мощности дозы как интеграл от совокупности точечных

источников по формуле (5).

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}, \quad (4)$$

где  $x, y, z$  – текущие координаты;

$x_0, y_0, z_0$  – координаты точки детектирования.

$$D'(x_0, y_0, z_0) = \frac{E \cdot \eta \cdot \mu_a}{4\pi} \cdot \int_V B(E, r) \cdot q(x, y, z) \cdot \frac{e^{-\mu r}}{r^2} dV, \quad (5)$$

где  $E$  – энергия фотонов;

$\eta$  – квантовый выход;

$B(E, r)$  – фактор накопления для бесконечной или полубесконечной среды [7];

$\mu_a, \mu$  – линейные коэффициенты поглощенной энергии и ослабления  $\gamma$ -излучения соответственно;

$V$  – область определения подынтегральной функции.

## МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО

В настоящее время основные методы расчета мощностей доз от радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, а также воздушного бассейна, служащие для оценки мощностей доз внешнего облучения, основаны либо на концепции лучевого равновесия [8], либо, в лучшем случае, на интегральных методах с учётом фактора накопления [6]. Оценку мощности дозы при радиоактивном загрязнении воздушного бассейна в рамках концепции лучевого равновесия целесообразно проводить на расстояниях от источника выбросов свыше 700 м, а на меньших расстояниях – интегральным методом [4]. При этом основная погрешность расчётной оценки будет определяться, как корректностью расчётной функции распределения радиоактивной примеси, определяемой формулами (1)-(3), поскольку она содержит ряд метеопараметров, измеряемых с определённой погрешностью, так и погрешностью расчёта фактора накопления в случае применения его в виде табличных данных или аппроксимации в виде аналитического выражения, о чём говорилось выше.

Одним из перспективных методов решения поставленной задачи является метод Монте-Карло (ММК), представляющий собой численное моделирование физического процесса распространения фотонного излучения в среде, в основе которого лежит случайность события рассеяния фотона, независимая от его предыстории [9-12]. ММК свободен от недостатков, характерных для интегрального метода, но, к сожалению, требует значительно большего расчётного времени, поскольку для уменьшения погрешности расчёта ему необходима большая статистика, которая обеспечивается большим количеством историй, в качестве которых рассматривается случайный выбор элементарных источников, формирующих пространство радиоактивного загрязнения окружающей среды при выбросе радиоактивной примеси. Однако технические возможности существующей ныне вычислительной техники позволяют использовать этот метод без каких-либо ограничений. Непосредственное применение ММК для задач радиационного контроля окружающей среды проводилось в работах [13-15].

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

При расчете мощности дозы внешнего облучения от объемного источника – облака радиоактивной примеси – следует уделять серьезное внимание уточнению распределений

указанного функционала в области малых (промплощадка АЭС) расстояний от источника. Интерес к этой области расстояний обусловлен тем, что в ней наблюдается высокий градиент в распределении приземной концентрации радиоактивной примеси, в связи с чем нарушаются условия лучевого равновесия [4] (см. рис.2), что, в свою очередь, может привести к значительной погрешности при оценке величины мощности дозы. Наибольшее согласие расчетов наблюдается на расстояниях от 0,7 до ~ 10 км от источника, т.е. за зоной максимума приземной концентрации радиоактивной примеси. При расстояниях, меньших 0,7 км, не выполняется условие лучевого равновесия, а потому предпочтение следует отдать расчетам по методу Монте-Карло и интегральному методу.

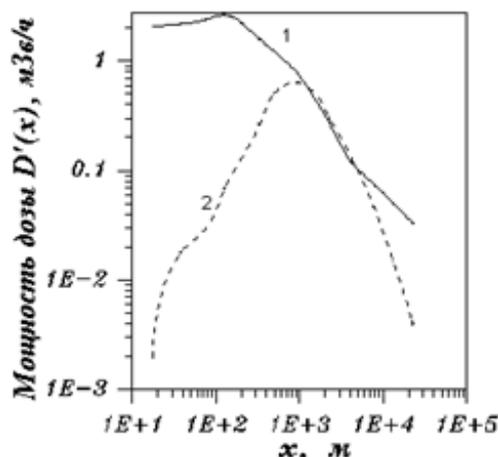


Рисунок 2 – Распределение мощности дозы как функции расстояния от источника (факела выбросов) при гипотетической аварии на оси следа [4]: 1 – расчёт интегральным методом; 2 – расчёт в рамках концепции лучевого равновесия [The distribution of dose rate as a function of the distance from the source (emission plume) at a hypothetical accident on the track axis: 1 – calculation by an integral method; 2 – calculation within the beam equilibrium concept]

