

КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АТМОСФЕРНЫХ ВЫБРОСОВ ИЗ АЭС В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОЛЕЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОЗДУХЕ

Н. Н. Талерко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Предложена нестационарная модель распространения радиоактивного выброса в атмосфере на расстояниях до 30 км от источника и связанная с ней интегральная модель расчета мощности дозы внешнего облучения от радиоактивного облака, которая учитывает неоднородность поля активности нуклидов в воздухе. Модели реализованы в компьютерной системе оперативного анализа дозиметрической обстановки в районе расположения Ровенской АЭС. Проведено тестирование интегральной модели дозы внешнего облучения. Показано, что она существенно улучшает оценку мощности дозы в ближней зоне источника выброса, в частности на расстояниях, сравнимых с эффективной высотой источника выброса в атмосферу.

Введение

С целью оперативного прогнозирования краткосрочных последствий аварийных выбросов из объектов атомной энергетики в ближней зоне источника выброса (на расстояниях до 10 - 30 км) традиционно используется гауссова струйная модель распространения примеси в атмосфере [1, 2]. Простота и эффективность такого подхода обеспечивается предположениями о стационарности источника выброса, стационарности и пространственной однородности метеорологических условий распространения выброса, а также горизонтальной однородности подстилающей поверхности. Любое существенное отклонение реальных условий от указанных гипотез (быстро меняющиеся погодные условия, нестационарный выброс, влияние рельефа местности и т.п.) приводит к необходимости разработки альтернативных подходов, которые бы позволяли учесть их влияние при сохранении относительной простоты модели.

Для оценок мощности эффективной эквивалентной дозы внешнего облучения от радионуклидов, содержащихся в атмосферном воздухе, как правило, используется так называемая модель полубесконечного источника, связывающая активность радионуклида в приземном воздухе и мощность дозы через значение дозового коэффициента внешнего облучения от радиоактивного облака B_d [3]. Однако такой подход оправдан только на таких расстояниях от источника, когда поле объемной активности радионуклида вблизи данной точки можно считать однородным. На малых расстояниях от источника выброса в атмосферу в условиях высоких пространственных градиентов активности радионуклида модель однородного полубесконечного источника может приводить к большим погрешностям в оценке мощности дозы внешнего облучения от радиоактивного облака. С другой стороны, использование общего выражения для мощности дозы облучения от источника произвольной формы в виде трехмерного интеграла по пространству [2] приводит к существенному росту объема вычислений.

В данной работе описан комплекс моделей, положенный в основу созданной в Институте радиационной защиты АТН Украины компьютерной системы оперативного анализа дозиметрической обстановки в районе расположения Ровенской АЭС. Он включает в себя модели для расчета последствий возможных аварийных выбросов на расстояниях до 30 км от источника, в том числе нестационарную модель атмосферного переноса примесей и интегральную модель для расчетов мощности дозы внешнего облучения от радиоактивного облака, которые используются в условиях существенно неоднородных и быстроменяющихся полей активности радионуклидов в воздухе.

Нестационарная модель атмосферного переноса примесей

Нестационарная модель атмосферного переноса применяется в ситуациях, характеризующихся быстро меняющейся динамикой выброса, а также в условиях изменяющихся в течение периода переноса примеси метеорологических полей. Длительный (непрерывный) нестационарный выброс радионуклидов из источника представляется в виде последовательности дискретных выбросов (клубов, англ. “puffs”). Полная активность каждого клуба рассчитывается как произведение интенсивности источника в этот момент на длительность временного интервала между двумя последовательными клубами.

Распространение клуба рассматривается в декартовой системе координат с началом в месте расположения источника выброса. Горизонтальная траектория движения клуба представляется последовательностью точек (x_i, y_i) , значения которых рассчитываются из

$$x_{i+1} = x_i + U_x(t_i)\Delta t, \quad y_{i+1} = y_i + U_y(t_i)\Delta t, \quad (1)$$

где U_x, U_y – компоненты скорости ветра в момент времени t_i ; Δt – шаг по времени расчета траектории. Полное расстояние l , пройденное клубом за время его распространения t , равно $l(t) = \sum_{i=1}^N |\vec{U}(t_i)|\Delta t$, $N = t/\Delta t$ – количество шагов по времени в расчете траектории клуба.

