



УДК 629.039.58:551.511.61

© 2010

**Н. Н. Талерко, Е. К. Гаргер,**  
академик НАН Украины **А. А. Ключников**

## **Прогнозирование последствий аварийных выбросов из объектов атомной энергетики с помощью мезомасштабной модели атмосферного переноса LEDI**

*Викладено результати розробки лагранжово-ейлерової моделі атмосферного перенесення домішок LEDI. Модель придатна для оцінок і прогнозування наслідків великих техногенних аварій, які призводять до викидів забруднюючих речовин в атмосферу (зокрема, комунальних аварій на АЕС в гострій фазі аварії) на мезомасштабних відстанях від джерела.*

Анализ крупных аварий в атомной энергетике показал, что эффективность защиты населения и персонала зависит от оперативных действий в острую (начальную) фазу аварии. Информационные системы оценки и оперативного прогнозирования последствий радиоактивного загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности являются важным инструментом для поддержки принятия решений по защите персонала, населения и окружающей среды в случае аварий на объектах атомной энергетики. Составной частью таких систем являются математические модели распространения радиоактивности в атмосфере, позволяющие получить предварительную оценку радиационной ситуации и дать прогноз ее развития на ближайший период.

В случае локальной радиационной аварии для расчетов распространения радиоактивного выброса может использоваться модель МАГАТЭ [1], пригодная для использования на расстояниях до 10–20 км от источника. Однако в случае региональной или глобальной аварии (подобной аварии на Чернобыльской АЭС) для оценки и прогнозирования последствий распространения выброса необходимо использовать мезомасштабную модель атмосферного переноса.

Лагранжево-эйлерова диффузионная модель переноса примеси в атмосфере LEDI разработана для расчетов переноса примеси на расстояния до 1000 км от газоаэрозольного “точечного” источника с эффективной высотой выброса от 0 до 1500 м. Модель может быть использована для оценок и прогнозирования последствий крупных техногенных (в первую очередь, радиационных) аварий, приводящих к выбросам загрязняющих веществ в атмосферу.

Модель верифицирована по материалам ряда натуральных экспериментов, в частности, диффузионного эксперимента “Саванна Ривер Планта” (США) [2]. Модель атмосферного переноса LEDI была использована для реконструкции динамики радиоактивного загрязнения территории Украины в начальный период Чернобыльской аварии радионуклидами  $^{137}\text{Cs}$  [3] и  $^{131}\text{I}$  [4]. Полученные результаты расчетов радиоактивного загрязнения воздуха и почвы использованы для восстановления доз облучения щитовидной железы населения радиоактивно загрязненных территорий [5]. В диагностическом режиме модель может быть использована при планировании мер по защите населения при возможных радиационных авариях на АЭС, в том числе для оценок трансграничного переноса [6].

Источник выброса в атмосферу моделируется в виде последовательности выбросов (“клубов”) с учетом изменчивости количества вещества или активности в них. В модели используется сочетание лагранжевого и эйлерового методов к описанию распространения примеси в пограничном слое атмосферы (ПСА) [7]. Такой подход позволяет физически корректно учесть основные факторы, определяющие перенос примеси на мезомасштабных расстояниях (порядка десятков — сотен километров от источника). Трехмерная задача расчета распространения примеси в атмосфере разбивается на три стадии: 1) вычисления горизонтальной траектории распространения примеси на основе лагранжевого метода частицы; 2) расчеты вертикального профиля концентрации примеси в узлах горизонтальной траектории, выполняемые с помощью одномерного полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии; 3) распределение примеси в поперечном направлении полагается нормальным с дисперсией координат, представляющей собой сумму вкладов горизонтальной турбулентной диффузии и расширения струи примеси с учетом взаимодействия поворота ветра с турбулентностью в ПСА.