На рисунке 3 приведены распределения мощности дозы от объемного источника (факела выбросов) на его оси в условиях выброса  $^{85}\text{Kr}$  для устойчивого состояния атмосферы (зима), (кривая 1) и неустойчивого (весна), (кривая 2). Расчеты проводились с использованием интегрального метода. Область максимума на кривых соответствует высокой плотности радиоактивной примеси, возникающей в атмосфере на небольших расстояниях от источника. По мере рассеяния примеси мощность дозы падает, что и демонстрируют кривые 1 и 2. Что же касается ярко выраженного характера распределения мощности дозы при различных состояниях устойчивости атмосферы, то этот факт объясняется существенно различным распределением радиоактивной примеси в атмосфере, т.е. характером распределения функции  $q(x,y,z)$ , определяемой выражением (1), при различных состояниях устойчивости атмосферы.

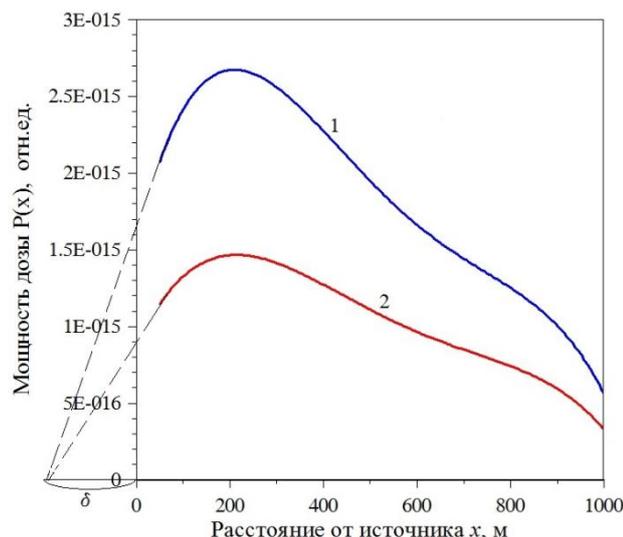


Рисунок 3 – Распределение мощности дозы  $P(x)$  как функции расстояния  $x$  от источника (факела выброса при гипотетической аварии) на оси следа при использовании интегрального метода для устойчивого (зима), кривая (1) и не-устойчивого (весна), кривая (2) состояний атмосферы.  $\delta$  – область, в которой мощность дозы внешнего облучения определена рассеянной и нерассеянной компонентами  $\gamma$ -излучения при отсутствии в ней объёмной активности [The distribution of the dose rate  $P(x)$  as a function of the distance  $x$  from the source (emission plume at a hypothetical accident) on the track axis using the integral method for stable (winter), curve (1) and non-stable (spring), curve (2) atmosphere.  $\delta$  is the area where the dose rate of external irradiation is determined by the scattered and unscattered components of the  $\gamma$ -radiation in the absence of volume activity in it]

На рисунках 4, 5 приведены результаты расчётов мощности дозы для устойчивого (рис. 4) и неустойчивого (рис. 5) состояний атмосферы интегральным методом (кривая 1) и ММК (кривая 2) на указанных рисунках.