Предполагается радиальная симметрия каждого клуба в горизонтальной плоскости, т.е. что величины среднеквадратичного отклонения координат частиц примеси в направлении переноса и в перпендикулярном направлении одинаковы и равны σ_y . Величины σ_y и σ_z (отклонение координат частиц примеси в вертикальном направлении) рассчитываются как функции пути l , пройденного клубом, согласно зависимостям $\sigma_y = p_y \cdot l^{q_y}$, $\sigma_z = p_z \cdot l^{q_z}$, где константы p_y, q_y, p_z , и q_z определяются значениями категории устойчивости атмосферы по Пасквиллу, скорости ветра и эффективной высоты выброса [1].

Тогда значение объемной удельной активности радионуклида A_V ($\text{Бк} \cdot \text{м}^{-3}$) в воздухе, определяемой распространением одиночного клуба, определяется формулой

$$A_V(x, y, z, t) = \frac{Q F(l)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_y^2(l) \sigma_z(l)} \exp\left[-\frac{(y - y_c(l))^2 + (x - x_c(l))^2}{2\sigma_y^2(l)}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z - h_{\text{eff}})^2}{2\sigma_z^2(l)}\right] + \exp\left[-\frac{(z + h_{\text{eff}})^2}{2\sigma_z^2(l)}\right] \right\}, \quad (2)$$

где Q – активность радионуклида в клубе, Бк; x_c, y_c – координаты центра клуба; h_{eff} – эффективная высота выброса; $F(l)$ – функция истощения источника, учитывающая влияние процессов сухого осаждения радионуклидов на подстилающую поверхность, вымывания радионуклидов атмосферными осадками и радиоактивного распада [2].

Таким образом, значения объемной (как функции времени) активности нуклида, а также плотности осадка на земную поверхность в данной точке могут быть рассчитаны путем суммирования вкладов каждого клуба.

Недостаток этого подхода состоит в том, что для относительно малых расстояний от источника (и, следовательно, относительно малых горизонтальных размеров самого клуба) последовательность дискретных клубов может недостаточно хорошо воспроизводить струю примеси, непрерывную в пространстве. Если расстояние между двумя последовательными клубами превышает $2\sigma_y$, то в модельной струе возникают “провалы”, что может приводить к существенным погрешностям расчетных значений в отдельных точках рассматриваемой области. Уменьшение временного интервала между “запуском” последовательных клубов позволяет исправить этот недостаток расчетной схемы, но при этом существенно возрастают требования к быстродействию и ресурсам оперативной памяти используемой ЭВМ.

В данной модели для устранения указанной проблемы использован подход [4], в котором на малых расстояниях от источника для расчета значений активности радионуклида используется выражение, являющееся обобщением формулы (2):

$$A_V(x, y, z, t) = \frac{Q F(l_i)}{2\pi\sigma_y(l_i)\sigma_z(l_i) \cdot U \cdot \Delta t} T \exp\left[-\frac{d_c^2}{2\sigma_y^2(l_i)}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h_{eff})^2}{2\sigma_z^2(l)}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h_{eff})^2}{2\sigma_z^2(l)}\right] \right\}, \quad (3)$$

где $T = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{d_{a2}}{\sqrt{2}\sigma_y(l_i)}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{-d_{a1}}{\sqrt{2}\sigma_y(l_{i-1})}\right] \right\}$, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-p^2) dp$ - функция ошибок, U - скорость ветра в момент времени t .

Приведенное выражение получено в предположении о моделировании непрерывной струи последовательностью горизонтально несимметричных клубов (англ. "slugs"). В этом случае горизонтальная ось такого несимметричного клуба соединяет две точки рассчитанной траектории (x_{i-1}, y_{i-1}) и (x_i, y_i) . Величины d_{a1} и d_{a2} представляют собой проекции расстояния между точкой (x, y) , в которой рассчитывается активность, и точками (x_{i-1}, y_{i-1}) и (x_i, y_i) на горизонтальную ось несимметричного клуба соответственно. Величина d_c - расстояние между точкой (x, y) и горизонтальной осью клуба.

Можно показать, что при достаточно больших горизонтальных размерах клубов (когда соседние клубы перекрываются) оба подхода, основанные на выражениях (2) и (3) совпадают. Поэтому в модели расчет поля объемной активности, основанный на представлениях о несимметричных клубах, выполняется только в начальной стадии распространения каждого клуба. При достижении условия «расстояние между двумя последовательными клубами $< 2\sigma_y$ » происходит автоматический переход на вычисление активности по схеме горизонтально симметричного клуба (2) как более экономичной в вычислительном плане.