Модель учитывает: а) нестационарность (вследствие суточного хода характеристик ПСА или изменений погоды) и пространственную неоднородность метеорологических характеристик атмосферы; б) различные типы источника по длительности выброса (залповый, конечного времени действия, непрерывный), по фазовому составу (газовый, аэрозольный), по нуклидному составу; в) горизонтальную неоднородность подстилающей поверхности (рельеф, различный тип шероховатости).

Горизонтальная траектория движения каждого “клуба” определяется последовательностью точек с географическими координатами  $\phi_i, \omega_i$  ( $i = 0, 1, \dots, \phi_0, \omega_0$  — координаты источника). На каждом  $i$ -м шаге вычислений траектории движения “клуба” примеси вводится декартова система координат, в которой ось  $x$  ориентирована по направлению переноса в горизонтальной плоскости, ось  $y$  направлена горизонтально и перпендикулярно  $x$ , ось  $z$  направлена вертикально. Тогда для данной точки с декартовыми координатами  $x, y, z$  (или соответствующими географическими  $\phi, \omega, z$ ) сочетание лагранжевого и эйлерового методов позволяет рассчитать объемную интегральную по времени концентрацию примеси  $C_m(\phi, \omega, z, t)$ , определяемую переносом  $m$ -го “клуба”:

$$C_m(\phi, \omega, z) = \chi_{mi}(z) \Big|_{\substack{\phi=\phi_i \\ \omega=\omega_i}} \frac{\exp[-y^2/2(\sigma_y^{mi})^2]}{\sqrt{2\pi}U_{mi}\sigma_y^{mi}}, \quad (1)$$

где  $\chi_{mi}(z)$  — вертикальный профиль одномерной концентрации примеси, рассчитанный в точке с координатами  $(\phi_i, \omega_i)$ ;  $\phi, \omega$  — географические координаты точек, расположенных в плоскости, перпендикулярной к среднему направлению переноса;  $y$  — расстояние между точками с координатами  $(\phi_i, \omega_i)$  и  $(\phi, \omega)$ ;  $U_{mi}$  — скорость переноса “клуба” с номером  $m$  на

$i$ -м шаге по времени;  $(\sigma_y^{mi})^2$  — среднеквадратичное отклонение координат частиц примеси по оси  $y$ .

Для вычисления вертикального профиля одномерной концентрации примеси в  $m$ -м клубе  $\chi_{mi}$  используется полуэмпирическое одномерное уравнение турбулентной диффузии

$$\frac{\partial \chi_{mi}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial \chi_{mi}}{\partial z} \right) + V_g \frac{\partial \chi_{mi}}{\partial z} - \Lambda \chi_{mi} - \lambda \chi_{mi} - W \frac{\partial \chi_{mi}}{\partial z} \quad (2)$$

с граничными условиями

$$k_z \frac{\partial \chi_{mi}}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0; \quad k_z \frac{\partial \chi_{mi}}{\partial z} + V_g \chi_{mi} \Big|_{z=0} = V_s \chi_{mi} \quad (3)$$

и начальным условием

$$\chi_{m0}|_{t=0} = Q_m \delta(z - h_{ef}), \quad (4)$$

где  $k_z$  — вертикальный коэффициент турбулентной диффузии;  $\lambda$  — константа радиоактивного распада;  $\Lambda$  — параметр влажного вымывания;  $V_s$  — скорость сухого осаждения примеси на подстилающую поверхность;  $Q_m$  — количество примеси, выброшенное с  $m$ -м клубом;  $V_g$  — скорость гравитационного оседания аэрозольной частицы;  $h_{ef}$  — эффективная высота выброса;  $H$  — высота ПСА;  $W$  — крупномасштабная вертикальная составляющая скорости ветра в пограничном слое.

Скорость переноса “клуба” с номером  $m$  на  $i$ -м шаге по времени  $U_{mi}$  определяется как средняя по вертикальному слою распространения примеси (как правило, это весь пограничный слой  $0 < z < H$ ) с учетом распределения примеси по высоте:

$$\bar{U}_{mi}(\varphi_i, \omega_i, t) = \frac{1}{Q_m} \int_0^H \chi_{mi}(z) \bar{u}(\varphi_i, \omega_i, z, t) dz, \quad (5)$$

где  $\bar{u}(\varphi_i, \omega_i, z, t)$  — скорость ветра.

