

УДК 519.6

© Н.Н. Беляев, И.В. Калашников, А.В. Берлов

CFD МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РИСКА И УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРИ ЭМИССИИ ХИМИЧЕСКОГО АГЕНТА

© M. Biliaiev, I. Kalashnikov, O. Berlov

CFD MODELING OF TERRITORIAL RISK AND AIR POLLUTION DURING TOXIC CHEMICAL EMISSION

Предложен метод расчета распространения опасных веществ в условиях застройки, который позволяет осуществлять оценку территориального риска. Численное моделирование осуществляется на базе модели аэродинамики и распространения примеси в атмосферном воздухе. Численная модель ориентирована на проведение экспресс расчетов. Приведено описание алгоритма решения задачи по оценке территориального риска при эмиссии химически опасного вещества при экстремальной ситуации на промышленном объекте. Представлены результаты вычислительного эксперимента.

Запропоновано метод розрахунку поширення небезпечних речовин в умовах забудови, який дозволяє здійснювати оцінку територіального ризику. Чисельне моделювання здійснюється на базі моделі аеродинаміки та поширення домішки в атмосферному повітрі. Чисельна модель орієнтована на проведення експрес розрахунків. Наведено опис алгоритму розв'язання задачі по оцінці територіального ризику при емісії хімічно небезпечної речовини під час екстремальної ситуації на промисловому об'єкті. Представлені результати обчислювального експерименту.

Вступление. В настоящее время, в Украине отсутствуют научно обоснованные методики для оценки территориального риска с учетом влияния застройки на формирование зон поражения. Такие методики необходимы для декларирования уровня промышленной безопасности объектов [1-5]. Нормативная методика ОНД-86 и методика прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте не могут быть применены для решения задачи по оценке уровня территориального риска при эмиссии химических агентов в условиях застройки. Данные методики не учитывают динамику изменения концентрации опасного вещества при аварийной эмиссии, не учитывают процессы атмосферной диффузии и т.д. Методики, основанные на применении модели Гаусса также малоэффективны, т.к. не позволяют учесть влияние зданий на процесс формирования зон поражения. Эти методики могут быть основаны только для экспресс оценки территориально риска. В этой связи актуальной задачей является разработка научно обоснованных методов оценки территориального риска при аварийной эмиссии химических агентов на промышленных объектах.

Целью данной работы является создание численной модели для оценки территориального риска при эмиссии химически опасных веществ в условиях застройки.

Постановка задачи. Моделируется процесс рассеивания хлора при его аварийной эмиссии из цистерн, находящихся на территории промышленного объекта. Ставится задача по определению зон поражения при различных метеоусловиях. Вероятность реализации конкретных метеоусловий – известна.

Модель аэродинамики. Поле скорости ветрового потока возле здания рассчитывается на базе модели идеальной жидкости:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

где P – потенциал скорости.

Значение компонент вектора скорости ветрового потока определяются на основе соотношений:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2)$$

Процесс переноса опасного вещества в воздушной среде рассчитывается на базе уравнения Марчука Г. И. (уравнение массопереноса), осредненного по высоте переноса примеси [1-5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (3)$$

где C – концентрация химического агента в атмосферном воздухе;

σ – коэффициент, учитывающий распад агента и оседание на поверхность земли;

u, v – компоненты вектора скорости воздушного потока;

$\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;

Q – интенсивность выброса химического агента;

$\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функция Дирака;

x_i, y_i – координаты источника эмиссии агента;

t – время.

Постановка краевых условий для моделирующих уравнений (1), (2) рассмотрена в [2, 3, 5].

Для численного интегрирования уравнения (1) используется метод Либмана, а для численного интегрирования уравнения переноса примеси применяется неявная разностная схема расщепления [2, 5].

Для оценки территориального риска при эмиссии опасного вещества будем учитывать, что каждому погодному состоянию $P(W_i)$ отвечает конкретная зона загрязнения, характеризующаяся размерами и концентрацией опасного вещества. Вероятность реализации конкретной метеоситуации определяется по

зависимости [1]:

$$P(W_i) = N_{II} / T, \quad (4)$$

где N_{II} – число дней (часов), соответствующих определенной метеоситуации;

T – период наблюдений (прогноз метеоситуации).

Под определенной метеоситуацией будем понимать конкретное значение скорости и направления ветра. Для оценки потенциального территориального риска необходимо оценить вероятность, для человека, находящегося в каждой точке расчетной области, оказаться под действием шлейфа (облака) химически опасного вещества. Мы учитываем те точки расчетной области в районе эмиссии, где концентрация химически опасного вещества превышает некоторое пороговое значение, при котором происходит та, или иная степень поражения людей. Значение этой концентрации приводится в специальной литературе.