Расчетные выражения (2) и (3) применяются только до расстояния l_{crit} от источника, которое определяется из условия

$$h_{eff} + 2\sigma_z(l_{crit}) = H_m, \quad (4)$$

где H_m - толщина слоя перемешивания атмосферы. На расстояниях, превышающих l_{crit} в два раза, предполагается полное перемешивание примеси по вертикали в пределах слоя $0 < z < H_m$, поэтому объемная удельная активность радионуклида, определяемая распространением одиночного клуба, рассчитывается по формуле [4]

$$A_V(x, y, z, t) = \frac{Q F(l)}{2\pi\sigma_y^2(l)H_m} \exp\left[-\frac{(y-y_c(l))^2 + (x-x_c(l))^2}{2\sigma_y^2(l)}\right]. \quad (5)$$

Для промежуточных расстояний $l_{crit} < l < 2l_{crit}$ объемная удельная активность определяется с помощью линейной интерполяции значений, рассчитываемых согласно выражениям (2) и (5).

Входная метеорологическая информация для модели атмосферного переноса: 1) скорость и направление ветра на высоте измерений 10 м; 2) количество атмосферных осадков; 3) оценка категории устойчивости атмосферы, которая может быть проведена, в частности, по данным измерений стандартной метеорологической станции (значению скорости ветра и степени облачности).

Интегральная модель для расчета мощности эффективной эквивалентной дозы внешнего облучения от радиоактивного облака

В общем виде мощность эффективной эквивалентной дозы внешнего облучения \dot{H} , $\text{Зв}\cdot\text{с}^{-1}$ от радиоактивного облака произвольной формы в точке с координатами x, y вблизи поверхности земли может быть рассчитана из формулы

$$\dot{H}(x, y) = \frac{K\mu_a \sum_i R_i(E_i)n_i E_i}{4\pi\rho w} \iiint_V \frac{A_V(x, y, z) \cdot B_D}{r^2} \cdot \exp(-\mu r) dV, \quad (6)$$

где E_i - энергия i -го фотона, Мэв/фотон; n_i - абсолютный выход в схеме распада, фотон/распад; $R_i(E_i)$ - переходный коэффициент от поглощенной дозы в воздухе к эффективной эквивалентной дозе, Зв/Гр, определяемый согласно [5]; $K = 1,602 \cdot 10^{-13}$ - энергетический эквивалент, Дж/Мэв; μ_a и μ - линейные коэффициенты поглощения и ослабления энергии в воздухе соответственно, определяемые согласно [6]; $\rho = 1,293 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ - плотность воздуха при нормальных условиях; $w = 1 \text{ Дж}/(\text{Гр} \cdot \text{кг})$ - энергетический эквивалент грея, отнесенный к массе в 1 кг воздуха; B_D - дозовый фактор накопления в воздухе, r - расстояние от точки (x, y) до элементарного объема dV .

Интегрирование проводится по всему объему облака V .

В интегральной модели мощность дозы внешнего облучения \dot{H} от радиоактивного облака рассчитывается как сумма вкладов от фотонного \dot{H}_{ph} и от бета- \dot{H}_r излучений:

$$\dot{H} = \dot{H}_{ph} + \dot{H}_r \quad (7)$$

Мощность эффективной эквивалентной дозы внешнего облучения от фотонного излучения \dot{H}_{ph} , Зв \cdot с $^{-1}$, вблизи поверхности земли от распространяющегося в атмосфере клуба, в котором активность распределена согласно (2), определяется из формулы

$$\dot{H}_{ph}(x, y) = \eta \frac{K \mu_a \sum_i R_i(E_i) n_i E_i}{4 \pi \rho w} \times \times F(l) \cdot Q \int_0^{\infty} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{\mu}{2\sqrt{s}}\right) + \frac{k\mu}{\sqrt{\pi s}} \exp\left(-\frac{\mu^2}{4s}\right) \right] \cdot \exp(-\varphi(x, y, s)) ds. \quad (8)$$

В ней функция $\varphi(x, y, s)$ равна

$$\varphi(x, y, s) = \frac{(x - x_c)^2 s}{1 + 2s\sigma_z^2(l)} + \frac{(y - y_c)^2 s}{1 + 2s\sigma_y^2(l)} + \ln[1 + 2s\sigma_y^2(l)] + \psi(s), \quad (9)$$

