

**ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**
NUCLEAR, RADIATION AND
ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 539.1 : 504.05
DOI 10.26583/gns-2023-01-02
EDN KFEKZC

**ЗАРАЖЕНИЕ МЕСТНОСТИ ВСЛЕДСТВИЕ СУХОГО ОСЕДАНИЯ
И ВЫМЫВАНИЯ ОСАДКАМИ ПРОДУКТОВ ВЫБРОСА
ИЗ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА**

© 2023 Олег Автандилович Губеладзе¹, Автандил Рубенович Губеладзе²

^{1,2}Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Россия

¹buba26021966@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6018-4989>

²buba26021966@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6966-6391>

Аннотация. В статье рассматривается заключительный этап развития аварийной ситуации, сопровождающейся взрывом (сгоранием) взрывчатого вещества, входящего в состав ядерного боеприпаса или «грязной» бомбы и диспергированием ядерного делящегося материала с выходом в окружающую среду. Приведены формулы для экспресс-оценки количества примеси, выпавшей на поверхности земли в результате сухого оседания и вымывания осадками продуктов выброса.

Ключевые слова: малогабаритная ядерная энергетическая установка, источник радиоактивного заражения, диспергирование, облако выброса, концентрация примеси, полная экспозиция.

Для цитирования: Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Заражение местности вследствие сухого оседания и вымывания осадками продуктов выброса из точечного источника // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 14–22 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-02>.

Поступила в редакцию 12.12.2022

После доработки 13.02.2023

Принята к публикации 21.02.2023

Наиболее опасным исходом развития аварийных ситуаций (АС) с ядерными боеприпасами (ЯБП) в вооруженных конфликтах с участием государств, обладающих ядерным оружием (ЯО), является их взрыв и сгорание, когда в окружающую среду выделяются: оксид плутония, уран-235 и уран-238 (как чистый, так и в виде оксида) и тритий. Возникновение подобных АС возможно в вооруженных конфликтах с участием государств, обладающих ядерным оружием (ЯО) [1–3]. Кроме того, выброс радиоактивных веществ в атмосферу возможен при осуществлении акта ядерного терроризма [4].

Украина практически сразу после присоединения к Договору (как неядерное государство) приступила к научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам с целью формирования технологической базы для создания ЯО. Непосредственное участие в этом принимал Харьковский физико-технический институт, экспериментальная база которого позволяла проводить широкий спектр исследований по изучению ядерных материалов, в том числе отработавших реакторных топливных сборок. Для разработки ЯО использовалась зона Чернобыльской АЭС, где

также шли работы по изготовлению так называемой «грязной» бомбы (ГБ) [5]. Сама ГБ, как средство вооруженной борьбы не имеет смысла, так как ее поражающая способность невысока, однако она обеспечивает высокий уровень радиации в месте подрыва и является исключительно террористическим оружием [4].

В работах [6, 7] рассмотрено развитие аварийной ситуации, сопровождающейся взрывом (сгоранием) взрывчатого вещества, входящего в состав ЯБП, и диспергированием ядерного делящегося материала с выходом в окружающую среду. Проведено моделирование распространения примеси в атмосфере в случае неактивного взрыва. Подобные процессы характерны и для взрыва «грязной» бомбы.

Под источником радиоактивного заражения будем понимать область пространства, в которой распределены инжектированные в окружающую среду радиоактивные продукты после завершения газодинамических возмущений, вызванных взрывом ГБ (мгновенный выброс). Распределение радиоактивных продуктов по размерам образовавшихся аэрозолей определяется плотностью распределения $f(d)$, где d – диаметр частицы. Активность продуктов, приходящаяся на аэрозоли размерами от d до $d + \delta d$, составит величину $A_v f(d) \delta d$, где A_v – приземная объемная активность примеси. С математической точки зрения источник, первоначальными размерами которого можно пренебречь в сравнении расстоянием до точки регистрации примеси, считается точечным [3, 8], осуществляется перенос радиоактивных аэрозолей в окружающую среду.

