УДК 621.3

Светличная С.Д., канд. техн. наук, доц., НУГЗУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ, СВЯЗАННОЙ С РАЗЛИВОМ БЫСТРО ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

(представлено д-ром хим. наук Калугиным В.Д.)

Предложен метод расчета концентрации в воздухе паров жидкости, испаряющейся с поверхности разлива, основанный на решении трехмерного уравнения диффузии. Модель предназначена для расчета концентрации опасных веществ в воздухе после аварии.

Ключевые слова: метод расчета, поверхность разлива, концентрация опасных веществ

Постановка проблемы. Аварии, связанные с разливом сильно действующих и ядовитых веществ, представляют значительную угрозу как для населения, так и для подразделений МЧС, занимающихся их ликвидацией. Ветер способен переносить ядовитые пары на значительное расстояние от места аварии. Поэтому возникает необходимость прогнозирования распределения концентрации паров с течением времени.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] предлагается решение задачи диффузии паров жидкости в атмосфере при ее испарении из разлива прямоугольной формы. При этом предполагается, что скорость поступления паров жидкости с единицы площади является постоянной. В действительности же скорость поступления паров зависит от концентрации насыщенных паров жидкости, соответствующей данной температуре, и концентрации паров вблизи ее поверхности.

Постановка задачи и ее решение. Найдем концентрацию в воздухе паров жидкости, испаряющейся из разлива, имеющего произвольную форму S. Диффузия паров в воздухе описывается дифференциальным уравнением [2]

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 \rho_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_c}{\partial y^2}\right) + D_z \frac{\partial^2 \rho_c}{\partial z^2} - w_x \frac{\partial \rho_c}{\partial x} - w_y \frac{\partial \rho_c}{\partial y}, \; t > 0, \; z > 0, \quad (1)$$

где $\rho_c(x,y,z,t)$ – массовая концентрация паров жидкости, кг/м^3; D, D_z – диффузии паров соответственно в горизонтальном и вертикальном направлении; $\vec{w}=(w_x,w_y)$ – вектор скорости ветра и его составляющие вдоль осей X и Y.

Будем предполагать, что вблизи поверхности разлива существует пограничный слой пренебрежимо малой толщины, в котором концентрация равна концентрации насыщенных паров $\rho_н$. Это дает краевое условие на поверхности разлива в виде

$$\rho_c(x,y,0,t)=\rho_н,\ (x,y)\in S. \tag{2}$$

В остальных точках на поверхности земли принимается условие непроницаемости

$$\left.\frac{\partial\rho_c}{\partial z}\right|_{z=0}=0,\ (x,y)\notin S. \tag{3}$$

Будем также полагать, что в начальный момент времени концентрация паров в воздухе нулевая

$$\rho(x,y,z,0)=0. \tag{4}$$

В построенной задаче (1) – (4) выполним замену $u=\rho_c-\rho_н$ и от краевых условий (2) – (3) перейдем к следующему уравнению диффузии и к одному условию третьего рода

$$\frac{\partial u}{\partial t}=D\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+D_z\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}-w_x\frac{\partial u}{\partial x}-w_y\frac{\partial u}{\partial y},\ t>0,\ z>0, \tag{5}$$

$$\left.\frac{\partial u}{\partial z}-ku\right|_{z=0}=0,\ u(x,y,z,0)=-\rho_н, \tag{6}$$

где формально полагаем $k(x,y)=\infty$ для точек, принадлежащих поверхности жидкости $(x,y)\in S$, и $k(x,y)=0$ для $(x,y)\notin S$. Тогда решение задачи (5) – (6) может быть записано в виде [3]

$$u(x,y,z,t) = -\rho_н \int\limits_{-\infty}^{\infty} d\xi \int\limits_{-\infty}^{\infty} d\eta \int\limits_{0}^{\infty} d\zeta \; G(x,y,z,\xi,\eta,\zeta,t), \tag{7}$$

где $G(x,y,z,\xi,\eta,\zeta,t) = G_x(x,\xi,t)G_y(y,\eta,t)G_z(z,\zeta,t)$ – функция Грина

$$G_x(x,\xi,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left[-\frac{w_x(\xi - x)}{2D} - \frac{w_x^2 t}{4D} - \frac{(x-\xi)^2}{4Dt} \right]; \tag{8}$$

$$G_y(y,\eta,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left[-\frac{w_y(\eta - y)}{2D} - \frac{w_y^2 t}{4D} - \frac{(y-\eta)^2}{4Dt} \right]; \tag{9}$$

$$G_z(z,\zeta,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi D_z t}} \left\{ \exp\left[-\frac{(z-\zeta)^2}{4D_z t} \right] + \exp\left[-\frac{(z+\zeta)^2}{4D_z t} \right] - \right.$$
$$\left. -2k\sqrt{\pi D_z t} \exp\left[k^2 D_z t + k(z+\zeta) \right] erfc\left(\frac{z+\zeta}{2\sqrt{D_z t}} + k\sqrt{D_z t} \right) \right\}, \tag{10}$$

где $erfc(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int\limits_0^z e^{-x^2} dx$. Поскольку параметр k является функцией (x,y), то G_z также зависит от (x,y). Если $(x,y) \notin S$, то $k = 0$ и

$$G_{z1}(z,\zeta,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi D_z t}} \left\{ \exp\left[-\frac{(z-\zeta)^2}{4D_z t} \right] + \exp\left[-\frac{(z+\zeta)^2}{4D_z t} \right] \right\}.$$

Если же $(x,y) \in S$, то при $k \to \infty$ получим

$$\lim_{k\to\infty} 2k\sqrt{\pi D_z t} \exp\left[k^2 D_z t + k(z+\zeta) \right] erfc\left(\frac{z+\zeta}{2\sqrt{D_z t}} + k\sqrt{D_z t} \right) =$$
$$= 2\exp\left[-\frac{(z+\zeta)^2}{4D_z t} \right].$$