а функция $\psi(s)$ определяется выражением

$$\psi(s) = \begin{cases} \frac{h_{eff}^2 s}{1 + 2s\sigma_z^2(l)} + \frac{1}{2} \ln[1 + 2s\sigma_z^2(l)], & \text{при } l \leq l_{crit}; \\ \ln\left(2H_m \sqrt{\frac{s}{\pi}}\right), & \text{при } l \geq 2l_{crit}. \end{cases} \quad (10)$$

В формулах (8) – (10) η - коэффициент, определяющий относительный вклад фотонного излучения в дозовый коэффициент внешнего облучения от радиоактивного облака B_a ; $\operatorname{erfc}(x)$ - дополнительный интеграл вероятностей; $k = (\mu - \mu_a)/\mu$ - коэффициент в дозовом факторе накопления в воздухе, который при выводе формул (8) - (10) задавался в виде $B_D(E, r) = 1 + k(E)\mu(E)r$.

В промежуточном интервале $l_{crit} < l \leq 2l_{crit}$ значения $\psi(s)$ определяются линейной интерполяцией по l .

Выражения для мощности дозы от одиночного клуба (8) - (10) получены с помощью подхода, использованного в [7] для получения асимптотического выражения для мощности гамма-излучения от гауссовой струи. При этом общее выражение для мощности дозы гамма-излучения в виде трехмерного интеграла по пространству (6) сводится (в предположении об известном распределении активности нуклида в воздухе) к одномерному интегралу с помо-

щью метода Лапласа [8]. Как показано в [7], такой метод позволяет получить приближенное выражение для мощности дозы гамма-излучения в широком диапазоне параметров задачи с достаточно высокой точностью. Верхнее выражение в формуле (10) получено для клуба, в котором активность распределена согласно формуле (2), а нижнее – для достаточно больших расстояний переноса, когда для расчета активности в клубе используется формула (5), предполагающая равномерное перемешивание активности по вертикали в пределах всего слоя перемешивания атмосферы H_m .

В случае реализации условий, при которых активность нуклида в воздухе рассчитывается согласно выражению для несимметричного клуба (3), мощность эффективной эквивалентной дозы внешнего облучения рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} \dot{H}_{ph}(x, y) = \eta \frac{K \mu_a \sum_i R_i(E_i) n_i E_i}{4\pi \rho w} F(l) \times \\ \times \cdot Q \int_0^{\infty} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{\mu}{2\sqrt{s}}\right) + \frac{k\mu}{\sqrt{\pi s}} \exp\left(-\frac{\mu^2}{4s}\right) \right] \cdot \Phi(x, y, s) \exp(-\varphi(x, y, s)) ds, \end{aligned} \quad (11)$$

в которой

$$\Phi(x, y, s) = \frac{1}{4U \cdot \Delta t} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{s}} \operatorname{erfc}(-x\sqrt{s}) \cdot \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{d_{a2}}{\sqrt{2}\sigma_y(l_2)}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{-d_{a1}}{\sqrt{2}\sigma_y(l_1)}\right] \right\}, \quad (12)$$

$$\varphi(x, y, s) = \frac{y^2 s}{1 + 2s\sigma_y^2(l_2)} + \frac{1}{2} \ln[1 + 2s\sigma_y^2(l_2)] + \psi(s), \quad (13)$$

а функция $\psi(s)$ определяется из формулы (10).

В формулах (8) и (11) суммирование производится по всем линиям энергетического спектра фотонного излучения радионуклида. Используемые при расчетах значения энергий излучения и абсолютного выхода в схеме распада для каждого радионуклида взяты из [9].

Очевидно, что на больших расстояниях от источника результаты расчетов мощности дозы внешнего излучения в центре клуба согласно интегральной модели должны асимптотически стремиться к значениям, получаемым из модели полубесконечного источника. Однако прямое сопоставление результатов, получаемых по этим двум моделям, затруднено тем обстоятельством, что в формулах (8) - (10) расчеты проводятся только по линиям фотонного излучения, в то время как дозовый коэффициент внешнего облучения от радиоактивного облака B_a [3] эффективно учитывает вклад бета-излучения. Поэтому для каждого из учитываемых в модели 169 нуклидов рассчитывалось значение дозового коэффициента внешнего облучения от полубесконечного облака, исходя из формулы

$$B_{aph} = \frac{K \sum_i R_i(E_i) n_i E_i}{2\rho w}, \quad (14)$$

в которой учитывались вклады от всех линий излучения, соответствующих гамма- и аннигиляционным квантам, а также рентгеновскому излучению, по данным [9]. Полученные таким образом значения рассматривались как вклад указанных типов излучения в полный дозовый коэффициент, и для каждого нуклида рассчитывался относительный вклад фотонного излучения в дозовый коэффициент внешнего облучения от радиоактивного облака $\eta = B_{aph}/B_a$. Соответственно относительный вклад бета-излучения предполагался равным $(1 - \eta)$.