Общее содержание примеси в облаке выброса по мере его движения уменьшается в результате сухого оседания, а также вымывания атмосферными осадками. Это описывается фактором истощения $F(x)$, который представляет собой долю выброшенного количества нуклидов, остающихся в облаке к моменту, когда его центр удалится на расстояние x от точки выброса. В результате сухого и «мокрого» оседания формируется поток выпадений примеси на поверхность земли.

Плотность потока примеси у поверхности вследствие сухого оседания представлена выражением (1):

$$A_s(x, y) = \omega_g A_v(x, y, 0), \quad (1)$$

где $A_v(x, y, 0)$ – приземная объемная активность примеси в точке (x, y) ;

ω_g – скорость сухого оседания, определяемая отношением интенсивности оседания к концентрации в приземном слое.

Воспользовавшись выражением для определения полной экспозиции на оси облака выброса [6], запишем формулу (2) для оценки количества примеси, выпавшей на поверхности земли:

$$A_\omega(x, y) = \omega_g \psi_t = \omega_g \frac{Q'_x}{\pi \cdot \sigma_{y1} \cdot \sigma_{z1} \cdot u} e^{-1/2 \left[\frac{y^2}{\sigma_{y1}^2} + \frac{h^2}{\sigma_{z1}^2} \right]}, \quad (2)$$

где Q'_x – остаточная мощность выброса в точке (x, y) .

Уменьшение мощности выброса на единицу пути представлена формулой (3):

$$\frac{\partial Q'_x}{\partial x} = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\omega_g}{u} \int_0^x \frac{dx}{\sigma_z \exp(h^2/2\sigma_z^2)}. \quad (3)$$

Проинтегрировав данное выражение на всем пути, получаем выражение (4) для функции истощения вследствие сухого осаждения:

$$F_{\omega} = \exp \left[- \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\omega_g}{\pi} \int_0^x \frac{1}{\sigma_z} e^{-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}} dx \right], \quad (4)$$

где h – высота мгновенного источника;

σ_z – вертикальная дисперсия распределения примеси в облаке выброса.

Скорость сухого оседания у тяжелых примесей обусловлена силой тяжести и называется также скоростью седиментации. В атмосфере встречаются аэрозоли с размерами широкого спектра – от тысячных долей микрона до сотен микрон [9-11]. Седиментация является доминирующим процессом для частиц размером более 50 мкм. Для меньших размеров доминирует диффузия.

Скорость падения сферических частиц в воздухе определяется формулой (5):

$$\omega_g = 2\rho_0 g \cdot r_a / (9\rho_B \cdot \nu), \quad (5)$$

где ρ_a – плотность частиц аэрозоли;

r_a – радиус этих частиц;

g – ускорение свободного падения;

ν – коэффициент молекулярной вязкости воздуха;

ρ_B – плотность воздуха.

Надо иметь в виду, что эта формула справедлива для частиц, размеры которых значительно превышают среднюю длину свободного пробега молекул воздуха (при нормальных условиях $8 \cdot 10^{-6}$ см). Это нижний предел для размеров частиц, когда выполняется закон Стокса. Верхний предел для размеров частиц равен ~30 мкм, а для еще больших частиц (≥ 100 мкм) величину скорости седиментации определяют по формуле Ньютона. Очень крупные частицы вследствие больших скоростей осаждения находятся в воздухе непродолжительное время и их диффузию можно не учитывать.

Рассмотрим загрязнение поверхности земли радиоактивными аэрозолями вследствие их вымывания из облака различными осадками. Плотность потока примеси на поверхность в этом случае представлена выражением (6):

$$A_s(x, y) = \Lambda \int_0^{H_z} A_v(x, y, z) dz, \quad (6)$$

где H_z – высота нижней границы облака;

Λ – постоянная вымывания, зависящая от типа осадков, спектра дождевых капель и интенсивности осадков.