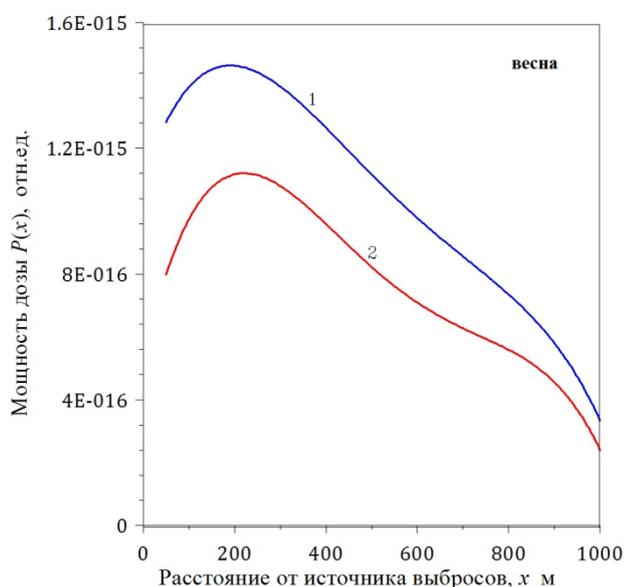


Рисунок 4 – Распределение мощности дозы  $P(x)$  как функции расстояния  $x$  от источника (факела выбросов при гипотетической аварии) на оси следа для устойчивого состояния атмосферы (зима) при использовании интегрального метода, кривая (1) и метода Монте-Карло, кривая (2) [The distribution of the dose rate  $P(x)$  as a function of the distance  $x$  from the source (emission plume at a hypothetical accident) on the track axis for the atmosphere steady state (winter) using the integral method, the curve (1) and the Monte Carlo method, curve (2)]

При формировании кривых имеет место два взаимоисключающих эффекта – это накопление объёмной активности в атмосфере и её рассеивание как за счёт сноса воздушным потоком, так и за счёт поперечного гауссова уширения факела выбросов, что

отмечалось выше.

В целом результаты расчётов, проведённые тем и другим методом, удовлетворительно согласуются, но значительно лучше с ростом расстояний  $\sim 700$  м. Спад мощности дозы с ростом расстояний обусловлен, уменьшением объёмной активности радиоактивной примеси, возникающей за счёт её гауссового уширения, которое увеличивается с ростом расстояния  $x$ , а также за счёт её уменьшения в результате ветрового переноса. Рассеяние радиоактивной примеси с ростом расстояния приводит к её более равномерному распределению в атмосфере, а при расчёте методом Монте-Карло в этом случае не требуется большого числа историй. На таких расстояниях оценку мощности дозы уже можно получить в рамках концепции лучевого равновесия, что и демонстрируют результаты рисунка 2. Напротив, на малых расстояниях от источника выбросов плотность распределения объёмной активности значительно выше, чем на больших, а объём, занимаемой ею, значительно меньше. В результате в этой области для оценки мощности дозы требуется значительно больше историй, чем на больших расстояниях от источника. На это указывает тот факт, что как при устойчивом, так и при неустойчивом состояниях атмосферы в области небольших  $x$ , например, в области максимума кривых отличие результатов расчётов составляет от 30 до 40%, а на больших расстояниях расхождение незначительно.

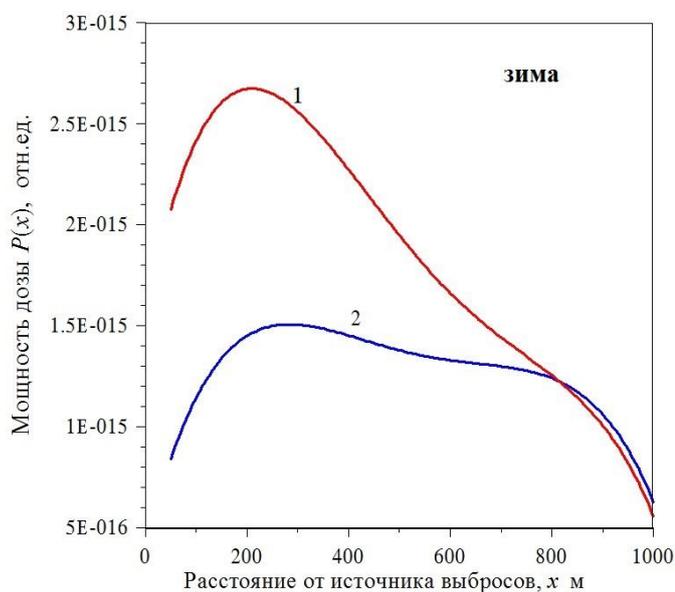


Рисунок 5 – Распределение мощности дозы  $P(x)$  как функции расстояния  $x$  от источника (факела выбросов при гипотетической аварии) на оси следа для неустойчивого состояния атмосферы весна при использовании интегрального метода, кривая (1) и метода Монте-Карло, кривая (2) [The distribution of the dose rate  $P(x)$  as a function of the distance  $x$  from the source (the emission plume during a hypothetical accident) on the track axis for the unstable atmosphere state (spring) using the integral method, the curve (1) and the Monte Carlo method, curve (2)]