Уравнение (2) с условиями (3), (4) решается численно с помощью метода Рунге–Кутты. Область интегрирования по вертикали разбивается на ряд слоев переменной толщины  $\Delta z$  — от 20 м вблизи поверхности земли до 100 м в верхней части пограничного слоя.

Параметр влажного вымывания равен  $\Lambda = c^r J$ ,  $J$  — интенсивность осадков (мм/час),  $c^r = 2,6 \cdot 10^{-5}$  час/(мм · с) для аэрозольных частиц [8].

Согласно (1), распределение средней концентрации примеси в поперечном направлении предполагается нормальным. Среднеквадратичное отклонение поперечных координат частиц примеси  $[\sigma_y^{mi}(l)]^2$  (где  $l = \int_0^T |\bar{U}_{mi}| dt$  — расстояние переноса  $m$ -го “клуба” за время  $T$ ) выражается следующим образом:

$$\sigma_y^{mi}(l) = \frac{c_3 l}{\sqrt{1 + 10^{-4} l}} \quad \text{для} \quad l \leq 20 \text{ км}, \quad (6)$$

$$\sigma_y^{mi}(l) = \left( 2\bar{\sigma}_v^2 \tau_L^2 \left( \frac{l}{U_{mi} \tau_L} - \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{2l}{U_{mi} \tau_L}\right) + 2 \exp\left(-\frac{l}{U_{mi} \tau_L}\right) \right) + 2,95 \cdot 10^{-5} (\Delta\psi)^2 l^2 \right)^{1/2} \quad \text{для} \quad l > 40 \text{ км}. \quad (7)$$

Для расстояний до 20 км для  $\sigma_y$  используется стандартная параметризация (6), где константа  $c_3$  зависит от класса устойчивости атмосферы по Пасквиллу. На расстояниях свыше 40 км, согласно [7], поперечное расширение “клуба” примеси представляется в виде суммы вкладов горизонтальной турбулентной диффузии (первое слагаемое в формуле (7)) и расширения, определяемого поворотом направления ветра в ПСА (второе слагаемое). На промежуточных расстояниях  $20 \text{ км} < l < 40 \text{ км}$  значение  $\sigma_y^{mi}(l)$  вычисляется интерполяцией по расстоянию  $l$  между значениями, определяемыми формулами (6) и (7).

Дисперсия поперечной турбулентной компоненты скорости  $\overline{\sigma_v^2}$  и лагранжев интегральный масштаб атмосферной турбулентности  $\tau_L$ , усредненные по толщине ПСА, рассчитываются согласно [7]:

$$\overline{\sigma_v^2} = \left( \frac{t}{T_m} \right)^{0,35} \times \begin{cases} 0,157w_*^2 & \text{— для неустойчивого ПСА,} \\ 0,84u_*^2 & \text{— для нейтрального ПСА,} \\ 1,02u_*^2 & \text{— для устойчивого ПСА;} \end{cases} \quad (8)$$

$$\tau_L = \begin{cases} \frac{0,5H}{w_*} & \text{— для неустойчивого ПСА,} \\ \frac{\overline{\sigma_v^2}}{0,6\bar{\epsilon}} & \text{— для нейтрального и устойчивого ПСА,} \end{cases} \quad (9)$$

где  $u_*$  — динамическая скорость;  $w_*$  — конвективный масштаб скорости, определяемый согласно [9];  $\bar{\epsilon}$  — скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, рассчитываемая согласно [10]. Последний множитель в формуле (8) представляет собой поправочный коэффициент, учитывающий разницу между временем распространения примеси  $t$  и периодом осреднения экспериментальных данных  $T_m$ .