Функция истощения облака, обусловленная мокрым оседанием, представлена выражением (7):

$$F(x) = \exp(-\Lambda x/u). \quad (7)$$

Полная функция истощения (8) получается в результате перемножения (4) и (7):

$$A_s = \frac{Q}{\pi C^2 (ut)^{2-n}}, \quad (8)$$

где C – коэффициент Сеттона;

u – составляющая средней скорости перемещения примеси по направлению x ;

n – показатель стабильности атмосферы.

Продифференцировав выражение для определения полной экспозиции на оси облака выброса [6] по x , получим расстояние точки максимальной концентрации от источника по формуле (9):

$$X_0 = \left(\frac{h^2}{2C^2} \right)^{\frac{1}{2-n}}. \quad (9)$$

Максимальная экспозиция от концентрации в этой точке представлена выражением (10):

$$\psi_{t \max} = Q / (\pi \cdot u \cdot h^2 \cdot e) \quad (10)$$

Оценим высоту подъема радиоактивного облака от мгновенного выброса. Так как мгновенный клуб взрыва имеет температуру больше, чем температура окружающего воздуха, то на него действует сила плавучести, под действием которой клуб поднимается до тех пор, пока его температура не сравняется с температурой атмосферы.

В модели Сеттона высота подъема радиоактивного облака определяется по формуле (11):

$$h = \left[\frac{2(3m + 2p)W}{9c_p \rho_B \pi^{\frac{3}{2}} C^3 a} \right]^{\frac{1}{p+3m/2}}, \quad (11)$$

где ρ_B – плотность воздуха;

W – количество тепла, выделенное при взрыве;

c_p – удельная теплоемкость газов облака при постоянном давлении;

a, m, p – постоянные коэффициенты [3].

Будем считать удельную теплоемкость газов облака взрыва равной удельной теплоемкости взрывчатого вещества (ВВ) при постоянном давлении $c_p \approx 0,2$ ккал/(кг·К) [12]. Примем количество тепла, выделенное при взрыве равным теплоте реакции взрывчатого превращения (для одного килограмма ВВ $W \approx 1000$ ккал/кг).

Для обычной атмосферной турбулентности при горизонтальном перемещении облака $a = 0,001$ К/м, $m = 7/4$, $p = 1$, $C = 0,25$ м^{1/8}. Высота подъема облака представлена выражением (12):

$$h \approx 2,66 \sqrt{F_{nl} / S_{AT}}, \quad (12)$$

где F_{nl} – сила плавучести;

S_{AT} – параметр устойчивости атмосферы.

Сила плавучести, формула (13):

$$F_{nl} = gW / c_p \rho_B T_B, \quad (13)$$

где T_B – температура воздуха.

Параметр устойчивости, формула (14):

$$S_{AT} = \frac{g}{T_B} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z} \right), \quad (14)$$

где $\partial \Theta / \partial z$ – градиент температуры.

При мощности заряда ВВ 10 кг в ТЭ высота подъема облака взрыва, оцененная по приведенным зависимостям, в наиболее благоприятных погодных условиях (отсутствие ветра и осадков, положительная температура и низкая влажность воздуха) может достигать ~150 м. В остальных случаях следует ожидать уменьшение h .

Зная величину предельного объема V_{np} продуктов детонации [6], легко определить величину энергии продуктов взрыва, перешедшей в ударную волну $W_{ye} = m_{ee} [1 - P_a V_{np} / (k^a - 1) \rho_{ee} V_0 B]$. Здесь m_{ee} – масса взрывчатого вещества; k^a – показатель адиабаты; ρ_{ee} – первоначальная плотность ВВ; V_0 – начальный объем ВВ; B – удельная теплота реакции. Для типичных ВВ величина W_{ye} составляет 0,97 от начальной энергии взрыва.

В зависимости от размеров частиц и метеорологических условий след (зона загрязнения поверхности земли) может иметь различную конфигурацию. Ось следа совпадает с направлением вектора среднего ветра в слое от поверхности земли до высоты источника.