Таким образом, мощность эффективной эквивалентной дозы внешнего облучения от бета-излучения \dot{H}_r в точке с координатами x, y вблизи поверхности земли в модели определяется из

$$\dot{H}_r(x, y) = (1 - \eta) B_a \cdot A_V(x, y, 0), \quad (15)$$

где $A_V(x, y, 0)$ - объемная активность радионуклида в данной точке.

Тестовые расчеты мощности дозы внешнего облучения от радиоактивного облака

Были проведены тестовые расчеты мощности дозы внешнего облучения по трем моделям – согласно общему выражению для источника произвольной формы (6), модели полубесконечного источника и интегральной модели. Целью таких расчетов было сравнение результатов, полученных по различным моделям, и определение областей применимости каждой из них. Очевидно, что формула (6) дает наиболее точное значение дозы внешнего облучения, поэтому результаты, полученные по модели источника произвольной формы, использовались для оценок точности результатов расчетов по полубесконечной и интегральной моделям.

Для тестирования моделей мощности дозы рассчитывалось распространение одиночного клуба с запасом активности $Q = 10^{10}$ Бк в стационарных метеорологических условиях. Рассматривалось четыре набора метеоусловий: 1) скорость ветра $U = 1$ м·с⁻¹, категория устойчивости А; 2) скорость ветра $U = 3$ м·с⁻¹, категория устойчивости С; 3) скорость ветра $U = 5$ м·с⁻¹, категория устойчивости D; 4) скорость ветра $U = 2$ м·с⁻¹, категория устойчивости F. Расчеты проводились для высоты источника $h_{eff} = 10$ и 150 м, и расстояний переноса, равных $x_0 = 100, 500, 1000$ и 3000 м. При этом для каждого x_0 рассчитывалась зависимость мощности дозы от расстояния до центра клуба в интервале $0 \leq y_0 \leq 10 \sigma_y(x_0)$.

Рассчитывалась мощность дозы внешнего облучения при выбросе в атмосферу следующих нуклидов: ¹³³Xe (полная энергия фотонов 0,048 МэВ), ¹³¹I (0,38 МэВ), ¹³⁷Cs/^{137m}Ba (0,565 МэВ), ¹³⁴Cs (1,55 МэВ), ¹³²I (2,28 МэВ).

Тестовые расчеты показали, что для всех использованных наборов параметров значения мощности дозы, полученные по интегральной модели и по модели источника произвольной формы (6), отличаются не более чем на 5 %. Вместе с тем время расчетов по интегральной модели на несколько порядков меньше, чем по модели источника произвольной формы. Таким образом, тестирование показало, что интегральная модель дает оценку дозы внешнего облучения с высокой точностью в широком диапазоне параметров задачи, и при этом пригодна для использования в оперативных расчетах последствий радиоактивных выбросов в атмосферу.

Далее приведены некоторые результаты сравнения расчетов по интегральной модели и модели полубесконечного источника. На расстоянии 100 м от источника выброса модель полубесконечного источника завышает значение мощности дозы в два - четыре раза в центре клуба для ¹³³Xe (рис. 1) и в 6 - 13 раз для ¹³²I при эффективной высоте источника 10 м. Здесь и далее под центром клуба подразумевается положение проекции геометрического центра клуба на поверхность земли. С увеличением расстояния от центра клуба значения мощности дозы уменьшаются согласно гауссовому распределению активности в клубе: на расстоянии $y_0 = 3\sigma_y$ мощность дозы уменьшается на два порядка, а для $y_0 = 6\sigma_y$ - на восемь порядков. Отметим, что в этом случае величина σ_y равна 36 м для категории А, 22 м для категории D и 78 м для категории F. Согласно интегральной модели мощность дозы уменьшается лишь на один порядок на расстоянии $y_0 = 3\sigma_y$ и на два порядка на расстоянии $y_0 = 6\sigma_y$ от центра клуба. Аналогичные результаты получены и для других нуклидов. Следовательно, традиционно используемая модель полубесконечного источника занижает значения мощности дозы на расстояниях $6\sigma_y$ от центра клуба на два - пять порядков. Таким образом, в случае выброса