Таким образом, несмотря на то, что величина приземной концентрации радиоактивной примеси вблизи высотного источника незначительна, что обеспечивает лишь небольшое значение ингаляционной дозы для персонала, мощность дозы внешнего облучения может быть большей за счет прямого воздействия (нерассеянного) фотонного излучения самого источника, что необходимо учитывать при проведении работ на промплощадке при ликвидации аварии на АЭС. Кроме того, сравнивая результаты расчётов вблизи источника, следует констатировать, что расчёты мощности дозы в этой области действительно не следует проводить, основываясь на концепции лучевого равновесия.

Следует также обратить внимание на значение мощности дозы в области

отрицательных значений  $x$  на рисунках 3-5, т.е. в области  $\delta$  за венттрубой. Отсутствие радиоактивной примеси в этой области, поскольку её сдувает ветром в область больших  $x$ , говорит лишь о том, что ингаляционная доза в указанной области равна нулю, но мощность дозы внешнего облучения, строго говоря, в ней будет отлична от нуля за счет рассеянного и нерассеянного  $\gamma$ -излучения радиоактивной примеси, поскольку оно изотропно. Оценку величины области  $\delta$ , в которой мощность дозы внешнего облучения может быть отлична от нуля нетрудно получить путем линейной экстраполяции значений мощности дозы, приведенных на рисунке 3 при соответствующем состоянии устойчивости атмосферы.

Одной из основных характеристик радиоактивных выбросов является величина мощности выброса  $M$  (Ки/с), входящая в решение уравнения турбулентной диффузии (3). Действительно, будучи константой, эта величина играет роль нормировочного множителя, поскольку во всех функционалах вида (5) она будет представлять собой просто постоянную, которая выносится из-под знака интеграла. Чтобы убедиться в этом, достаточно объёмную активность  $q(x, y, z)$  в (3) представить в виде выражения (1), в котором функция  $S(x, z)$  будет представлена формулой (3). Значение этого параметра трудно переоценить, учитывая, что все характеристики радиоактивного загрязнения окружающей среды в виде воздушного бассейна и подстилающей поверхности или дозовых нагрузок на персонал и население будут зависеть от величины объёмной активности  $q(x, y, z)$ , т.е. от указанного параметра.

Учитывая указанные особенности, оценку этой величины можно получить путём сравнения измеряемой величины мощности дозы и её расчётного значения, определяемого формулой (5). Наиболее просто это можно осуществить, если детектор будет расположен в области, в которой распределение объёмной активности можно считать равномерным. Действительно, измеряя значение мощности дозы, в этом случае, одним из  $\gamma$ -детекторов системы АСКРО с координатами  $(x_0, y_0, z_0)$ , число которых подчиняется правилу необходимого и достаточного их количества, а размещение на территории промплощадки и СЗЗ – правилу их разновеликого расстояния от центра и равномерного распределения по азимуту, например по спирали Архимеда [1], искомый параметр  $M$  можно найти в виде отношения:

$$M = \frac{4\pi D'(x_0, y_0, z_0)}{E \cdot \eta(E) \cdot \mu_a(E) \cdot q_0 \cdot \int_V B(E, r) \left[ \exp(-\mu(E)r/r^2) \right] dV}, \quad (6)$$

где распределение  $q(x, y, z)$  можно считать равномерно распределённым и равным  $q_0$ .

