УДК 577.4

С.И.Абрахин, С.М.Аракелян, О.В.Кузьмин, Н.С.Прокошева, В.Г.Прокошев, Т.А.Трифонова

Владимирский университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА МАГИСТРАЛЬНОМ НЕФТЕПРОДУКТОПРОВОДЕ

Для решения задач прогнозирования последствий чрезвычайной ситуации по разливу нефти при аварии на нефтепроводе на основе ГИС-технологий построена математическая модель распространения примесей в атмосфере и получена наглядная форма последствий распространения примесей на электронной карте.

The paper considers the forecasting of consequences of such an emergency situation as oil spill the oil-pipe-line failure. This situation has been analyzed according to the GIS technologies. The simulator of spreading of impurities in the atmosphere is described hereinafter. These investigations resulted in graphic diagrams of the distribution of these impurities and its consequences on the electronic map.

Построение математической модели чрезвычайной ситуации при аварии на магистральном нефтепродуктопроводе для прогнозирования последствий аварии, оценки степени загрязнения компонентов окружающей природной среды (земля, водные объекты, атмосфера) и нанесенного экономического ущерба вследствие загрязнения нефтью каждого компонента окружающей природной среды и общей суммы платы за загрязнение имеет большую актуальность в связи с тяжелыми последствиями от аварий на трубопроводах для природы и человека.

В общем случае при возникновении аварии на нефтепроводе все количество вытекшей нефти можно условно разделить на три составляющие: нефть оставшаяся на поверхности грунта; нефть, просочившаяся внутрь грунта, и нефть, которая испарилась в атмосферу.

Рассмотрим модели распространения примесей в атмосфере. Модели атмосферной диффузии классифицируются по многим признакам и, в частности, с учетом масштаба (модели локального, регионального и глобального масштабов, межмасштабные модели). В зависимости от характера источника аварийных выбросов модели распространения опасных веществ делятся на модели «клуба» и модели «факела». Модели классифицируются также и по использованному при их разработке подходу к описанию турбулентной диффузии. По этому признаку выделяются статистические, полуэмпирические и комбинированные модели. При статическом подходе принимается гауссовский закон распределения диффундирующей примеси по всем трем координатным осям.

Статическая модель для мгновенного точечного источника в общем случае может быть записана в виде

$$C(x,y,z,t) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} e^{\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2}+\frac{(y-vt)^2}{2\sigma_y^2}+\frac{(z-wt)^2}{2\sigma_z^2}} f_p f_o f_в,$$

ISSN 0135-3500. Записки Горного института. Т.154

где $C(x,y,z,t)$ – концентрация диффундирующего вещества как функция пространственных координат и времени; Q – количество выброшенного вещества; u, v, w – средние значения скоростей ветра по направлениям соответственно x, y, z; σ_x^2, σ_y^2, σ_z^2 – дисперсия примесей по направлениям x, y, z; $f_р$, $f_о$ и $f_в$ – поправки на обеднение облака за счет радиоактивного распада или разложения вещества, его сухого осаждения и вымывания соответственно.

Следует заметить, что в соответствии с приведенной моделью процесс переноса «клуба» рассматривается в движущейся системе координат.

Статистическая модель «факела» имеет вид

$$C(x,y,z,t,H_{эф}) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \times$$

$$\times \left(e^{\frac{(z-H_{эф})^2}{2\sigma_z^2}} + e^{\frac{(z+H_{эф})^2}{2\sigma_z^2}} \right) f_р f_о f_в,$$

где Q – скорость выброса из постоянно действующего точечного источника; $H_{эф}$ – эффективная высота источника, определяемая с учетом подъема факела за счет термического и динамического всплытия струи.

Полуэмпирическая модель для источника с конечным временем действия, учитывающая профиль ветра по высоте и изменение с высотой коэффициента турбулентной диффузии, выражается формулой

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q(zH)^{\frac{1-m}{2}} z_n^m}{2(2+n-m)K_1\sqrt{\pi K_0 x^3}} \times$$

$$\times e^{\frac{y^2}{4K_0x} - \frac{u_1 z_1^{m-n}(z^{2+n-m}+H^{2+n-m})}{K_1(2+n-m)x}} I_{\frac{1-m}{2+n-m}}\left[\frac{2u_1 z_1^{m-n}(zH)^{\frac{2+n-m}{2}}}{(2+n-m)^2 K_1 x}\right],$$

где K_1 – вертикальная составляющая коэффициента турбулентной диффузии на высоте 1 м; K_0 – горизонтальная составляющая коэффициента турбулентной диффузии; n и m – безразмерные параметры формул для вертикальных профилей скорости ветра и вертикальной составляющей коэффициента диффузии; u, K_z и $I_{\frac{1-m}{2+n-m}}$ – функции Бесселя от мнимого аргумента,

$$u = u_1\left(\frac{z}{z_1}\right)^n, \quad K_z = K_1\left(\frac{z}{z_1}\right)^m.$$

Комплексная модель атмосферной диффузии учитывает наличие подстилающей поверхности, обусловливающей определенные различия в характере турбулентной диффузии в горизонтальных и вертикальных направлениях. В модели принимается во внимание, что размеры вертикальных пульсаций ограничиваются подстилающей поверхностью, вследствие чего можно не учитывать рост масштаба вихрей по мере удаления от источника и роста облака. В связи с этим модель в части, касающейся распространения примесей в вертикальном направлении, строится как полуэмпирическая, горизонтальное же распространение примеси описывается на основе статистических законов. Соотношение, отражающее эти соображения, имеет вид

$$C(x,y,z) = \frac{e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} S(x,y),$$

где $S(x, y)$ – некая функция, описывающая закономерности изменения количества примеси, если условно предположить, что вся она сосредоточена в вертикальной плоскости. Конкретное выражение для функции $S(x, y)$ находят путем решения уравнения турбулентной диффузии применительно к условиям выброса и распространения примеси.

Модели, описывающие распространение примесей в атмосфере, различаются также по использованному при их разработке приему решения основного уравнения переноса и диффузии примеси:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \operatorname{div}(K \operatorname{grad} C) - \operatorname{grad} CU + Q,$$

где K – вектор коэффициентов турбулентной диффузии; U – вектор поля скоростей в воздушной среде.

По этому признаку выделяются модели типа «ящика», конечно-разностные модели, статистические регрессионные модели, модели, разработанные методом «Монте-Карло». В первом случае среда – атмосфера – разбивается на ряд объемов или «ящиков», для каждого из которых составляется уравнение материального баланса с учетом источников, стоков и переноса примеси их одного «ящика» в другой. Конечно-разностные модели основаны на численном решении уравнения материального баланса с теми или иными упрощениями и допущениями. При этом атмосфера аппроксимируется набором трехмерных расчетных ячеек. Статистические регрессионные модели строятся на основе статистических данных о загрязнениях и используются для краткосрочного прогноза.

В программе расчета применена модель распространения примеси в конвективном пограничном слое на неоднородной поверхности. Учитывается орографическая и термическая неоднородность подстилающей поверхности. Модель включает описание приземного слоя перемешивания, который характеризуется средними по толщине слоя параметрами, и изменения высоты слоя инверсии. Кроме того, при определенных заданных параметрах численная модель расчета распространения примеси в конвективном пограничном слое учитывает влияние крупномасштабных термических и орографических неоднородностей подстилающей поверхности на распределение параметров пограничного слоя и высоту слоя инверсии. Проведенные численные расчеты показали, что учет этих эффектов может существенно влиять на распределение концентраций примеси от точечного источника.