Характер изменения концентрации с расстоянием x существенно зависит от h (координата z). На некотором расстоянии x_m от источника у поверхности отмечается максимальное значение концентрации примеси. С ростом z максимум концентрации смещается к источнику. На уровне выброса примеси концентрация легких частиц монотонно убывает с увеличением x и максимума не наблюдается. Максимум снова наблюдается на более высоких уровнях.

Результаты исследования представлены на рисунке 1. Их анализ показал, что максимум по z на малых расстояниях наблюдается где-то на уровне источника и профиль концентрации по отношению к этому уровню почти симметричен. Наибольшая концентрация достигается на оси следа, а в поперечном направлении от нее концентрация убывает симметрично по экспоненциальному закону. Убывание замедляется при увеличении x .

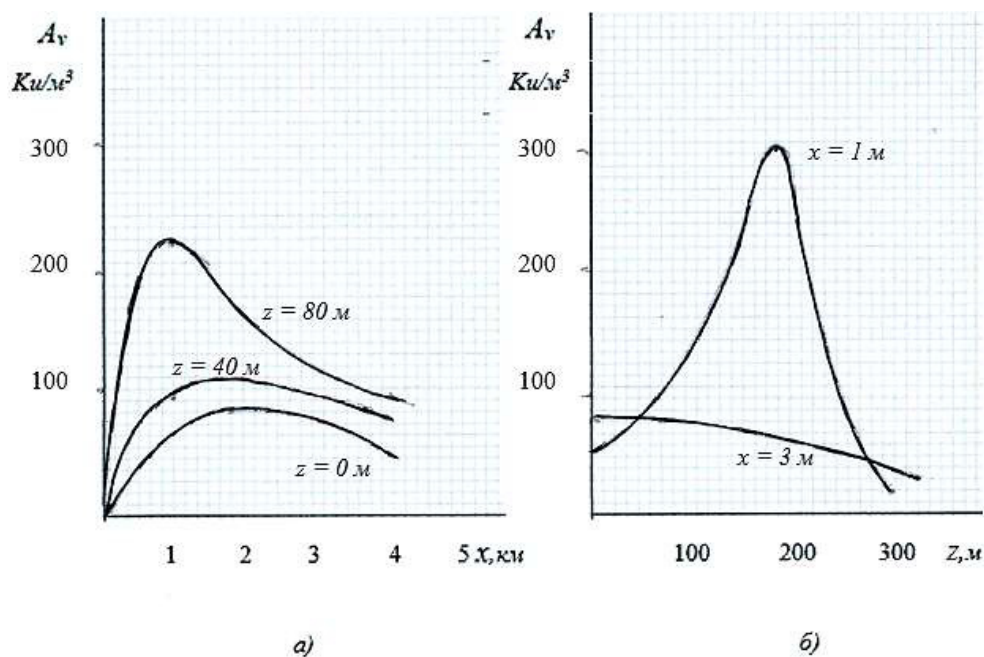


Рисунок 1 – Зависимость концентрации от расстояния и высоты источника: а – зависимость от x ; б – зависимость от z [Dependence of concentration on the distance and height of the source
а – dependence on x ; б – dependence on z]

Кроме того, определенный вклад вносит разлет фрагментов разрушенной оболочки «грязной бомбы». Наличие оболочки следует ожидать, так как в данном случае ГБ изготавливается на государственных объектах [5]. Рассмотрим характер разрушения различных оболочек.

Выражение (15) для определения начальной скорости разлета в дифференциальной форме [13]:

$$U \frac{dU}{dr} = \frac{\beta}{1 + n_1 \beta} f\left(\frac{1}{r^{N-k}}\right) S^*(r), \quad (15)$$

где n_1 принимает значения: $1/(2n + 1)$ – пластина, $1/(n + 1)$ – цилиндр, $3/(2n + 3)$ – сфера;

безразмерные переменные: $r = R / R_0$; $\beta = m_{BB} / m_{об}$; $U = v / D$; $f = \frac{\rho_{BB} R_0}{2m_{BB}(k+1)}$;

$S^* = S / S_0$; S_0 – начальная площадь контакта оболочки и продуктов взрыва; S – площадь контакта оболочки и продуктов взрыва; k – показатель изоэнтропии продуктов детонации; R_0 – радиус исходного заряда; D – скорость детонации; $m_{об}$ – масса оболочки, участвующая в образовании фрагментов осколочного поля.