Вертикальный сдвиг направления ветра  $\Delta\psi$  в пограничном слое атмосферы рассчитывается согласно [9]:

$$\Delta\psi = \left( 67,8 - 6,2 \log \left( \frac{U_g}{f z_0} \right) \right) \Phi(\mu_0), \quad (10)$$

где  $U_g$  — геострофическая скорость ветра;  $f = 2\omega \sin \varphi_j$  — параметр Кориолиса;  $\omega$  — угловая скорость вращения Земли;  $\Phi(\mu_0)$  — безразмерная функция параметра устойчивости  $\mu_0 = g(T_0 - T_H - \gamma H) / (\bar{T} f U_g)$  ( $T_0$  — температура почвы;  $T_H$  — температура воздуха на верхней границе ПСА;  $\gamma = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ К/м}$  — равновесный вертикальный градиент температуры атмосферы).

Вертикальный коэффициент турбулентной диффузии  $k_z$  в приземном слое параметризуется, согласно [9], как функция динамической скорости  $u_*$  и длины Монина–Обухова  $L$ . Высота приземного слоя рассчитывается согласно [11]. В пределах ПСА профиль  $k_z$  аппроксимируется квадратичным полиномом так, что на верхней границе слоя он снижается до значения  $0,5 \text{ м}^2/\text{с}$ . Значения  $u_*$  и  $L$  определяются согласно [9].

Высота нейтрально стратифицированного ПСА (соответствующего условию для параметра Монина–Обухова  $|L| \geq 100 \text{ м}$ ) рассчитывается по формуле Россби–Монтгомери

$$H = \frac{0,3u_*}{f}. \quad (11)$$

В случае устойчивого ПСА ( $0 < L < 100$  м) его высота определяется из [12]

$$H = \frac{L}{3,8} \left[ -1 + \left( 1 + 2,28 \frac{u_*}{fL} \right)^{1/2} \right]. \quad (12)$$

Для неустойчивого ПСА ( $-100$  м  $< L < 0$  м) высота вычисляется из прогностического уравнения Дирдорфа [13]

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \vec{V} \cdot \nabla H + W + 1,8 \cdot \frac{w_*^3 + 1,1u_*^3 - 3,3u_*^2 f H}{g \frac{\partial \theta^+}{\partial z} + 9w_*^2 + 7,2u_*^2}, \quad (13)$$

где  $W$  — крупномасштабная вертикальная скорость на высоте  $H$ ;  $\theta_0$  — средняя температура в приземном слое;  $\partial \theta^+ / \partial z$  — градиент потенциальной температуры непосредственно над ПСА;  $\vec{V}$  — скорость адвекции.

Вследствие неоднородности и нестационарности метеорологических условий переноса вычисление турбулентных характеристик атмосферы повторяется на каждом шаге расчета траектории движения примеси.

Плотность осаджений на подстилающую поверхность  $D_m(\varphi, \omega)$ , определяемая распространением  $m$ -го “клуба” примеси в точке  $(\phi, \omega)$ , вычисляется из

$$D_m(\varphi, \omega) = V_s C_m(\varphi, \omega, 0) + \Lambda \int_0^H C_m(\varphi, \omega, z) dz. \quad (14)$$

Первое слагаемое в правой части определяет вклад в поверхностную концентрацию за счет сухого осаждения примеси на подстилающую поверхность, а второе — за счет осаждения примеси атмосферными осадками.

Суммарные значения интегральной по времени концентрации в воздухе и концентрации осадка на подстилающую поверхность в точке  $(\phi, \omega)$  за некоторый период определяются как суммы вкладов отдельных клубов, прошедших над данной точкой за этот период. Для полидисперсной примеси функция распределения частиц по размерам разбивается на несколько диапазонов и вычисления проводятся для каждого из них отдельно.

Модель позволяет рассчитывать перенос и осаждение радиоактивной примеси как для горизонтально однородной подстилающей поверхности, так и в условиях неоднородности типа подстилающей поверхности, в частности, с учетом умеренно пересеченного рельефа местности и неоднородного растительного покрова на ней.