Измеряемыми параметрами в этой формуле кроме  $D'(x_0, y_0, z_0)$  являются – энергия  $\gamma$ -излучения  $E$  и объёмная активность  $q_0$ , которая может быть определена аспирационным детектором. При определении параметра  $M$  все остальные характеристики радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на население могут проводиться при единичной мощности выброса, а при получении их абсолютного значения умножаться на полученный параметр. Таким образом, мы можем избавиться от значительной погрешности или неопределённости, которая характерна для большинства метеорологических моделей, и констатировать, что наши оценки осуществляются не хуже, чем погрешность дозиметрии, что и определяет преимущество гибридного мониторинга окружающей среды.

Другая возможность оценки объёмной активности  $q_0$  (Ки/м<sup>3</sup>) при известном её радионуклидном составе состоит в непосредственном использовании венттрубы, из которой осуществляется выброс ИРГ известного радионуклидного состава в период ППР. В этом случае, оценивая величину мощности дозы  $D'$  от цилиндрического газообразного равномерно распределённого источника, который представляет собой внутренняя область венттрубы, и, сравнивая её с аналогичной расчётной, вычисляемой, например, в центре

последней, искомым параметр  $q_0$  найдём как отношение:

$$q_0 = \frac{4\pi D'(x_0, y_0, z_0)}{E \cdot \eta(E) \cdot \mu_a(E) \int_{V_C} [\exp(-\mu(E)R)/R^2] dV}, \quad (7)$$

где  $R = \sqrt{(h_{\text{эф}} - h)^2 + r^2}$ ,

$$dV = 2\pi r dr dh,$$

область  $V_C$  характеризуется областью определения:

$$0 \leq h \leq h_{\text{эф}}; 0 \leq r \leq r_0, \quad r_0 - \text{внутренний радиус венттрубы.}$$

В этом случае фактор накопления, согласно [4], можно принять равным 1. Если секундный расход  $G$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) выброса радиоактивной примеси через устье венттрубы известен, (например, он может быть измерен с помощью проточной и непроточной ионизационных камер, размещаемых в устье венттрубы [16]), то мощность выброса  $M$  может быть найдена как произведение  $G \times q_0$  (Ки/с), а умножая произведение на продолжительность выброса  $\tau_v$ , найдём величину полной активности радионуклидов, выброшенных в атмосферу.

$$Q_0 = G \times q_0 \times \tau_v \quad (\text{Ки}) \quad (8)$$

Преимущество приведенных методов оценки рассмотренных выше радиационных характеристик состоит в том, что они позволяют определить эти параметры в режиме реального времени (on-line).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алалем, Е.А.* Метеорологические характеристики района АЭС в Иордании [Текст] / Е.А. Алалем, А.П. Елохин, А.И. Ксенофонтов, П.И. Федоров // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 3 (24) – С. 19-34.
2. *Лайхтман, Д.Л.* Физика пограничного слоя атмосферы [Текст] / Д.Л. Лайхтман. – Ленинград: Гидромет. изд-во, 1970. – 340 с.
3. *Бобылева, М.М.* Расчет характеристик турбулентности в планетарном пограничном слое атмосферы [Текст] / М.М. Бобылева // Труды Ленинградского Гидрометеорологического института. Вып. 40 (Некоторые вопросы физики пограничного слоя в атмосфере и море). – Ленинград, 1970 – С. 64-73.
4. *Елохин, А.П.* Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды: монография [Текст] / А.П. Елохин. – М-во образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
5. By Alexander P. Elokhin and Ilia A. Starodubtcev. On the Ecological Situation at the Territories Adjacent to Chemical and Metallurgical Facilities. (Subtitle: Using Sensors and an Automated Control System to Monitor Environmental Conditions). Environmental Quality Management (USA) 2017. Вып. 26, № 2. С. 23-43.
6. Метеорология и атомная энергия [Текст] / пер. с англ. ; под ред. Н.Л. Бызовой и К.П. Махонько. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1971. – 618 с.
7. *Машкович, В.П.* Защита от ионизирующих излучений. Справочник [Текст] / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.
8. *Гусев, Н.Г.* Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник [Текст] / Н.Г. Гусев, В.А. Беляев. Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
9. Метод Монте-Карло в проблеме переноса излучений [Текст] / под ред. чл.-кор. АН СССР Г.И. Марчука. – Москва : Атомиздат, 1967. – 256 с.
10. Leimdorfer M. On the Use of Monte-Carlo Methods for Solving Gamma Radiation Transport Problems // Nukleonik, 1964. V. 6. P. 14.
11. *Золотухин, В.Г.* Поле излучения точечного мононаправленного источника гамма-квантов [Текст] / В.Г. Золотухин [и др.]. – Москва: Атомиздат, 1974. – 160 с.
12. *Соболев, И.М.* Численные методы Монте-Карло [Текст] / И.М. Соболев. – Москва : Наука, 1973.