Сплошная оболочка. Расширение происходит от известного начального R_0 до некоторого текущего значения радиуса R , при котором она начинает разрушаться на отдельные фрагменты. Тогда в выражении (13) для цилиндра $S = 2\pi R$, а для сферы $S = 4\pi R^2$.

Организованное дробление. Разрушение оболочки начинается практически сразу в момент начала ее расширения. В этом случае площадь контакта оболочки и продуктов детонации практически не меняется, т.е. в формуле (13) для цилиндра $S = 2\pi R$, а для сферы $S = 4\pi R_0^2$.

Расширение гофрированной оболочки. Из-за деформации самих фрагментов оболочки площадь контакта с расширяющимися продуктами детонации уменьшается до некоторой величины. Поэтому S представим в виде убывающих функций для цилиндра $S = 2\pi R_0(R_0 / R)$ и для сферы $S = 4\pi R_0^2(R_0 / R)$.

С учетом вышеизложенного, интегрирование уравнения (13) дает общее выражение для определения начальной скорости фрагментов оболочки [13]. В таблице 1 приведены выражения для определения значений U .

Таблица 1 – Выражения для определения U [Expressions for defining U]

Тип дробления	Распределение скорости ПД n	Симметрия		
		плоская $N = 1$	цилиндрическая $N = 2$	сферическая $N = 3$
1	линейное $n = 1$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{\beta/(2+\beta)}/\sqrt{2}$	$D\sqrt{5\beta/(5+3\beta)}/\sqrt{8}$
	параболическое $n = 2$	$D\sqrt{5\beta/(5+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{7\beta/(7+3\beta)}/\sqrt{8}$
2	линейное $n = 1$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{\beta/(2+\beta)}/\sqrt{5}$	$D\sqrt{15\beta/(5+3\beta)}/\sqrt{32}$
	параболическое $n = 2$	$D\sqrt{5\beta/(5+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{10}$	$D\sqrt{21\beta/(7+3\beta)}/\sqrt{40}$
3	линейное $n = 1$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{\beta/(2+\beta)}/\sqrt{6}$	$D\sqrt{15\beta/(5+3\beta)}/\sqrt{40}$
	параболическое $n = 2$	$D\sqrt{5\beta/(5+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{12}$	$D\sqrt{21\beta/(7+3\beta)}/\sqrt{40}$

В ходе выполнения одной из НИР была создана прикладная программа «Грязнуха», предназначенная для предварительной оценки характера зоны радиоактивного загрязнения местности при взрыве гипотетической «грязной» бомбы. На рисунке 2б представлен один из результатов моделирования радиоактивного загрязнения местности с учетом данного рельефа и конкретных (принятых для расчета)

метеорологических условий. При грамотной организации взрыва реальные значения начальной скорости фрагментов оболочки будут находиться в диапазоне 1000÷5500 метров в секунду. Знаками Δ обозначена граница зоны максимально возможного разлета фрагментов оболочки ГБ. Стоит отметить, что результаты моделирования носят оценочный характер. Фактические зоны радиоактивного загрязнения, если такое случится, уточняются по результатам радиационной разведки.