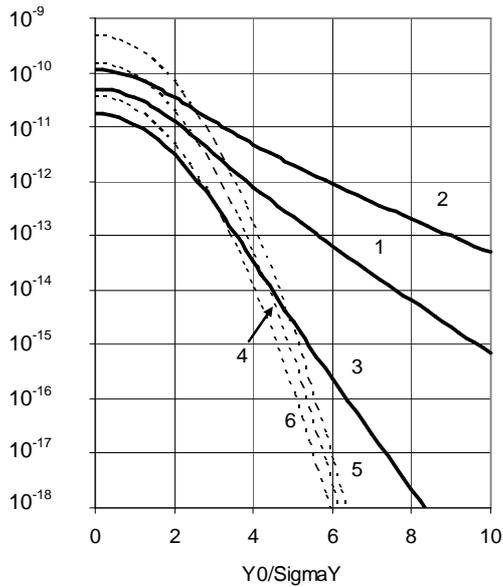


Рис. 1. Мощность дозы внешнего облучения ($\text{Зв}\cdot\text{с}^{-1}$) от клуба активностью 10^{10} Бк на расстоянии 100 м от источника выброса ^{133}Xe с эффективной высотой $h_{\text{eff}} = 10$ м по интегральной модели (1 - категория устойчивости атмосферы А, 2 - D, 3 - F) и по модели полубесконечного источника (4 - А, 5 - D, 6 - F) в зависимости от относительного расстояния до центра клуба y_0/σ_y .

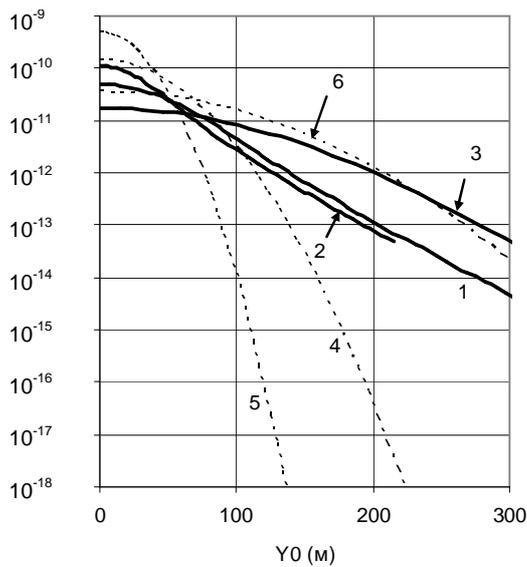


Рис. 2. То же, что и на рис. 1 в зависимости от абсолютного расстояния до центра клуба y_0 .

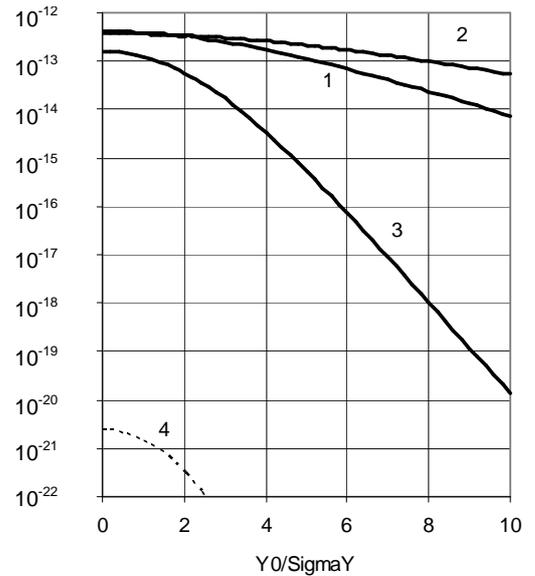


Рис. 3. То же, что и на рис. 1 для источника выброса с эффективной высотой $h_{\text{eff}} = 150$ м..