13. *Елохин, А.П.* Метод оценки последствий радиационных аварий в помещениях реакторного блока на АЭС с реактором ВВЭР – 1000 [Текст] / А.П. Елохин, А.Н. Хмылёв, М.В. Жилина // Атомная энергия. – 2007. – т. 102, вып. 4. – С. 254-262.
14. *Жилина, М.В.* Применение метода Монте-Карло в задачах радиационного мониторинга окружающей среды [Текст] / М.В. Жилина // Экологические системы, приборы. – 2010. – № 10. – С. 3-12.
15. *Елохин, А.П.* Особенности сканирования подстилающей поверхности с помощью беспилотного дозиметрического комплекса [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, П.А. Пархома // Атомная энергия. – 2009. – т. 107, вып. 2. – С. 103-112.
16. *Елохин, А.П.* Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки окружающей среды: учеб. пособие [Текст] / А.П. Елохин. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2012. – 316 с.

#### REFERENCES

- [1] Alalem E.A., Elokhin A.P., Ksenofontov A.I., Fedorov P.I. Meteorologicheskie karakteristiki rayona AES v Iordanii [Meteorological Characteristics of Planned Nuclear Power Plant in Jordan]. Globalnaya yadernaya bezopasnost. [Global Nuclear Safety]. No. 3 (24). 2017. P. 19-34 (in Russian).
- [2] Laihtman D.L. Fizika pogranchnogo sloya atmosfery [Physics of Atmosphere Boundary Layer]. Leningrad: Gidromet. Izdatelstvo [Hydromet Publish House]. 1970. 340 p. (in Russian).
- [3] Bobyleva M.M. Raschet karakteristik turbulentsnosti v planetarnom pogranchnom sloye atmosfery [Calculation of Turbulence Characteristics in Atmosphere Planetary Boundary Layer]. // Leningrad Hydrometeorological Institute. vipusk 40 (Nekotore voprosi fiziki pogranchnogo sloya v atmosfere i more) [Issue 40 (Some questions of the Physics of Boundary Layer in the Atmosphere and Sea)]. Leningrad. 1970. P. 64-73 (in Russian).
- [4] Elokhin A.P. Metodi i sredstva system radiacionnogo kontrolya okrujayushey sredi. Monografiya [Methods and Instrumentations of Radiation Monitoring Systems of the Environment: Monograph] / ministry of education and Science of the Russian Federation, National Research Nuclear University «MEPhI». Moscow: NRNU MEPhI. 2014. 520 p. (in Russian).
- [5] Alexander P. Elokhin and Ilia A. Starodubtcev. On the Ecological Situation at the Territories Adjacent to Chemical and Metallurgical Facilities. (Subtitle: Using Sensors and an Automated Control System to Monitor Environmental Conditions). Environmental Quality Management (USA). 2017. Vol. 26. № 2. P. 23-43.
- [6] Meteorologiya i atomnaya energiya [Meteorology and Atomic Energy]. Perevod s anglijskogo; pod redakciej N.L. By'zovoj i K.P. Maxon'ko [Translated from English; edited by N. L. Buzova and K.P. Makhonko]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1971. 618 p. (in Russian).
- [7] Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. Zashita ot ioniziruyushih izlucheny [Shielding from Ionizing Radiation]. Manual. Moscow: Energoatomizdat. 1995. 496 p. (in Russian).
- [8] Gusev N.G., Belyaev V.A. Radioaktivniye vibrosi v biosfere [Radioactive Dispersion in the Biosphere]. Reference. Moscow: Energoatomizdat. 1986. 224 p. (in Russian).
- [9] Metod Monte-Carlo v probleme perenosa izlucheny [Monte Carlo Method in the Problem of Radiation Transfer]. Ed. member-cor. Academy of Sciences of the USSR Marchuk. Moscow: Atomizdat. 1967. 256 p. (in Russian).
- [10] Leimdorfer M. On the Use of Monte-Carlo Methods for Solving Gamma Radiation Transport Problems. Nukleonik. 1964. V. 6. P. 14.
- [11] Zolotukhin V.G., Kimel L.R., Ksenofontov A.I. Pole izlucheniya tochechnogo mononapravlennoogo istochnika gamma-kvantov [The Radiation Field of Point Mono-Directed Source of Gamma Quanta]. Moscow: Atomizdat. 1974. 160 p. (in Russian).
- [12] Sobolev I.M. Chislenniye metodi Monte-Carlo [Numerical Monte Carlo methods]. Moscow: Nauka. 1973. 311 p. (in Russian).
- [13] Elokhin A.P., Khmylov A.N., Zhilina M.V. Metod ocenki posledstviy radiacionnih avariyy v pomesheniyah reaktornogo bloka AES s reaktorom VVER – 1000 [Method for Assessing the Consequences of Radiation Accidents in the Premises of Reactor Unit at Nuclear Power Plant with VVER-1000 Reactor]. Atomic energy. 2007. Vol. 102. Issue 4. P. 254-262 (in Russian).
- [14] Zhilina M.V. Primeneniye metoda Monte-Carlo v zadachah radiacionnogo monitoringa okrujayushey sredi [Application of the Monte Carlo Method in Problems of Radiation Monitoring of the Environment]. Ekologicheskie sistemy, pribory [Ecological Systems, Devices]. 2010. № 10. P. 3-12 (in Russian).
- [15] Elokhin A.P., Zhilina M.V., Parkhoma P.A. Osobennosti skanirovaniya podstilayushey poverhnosti s pomoshchuyu bespilotnogo dozimetricheskogo kompelksa [Features of Scanning the Underlying Surface with Unmanned Dosimetry Complex] [Atomic Energy]. 2009. T. 107. Vol. 2. P. 103-112 (in Russian).
- [16] Elokhin A.P. Avtomatizirovanniye sistemi kontrolya okrujayushey obstanovki okrujayushey sredi [Automated Systems for Monitoring the Radiation Environment of the Environment]. Tutorial. National