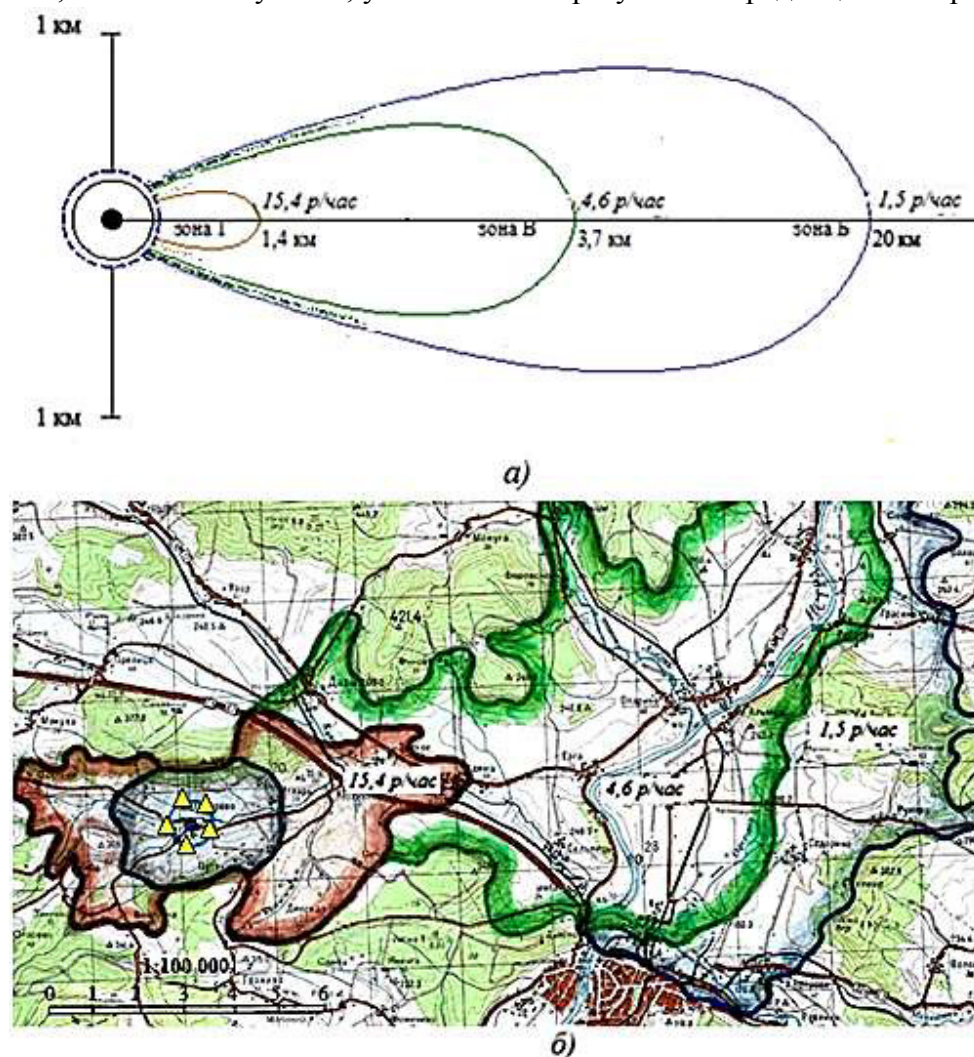


Рисунок 2 – Вариант примерного характера зоны радиоактивного загрязнения местности: *а* – след облака при неизменном направлении ветра без учета рельефа местности; *б* – результат моделирования с учетом рельефа местности при переменном ветре и атмосферных осадках (дождь) [Variant of the approximate nature of the area of radioactive contamination: *a* – the trail of a cloud with a constant wind direction without taking into account the terrain; *b* – the result of modeling taking into account the terrain with variable wind and precipitation (rain)]

Программа прошла апробацию в ходе тренировок аварийной команды. Сначала проводилась комплексная разведка места «взрыва» и прилегающей местности с кино- и фотосъемками. На основании полученного материала создавалась 3D модель местности, которая вместе с метеоусловиями (на момент «взрыва») использовалась в соответствующих расчетах. Полученные результаты поступали для уточнения границ зон заражения в ходе дозиметрического контроля.