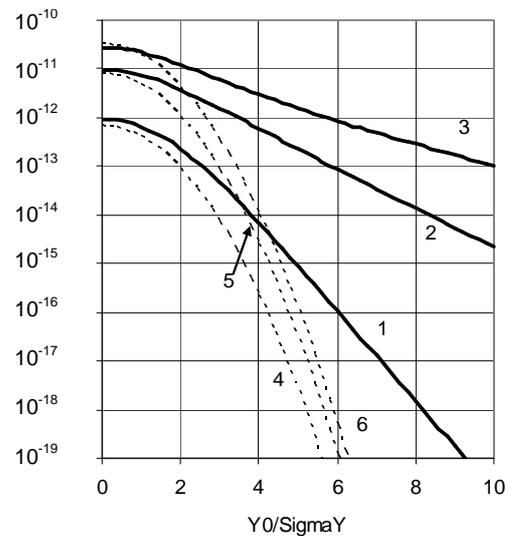


Рис. 4. Мощность дозы внешнего облучения ($\text{Зв}\cdot\text{с}^{-1}$) от клуба активностью 10^{10} Бк на расстоянии 500 м от источника выброса с $h_{\text{eff}} = 150$ м для категории устойчивости С по интегральной модели (1 - ^{133}Xe , 2 - ^{137}Cs , 3 - ^{132}I) и по модели полубесконечного источника (4 - ^{133}Xe , 5 - ^{137}Cs , 6 - ^{132}I) в зависимости от относительного расстояния до центра клуба y_0/σ_y .

большой активности использование полубесконечной модели приводит к значительному занижению величины горизонтальных размеров зоны воздействия излучения от распространяющегося в атмосфере радиоактивного облака.

На рис. 2 приведены для этих же расчетов зависимости мощности дозы от абсолютного расстояния до центра клуба. Для категории D модель полубесконечного источника занижает значение мощности дозы более чем на два порядка на расстоянии 100 м от центра клуба. Для категории A расхождение более чем на один порядок обнаруживается на расстояниях более 130 м. Поскольку для категории F величина σ_y имеет наибольшее значение, то расхождения между результатами обеих моделей начинаются на расстояниях более 300 м, где абсолютные значения мощности дозы существенно меньше по сравнению с центром клуба.

Еще большие отличия между результатами наблюдаются с увеличением высоты источника выброса h_{eff} . На рис. 3 приведены результаты расчетов для $h_{eff} = 150$ м. Даже в центре клуба модель полубесконечного источника занижает значение мощности дозы на восемь порядков для категории устойчивости A. Для остальных категорий значения мощности дозы по полубесконечной модели еще меньше и на рисунке не приведены. Таким образом, эта модель принципиально непригодна для оценок мощности дозы от высотного источника на расстояниях переноса выброса, сравнимых с высотой источника.

Как и следовало ожидать, с увеличением расстояния переноса x_0 различия между результатами по обеим моделям уменьшаются. При высоте источника для $h_{eff} = 10$ м для $x_0 = 500$ м отношения расчетных значений мощности дозы в центре клуба варьируются от 1,2 раз (^{133}Xe , категория A) до 4,9 раз (^{132}I , категория F). Различия в дозах, не превышающие 1 порядок для всех рассмотренных нуклидов и метеоусловий, получены при относительных расстояниях до центра клуба $y_0 \leq 3\sigma_y(x_0)$.

Для источника выброса с $h_{eff} = 150$ м и расстояния переноса $x_0 = 500$ м результаты расчетов для некоторых нуклидов показаны на рис. 4. С увеличением полной энергии фотонного излучения различия результатов по обеим моделям увеличиваются с возрастанием расстояния до центра клуба.

На расстоянии переноса $x_0 = 3000$ м результаты расчетов в центре клуба для категорий устойчивости A, C и D совпадают с точностью до 3 % для ^{133}Xe , 14 % для ^{131}I , 17 % для ^{137}Cs , 35 % для ^{134}Cs , 46 % для ^{132}I . Для категории F модель полубесконечного источника завышает значение мощности дозы в 1,2 раза для ^{133}Xe , 1,6 раза для ^{131}I , 1,74 раза для ^{137}Cs , 2,1 раза для ^{134}Cs и 2,3 раза для ^{132}I при высоте источника $h_{eff} = 10$ м. Для высотного источника $h_{eff} = 150$ м ситуация противоположная: для категории F отношение доз, рассчитанных по полубесконечной и интегральной модели равно 0,36 для ^{133}Xe , 0,22 для ^{131}I и ^{132}I , 0,21 для ^{137}Cs и ^{134}Cs .