## **Applications of Monte Carlo Simulation for Analyzing $\gamma$ -Radiation Characteristics of Radioactive Cloud Radiation in NPP Emissions**

**A.I. Ksenofontov<sup>1</sup>, A.P. Elokhin<sup>2</sup>, E.A. Alalem<sup>3</sup>**

*National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Kashirskoye Shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

<sup>1</sup>*ORCID iD: 0000-0002-6864-9805*

*Wos Researcher ID: H-1833-2017*

*e-mail: AIKsenofontov@mephi.ru*

<sup>2</sup>*ORCID iD: 0000-0002-7682-8504*

*Wos Researcher ID: G-9573-2017*

*e-mail: elokhin@yandex.ru*

<sup>3</sup>*ORCID iD: 0000-0002-7207-5939*

*Wos Researcher ID: G-9489-2017*

*e-mail: issaalem2@yahoo.com*

**Abstract** – Monte Carlo method is applied to assess the radiological risks to the environment. Determining the dose rates due to external radiation generated by radioactive inert gases when they are released from a nuclear power plant is discussed. The paper considers the estimation of volumetric concentrations of the released radioactive inert gases, and other characteristics associated with the use of gamma detectors of the automated radiation monitoring systems of the environment and unmanned aircraft radiometric system.

In order to assure the reliability and the accuracy of the calculation by the Monte Carlo method for predicting the dose rates, the results are compared by this method with similar characteristics obtained by the integral method, which showed satisfactory agreement.

*Keywords:* radiation accident, dose rate of external radiation, ionizing radiation, radioactive dispersion, Monte Carlo method, integral method, radiation monitoring, Jordan nuclear power plant.