Распространение тяжелой примеси имеет свои особенности, вызванные существенной скоростью осаждения [14]. При малых значениях x с увеличением скорости падения частиц концентрация примеси будет расти, а при больших убывает, причем интенсивность повышается с увеличением x . При этом для тяжелой примеси

максимум концентрации больше, а соответствующее ему расстояние до источника меньше, чем для легкой примеси [3, 8].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hoodbhoy P., Mian Z. Nuclear battles in South Asia // The Bulletin of the Atomic Scientists, May 4, 2016, <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415>.
2. Hans M. Kristensen & Robert S. Norris. North Korean nuclear capabilities, 2018, Bulletin of the Atomic Scientists, Vol.74, No.1, 41-51, <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20>
3. Кириллов, В.М. Физические основы радиационной и ядерной безопасности / В.М. Кириллов – Москва : РВСН, 1992. – 212 с.
4. Денисов, О.В. Комплексная безопасность населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Проблемы и решения : монография / О.В. Денисов, О.А. Губеладзе, Б.Ч. Месхи, Ю.И. Булыгин; под общей редакцией Ю.И. Булыгина. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2016. – 278 с.
5. Губеладзе, О.А. К вопросу обоснования необходимости прикрытия объектов использования атомной энергии от ударов с воздуха / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 15-24.
6. Губеладзе, О.А. Диффузия примеси при мгновенном выбросе из точечного источника в случае реализации пессимистического сценария развития аварийной ситуации / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 1(42). – С. 24-30.
7. Михайлов, В.Н. Безопасность ядерного оружия России / В.Н. Михайлова. – Москва : Мин. по атомной энергии – 1998. – 148 с.
8. Гусев, Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере / Н.Г. Гусев, В.А. Беляев – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
9. Богатов, В.А. Форма и характеристики частиц топливного выброса при аварии на Чернобыльской АЭС / В.А. Богатов, А.А. Боровой, Ю.В. Дубасов, В.В. Ломоносов // Атомная энергия. – Июль 1990. – Том 69. – Вып. I. – С. 36-40.
10. Raabe O.I., Goldmau M.A. Predictivo madel ufearbey moctality following acute inhalation of Pu₂ oxide. Radiation research 78, 1979.
11. Ключников, А.А. Морфология частиц ядерного топлива чернобыльского выброса / А.А. Ключников, В.Б. Рыбалка, Г.И. Петелин, Ю.И. Зимин // Первый независимый научный вестник. – 2016. – № 4. – С. 82-88.
12. Орленко, Л.П. Физика взрыва и удара / Л.П. Орленко – Москва : Физматлит, 2008. – 304 с.
13. Губеладзе, О.А. Оценка последствий воздействия кинетических ударников на взрывоопасный объект с малогабаритной ядерной энергетической установкой / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3(32). – С. 33-40.
14. Губеладзе, О.А. Экспресс-оценка результатов нерегламентированных деструктивных воздействий на ядерно- и радиационноопасный объект / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 4. – С. 24-30.

REFERENCES

- [1] Hoodbhoy P., Mian Z. Nuclear battles in South Asia // The Bulletin of the Atomic Scientists, May 4, 2016, <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415> (in English).
- [2] Hans M. Kristensen & Robert S. Norris (2018) North Korean nuclear capabilities, 2018, Bulletin of the Atomic Scientists, Vol.74, No.1, 41-51, <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20>(in English).
- [3] Kirillov V.M. Fizicheskie osnovy radiatsionnoy i yadernoy bezopasnosti [Physical Bases of Radiation and Nuclear Safety]. Moscow, RVSН, 1992, 212 p. (in Russian).
- [4] Denisov O.V., Gubeladze O.A., Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I. Kompleksnaya bezopasnost' naseleniya i territorij v chrezvy'chajny'x situacijax. Problemy' i resheniya: monografiya [Complex Safety of the Population and Territories in Emergency Situations. Problems and Solutions]. Rostov-on-Don, Publishing center Don State Technical University, 2016, 278 p. (in Russian).
- [5] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. K voprosu obosnovanija neobhodimosti priketija ob'ektov ispolzovanija atomnoj energii ot udarov s vozduha [Issue of Substantiating the Need to Cover Atomic Energy Objects from Air Strikes], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2022, No. 4(45), pp. 15-24 (in Russian).
- [6] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Diffuzija primesi pri mgnovennom vybrose iz tochechnogo istochnika v sluchae realizacii pessimisticheskogo szenarija razvitija avarijnoj situacii [Impurity Diffusion at Instantaneous Outburst from a Point Source in Worst-Case Emergency Scenario