Выводы

1. Предложенный комплекс моделей пригоден для оценок распространения радиоактивного выброса в атмосфере на расстояниях до 30 км от источника для нестационарных метеорологических условий переноса и произвольной динамики выброса. Он позволяет рассчитать объемную и поверхностную активность радионуклидов, а также мощность дозы внешнего облучения от радиоактивных выбросов в атмосфере.

2. Показано, что предложенная интегральная модель расчета мощности дозы внешнего облучения от радиоактивного облака, распространяющегося в атмосфере, позволяет существенно уточнить оценку дозы, в особенности на расстояниях, сравнимых с высотой источника выброса. Погрешность результатов по модели не превышает 5 % по сравнению с общим выражением для источника произвольной формы.

3. Предложенный метод расчета мощности дозы требует минимальных вычислительных ресурсов, поэтому, в отличие от общего выражения (6), он может быть использован для оперативных оценок в информационных системах для принятия решений в случае аварийных ситуаций на АЭС.

4. Проверка полученных соотношений для различных характеристик выброса и метеорологических условий возможна путем анализа данных измерений параметров выброса, проводимых датчиками автоматической системы контроля радиационной обстановки АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting. A Safety Guide. IAEA Safety series No. 50-SG-S3.* - IAEA, 1980. – 108 p.
2. *Гусев Н. Г., Беляев В. А.* Радиоактивные выбросы в биосфере: Справ. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 224 с.
3. *Eckerman K.F., Leggett R.W.* DCFPAK: Dose coefficient data file package for Sandia National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-13347. - Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 1996.
4. *Scire J.S., Strimaitis D.J., Yamartino R.J.* A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5). - EarthTech, Inc., 2000. – 521 p.
5. *ICRP Publication 74: Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation.* - Oxford: Pergamon Press, 1997.
6. *Кимель Л. Р., Машкович В. П.* Защита от ионизирующих излучений. - М.: Атомиздат, 1996.
7. *Gorshkov V.E., Karmazin I.P., Tarasov V.I.* Reduced integral solutions for gamma absorbed dose from Gaussian plume // *Health Physics.* – 1995. - Vol. 69, No. 2. - P. 210 - 218.
8. *Свейшников А.Г., Тихонов А.Н.* Теория функций комплексного переменного. - М.: Наука, 1972.
9. *ICRP Publication 38. Radionuclide Transformations: Energy and Intensity of Emissions.* – Oxford: Pergamon Press, 1984.

Поступила в редакцию 28.03.05,
после доработки – 11.04.05.

**1 14 КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНКИ НАСЛІДКІВ АТМОСФЕРНИХ ВИКИДІВ З АЕС
В УМОВАХ НЕОДНОРІДНИХ ТА НЕСТАЦІОНАРНИХ ПОЛІВ АКТИВНОСТІ РАДІОНУКЛІДІВ
У ПОВІТРІ****М. М. Талерко**

Запропоновано нестационарну модель розповсюдження радіоактивного викиду в атмосфері на відстанях до 30 км від джерела та пов'язану з нею інтегральну модель розрахунку потужності дози зовнішнього опромінення від радіоактивної хмари, яка враховує неоднорідність поля активності нукліда в повітрі. Моделі реалізовано в комп'ютерній системі оперативного аналізу дозиметричної обстановки в районі розташування Рівненської АЕС. Проведено тестування інтегральної моделі дози зовнішнього опромінення. Показано, що вона суттєво покращує оцінку потужності дози в ближній зоні джерела викиду, зокрема на відстанях, які порівняні з ефективною висотою джерела викиду в атмосферу.

**1 14 THE SET OF MODELS FOR THE ASSESSMENT OF CONSEQUENCES OF ATMOSPHERIC
RELEASES FROM NUCLEAR POWER PLANTS IN INHOMOGENEOUS AND TIME-DEPENDENT
FIELDS OF NUCLIDE VOLUME ACTIVITY****N. N. Talerko**

The time-dependent model of radioactivity atmospheric transport is proposed for a horizontal scale of up to 30 km from the source. Also the integral model for calculations of external dose rate due to radioactive cloud is used which takes into account the heterogeneity of nuclide volume activity field. The models are the part of the computer system on real-time analysis of radiological situation in the region of the Rivne NPP. Testing of the integral model of dose rate was made. It was showed that it improves considerably the assessment of dose rate in the nearest zone of release source, in particular at distances comparable with the effective height of the atmospheric release source.