В модели имеется блок для расчета пространственных полей значений доз внешнего облучения от радионуклидов в атмосфере и в выпадениях на земную поверхность, а также доз внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов в организм человека.

В качестве входной метеорологической информации могут использоваться данные измерений значений полей скорости ветра и температуры воздуха в нижнем слое атмосферы (до 2-х километров), а именно, результаты радиозондирования атмосферы или содарные измерения. Данные об атмосферных осадках могут быть получены из измерений на сети метеорологических станций и постов Гидрометслужбы. Также модель адаптирована к использованию результатов численных моделей прогноза погоды (в частности, модели

ММ5). При наличии оперативной метеорологической прогностической информации модель LEDI может быть использована в оперативном режиме для прогноза последствий загрязнения окружающей среды аварийными выбросами из промышленных предприятий (в том числе АЭС) и их воздействия на население.

1. *Atmospheric dispersion in nuclear power plant siting: A safety guide*, Safety series No 50. – SG-S3. – Vienna: IAEA, 1980. – 106 p.
2. Талерко Н. Н., Гаргер Е. К. Опыт тестирования модели атмосферного переноса LEDI на основе натурных экспериментов и чернобыльских данных. – Киев, 2005. – 16 с. – (Препринт / НАН Украины. Ин-т проблем безопасности АЭС; 05–1).
3. Talerko N. Mesoscale modelling of radioactive contamination formation in Ukraine caused by the Chernobyl accident // *J. Environ. Radioactivity*. – 2005. – **78**, No 3. – P. 311–329.
4. Talerko N. Reconstruction of  $^{131}\text{I}$  radioactive contamination in Ukraine caused by the Chernobyl accident using atmospheric transport modeling // *Ibid.* – 2005. – **84**. – P. 343–362.
5. Likhtarov I., Kovgan L., Vavilov S. et al. Post-Chernobyl Thyroid Cancers in Ukraine. Report 1: Estimation of Thyroid Doses // *Radiation Research*. – 2005. – **163**. – P. 125–136.
6. Талерко Н. Н., Гаргер Е. К., Кузьменко А. Г., Шедменко И. П. Применение мезомасштабной модели атмосферного переноса для оценки последствий запроектной аварии на АЭС // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2006. – Вип. 4. – С. 30–36.
7. Бызова Н. Л., Гаргер Е. К., Иванов В. Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 280 с.
8. *Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС* / Под ред. К. П. Махонько. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. – 264 с.
9. Орленко Л. Р. Структура планетарного пограничного слоя атмосферы. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. – 272 с.
10. Бызова Н. Л., Иванов В. Н., Гаргер Е. К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 264 с.
11. Йорданов Д. О высоте приземного воздушного слоя // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* – 1977. – **13**, № 7. – С. 781–783.
12. Nieuwstadt F. T. M. The steady-state height and resistance laws of the nocturnal boundary layer: Theory compared with Cabauw observations // *Bound. – Layer Meteor.* – 1981. – **20**. – P. 3–17.
13. Deardorff J. W. Three dimensional numerical study of the height and mean structure of a heated planetary boundary layer // *Ibid.* – 1974. – **7**. – P. 81–106.
14. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей* / Под. ред. Ф. Т. М. Ньюстадта и Х. Ван Допа. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. – 352 с.

*Институт проблем безопасности АЭС  
НАН Украины, Киев*

*Поступило в редакцию 16.06.2010*

**N. N. Talerko, E. K. Garger,**  
Academician of the NAS of Ukraine **A. A. Klyuchnikov**

### **Prediction of the consequences of accidental releases from nuclear power plants with the help of the mesoscale atmospheric transport model LEDI**

*The results of development of the Lagrangian–Eulerian atmospheric transport model LEDI are presented. The model is suitable for the assessment and the prognosis of the consequences of large industrial accidents which result in atmospheric releases (in particular, accidents at nuclear power plants during the initial stage of an accident) at mesoscale distances.*