Тогда

$$G_{z2}(z,\zeta,t)=\frac{1}{2\sqrt{\pi D_z t}}\left\{\exp\left[-\frac{(z-\zeta)^2}{4D_z t}\right]-\exp\left[-\frac{(z+\zeta)^2}{4D_z t}\right]\right\}.$$

После интегрирования G_{z1} и G_{z2} по $d\zeta$ в пределах от 0 до бесконечности получим

$$\int_0^\infty G_{z1}(z,\zeta,t)d\zeta=1\,;\ \int_0^\infty G_{z2}(z,\zeta,t)d\zeta=\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_z t}}\right),\qquad(11)$$

где $\operatorname{erf}(z)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^z e^{-x^2}dx$. Объединяя решение (7) – (10) с (11), получим

$$u(x,y,z,t)=-\rho_н\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_z t}}\right)\iint_S G_x(x,\xi,t)G_y(y,\eta,t)d\xi d\eta-$$
$$-\rho_н\iint_{\bar S} G_x(x,\xi,t)G_y(y,\eta,t)d\xi d\eta\,,$$

где $\bar S$ – дополнение области S до всей плоскости. Поскольку

$$\int_{-\infty}^{\infty}d\xi\int_{-\infty}^{\infty}d\eta G_x(x,\xi,t)G_y(y,\eta,t)=1\,,$$

то

$$u(x,y,z,t)=-\rho_н\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_z t}}\right)\iint_S G_x(x,\xi,t)G_y(y,\eta,t)d\xi d\eta-$$
$$-\rho_н+\rho_н\iint_S G_x(x,\xi,t)G_y(y,\eta,t)d\xi d\eta\,.$$

Возвращаясь к исходной переменной $\rho_c=u+\rho_н$, получим концентрацию паров жидкости в воздухе

$$\rho_c(x,y,z,t)=\rho_н \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_z t}}\right)\iint_S G_x(x,\xi,t)G_y(y,\eta,t)\,d\xi d\eta\,. \qquad (12)$$

Пусть разлив жидкости имеет форму прямоугольника со сторонами длиной $2a$ и $2b$. Расположим систему координат так, чтобы ее начало находилось в центре прямоугольника, а оси X и Y были параллельны его сторонам. В этом случае двойной интеграл в (12) распадается на два однократных интеграла. Интегрирование функций Грина дает

$$\rho_c(x,y,z,t)=\frac{\rho_н}{4}\operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_z t}}\right)\left(\operatorname{erf}\left(\frac{a-x+w_x t}{2\sqrt{Dt}}\right)+\operatorname{erf}\left(\frac{a+x-w_x t}{2\sqrt{Dt}}\right)\right)\times$$
$$\times\left(\operatorname{erf}\left(\frac{b-y+w_y t}{2\sqrt{Dt}}\right)+\operatorname{erf}\left(\frac{b+y-w_y t}{2\sqrt{Dt}}\right)\right).$$

Выводы. Предложена модель для оценки концентрации паров жидкости, испаряющейся с поверхности разлива произвольной формы. Построенная модель учитывает скорость и направление ветра, а также различный коэффициент диффузии в вертикальном и горизонтальном направлениях. Модель может быть использована для расчета концентраций ядовитых веществ в воздухе и определения зон, опасных для пребывания людей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов Н.П. Аналитическое решение задачи диффузии паров жидкости в атмосфере/ Копылов Н.П., Яйлин Р.А., Кузнецов А.Е. // Пожарная безопасность многофункциональных и высотных зданий и сооружений: материалы XIX науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО, 2005. – Ч.1. – С. 12-15.
2. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики/ Тихонов А.Н., Самарский А.А.– М.: Наука, 1977. – 735 с.
3. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики/ Полянин А.Д. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.

Світлична С.Д.

Моделювання надзвичайної ситуації, пов'язаної з розливом рідини, що швидко випаровується

Запропоновано метод розрахунку коцентрації в повітрі парів рідини, що випаровується з поверхні розливу. Цей метод базується на розв'язанні тривимірного рівняння дифузії. Модель призначена для розрахунку концентрації небезпечних речовин в повітрі після аварії.

Ключові слова: метод розрахунку, поверхня розливу, концентрація небезпечних речовин

Svetlichnaya S.D.

The modeling of extraordinarily situation which is connected with the flood of liquid evaporating quickly

The calculation method of concentration in air of liquid steams is proposed. Liquid evaporates from the flood surface. The method is based on the decision of the three-dimensional equation of diffusion. The model is intended for the concentration calculation of dangerous substances in air after the accident.

Key words: calculation method, flood surface, concentration of dangerous substances

УДК 614. 84

Тарасенко А.А., канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НУГЗУ

БЕЗОПАСНОСТЬ МАРШРУТА ПРИ ДВИЖЕНИИ АВТОТЕХНИКИ К ОЧАГУ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ В УСЛОВИЯХ ГОРИСТОГО БЕЗДОРОЖЬЯ

(представлено д-ром техн. наук Бодянским Э.В.)

Приведено решение задачи выбора безопасного направления движения автомобиля в условиях гористого бездорожья. Модель может быть использована в качестве ограничения при решении навигационной задачи нахождения оптимального наземного маршрута движения сил быстрого реагирования при ликвидации последствий природных и природно-техногенных ЧС

Ключевые слова: задача выбора, навигационная задача, оптимальный наземный маршрут

Постановка проблемы. Рост антропогенной нагрузки на природную среду приводит к увеличению числа техногенных ка-