- Realization] Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2022. No.1 (42). P. 24-30 (in Russian).
- [7] Mikhaylov V.N. Bezopasnost' yadernogo oruzhiya Rossii [Safety of Nuclear Weapon of Russia]. Moscow, Min. po atomnoy energii [Ministry of Nuclear Energy], 1998, 148 p. (in Russian).
- [8] Gusev N.G., Belyaev V.A. Radioaktivnye vybrosy v biosfere [Radioactive Emissions in the Biosphere]. Moscow, Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1991, 256 p. (in Russian).
- [9] Bogatov V.A., Borovoy A.A., Dubasov Yu.V., Lomonosov V.V. Forma i harakteristiki chastic toplivnogo vybrosa pri avarii na Chernobyl'skoj AES [The Shape and Characteristics of Fuel Release Particles in the Chernobyl Accident], Atomnaya energiya [Nuclear Power], July 1990. Volume 69, Issue 1, pp. 36-40 (in Russian).
- [10] Raabe O.I., Goldmau M.A. Predictivo model ufearbey moctality following acute inhalation of Pu₂ oxide. Radiation research 78, 1979 (in English).
- [11] Kljutchnikov A.A., Fishing V.B., Petelin G.I., Zimin Yu.I. Morfologija tchastic jaderno topliva chernobyl'skogo vybrosa [Chernobyl Pollution Nuclear Fuel Particles. Morphology], Pervyj nezavisimyj nauchnyj vestnik [First independent scientific journal], 2016, No. 4, pp. 82-88 (in Russian).
- [12] Orlenko L.P. Fizika vzryva i udara: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Physics of Explosion and Blow: Manual for Higher Education Institutions]. Moscow, Fizmatlit, 2008, 304 p. (in Russian).
- [13] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Ozenka posledstvij vozdeystvija kineticheskikh udarnikov na vzryvoopasnyj ob'ekt s malogabaritnoj jadernoj energeticheskoj ustanovkoj [Assessment of the Influence Consequence of Kinetic Impactors at an Explosive Object with a Small Nuclear Power Plant], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2019, No. 3(32), pp. 33-40 (in Russian).
- [14] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Express-otsenka rezul'tatov nereglementirovannykh destruktivnykh vozdeystviy na yaderno- i radiatsionnoopasnyy ob'ekt [Express Assessment of Results of Independent Destructive Impacts on Nuclear and Radiation-Hazardous Object], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2018, No. 4(29), pp. 24-30 (in Russian).

Area Contamination Due to Dry Settling and Point Source Stack Effluents Washout by Precipitates

© Oleg A. Gubeladze¹, Avtandil R. Gubeladze²

Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000

¹*buba26021966@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0001-6018-4989, WoS ResearcherID: F-6921-201*

²*buba26021966@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-6966-6391, WoS ResearcherID: F-7215-201*

Received by the editorial office on 12/12/2022

After revision on 02/13/2023

Accepted for publication 02/21/2023

Abstract. The article deals with an accidental situation development final stage accompanied by a powder explosion (combustion) incoming to a nuclear weapon part or dirty bomb and fissile nuclear materials dispergation with discharge in the air. The Formulas for impurity level express assessment fallen to the earth surface due to dry settling and stack effluents washout by precipitates are given.

Keywords: small-sized nuclear power plant, source of radioactive contamination, dispersion, emission cloud, impurity concentration, full exposure.

For citation: Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Area Contamination Due to Dry Settling and Point Source Stack Effluents Washout by Precipitates // Global Nuclear Safety. 2023. No. 1(46). P. 14-22 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-02>.