Вероятность попадания человека под действие шлейфа опасного вещества определяется соотношением:

$$P(W)_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n P(W_i), \quad (5)$$

где $P(W)_{\Sigma}$ – суммарная вероятность всех рассматриваемых метеоситуаций, при которых человек попадает в зону влияния источника эмиссии и получает токсичное поражение.

Для расчета вероятности оказаться в зоне токсичного поражения при эмиссии опасного вещества необходимо, для конкретной точки расчетной области, выполнить расчеты по формуле (5).

Основой такого расчета является расчет концентрации опасного вещества в расчетной области и сравнение этой концентрации с пороговой. Далее определяются зоны, где концентрация превосходит пороговый уровень – это и есть зоны поражения. Для различных метеоусловий (вероятность - известна) – размер и форма зон поражения будет различной. Построенный алгоритм оценки территориального риска реализован в разработанном коде «CHEM-RISK-2». Для программирования был использован алгоритмический язык Fortran.

Разработанный код включает в себя набор подпрограмм типа «SUBROUTINE». Каждая подпрограмма осуществляет расчет определенного этапа задачи:

1. Расчет поля скорости возле здания.
2. Расчет потенциала скорости.
3. Расчет рассеивания опасного вещества в воздушной среде и определение динамики формирования зоны загрязнения для различных метеоситуаций.
4. Расчет полей риска для каждой конкретной метеоситуации.
5. Расчет концентрации опасного вещества в точке расположения рецептора.

Ввод исходных данных осуществляется в специальном файле, куда пользователь вводит следующую информацию:

1. Размеры расчетной области.
2. Размеры зданий.
3. Геометрическая форма зданий.
4. Параметры метеоситуации.
5. Мощность эмиссии опасного вещества.
6. Координаты источника эмиссии.
7. Координаты рецептора и т.д.

Результатом моделирования является поле загрязнения воздушной среды в расчетной области, поле территориального риска и концентрация опасного вещества в точке расположения рецептора (информация выдается на печать для различных моментов времени).

Результаты. Ниже представлены результаты решения модельной задачи с помощью разработанной численной модели.

На рисунке 1 представлена расчетная область. Рассматривается эмиссия хлора из двух источников (цистерны). Выброс происходит возле здания. Длительность эмиссии – 12 мин. Для региона вероятные значения скорости ветра составляют: 4 м/с (вероятность 15%) и 8 м/с (вероятность 85%). Ставится задача рассчитать величину территориального риска (масштаб *microscale*) для этих метеоситуаций. Принимается, что токсичное поражение наступает, если концентрация хлора в расчетной точке превышает 3 мг/м³.

На рисунке 1 показана зона загрязнения токсичным газом для момента времени 210 с, скорость ветра 4 м/с.

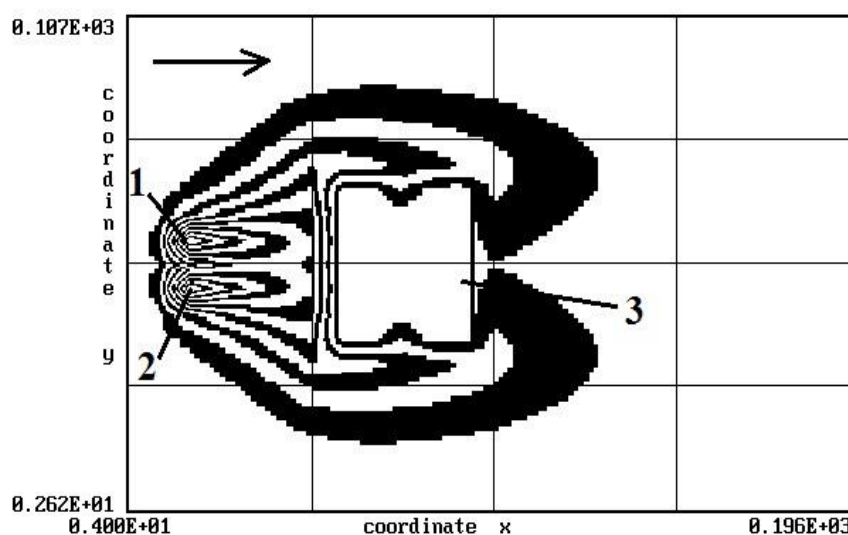


Рис. 1. Зона химического заражения при эмиссии опасного вещества:
1,2 – источники эмиссии опасного вещества; 3 – здание

Из рисунка 1 отчетливо видно положение двух источников эмиссии опасного вещества. В районе расположения этих источников формируются локальные подзоны с большим градиентом концентрации хлора. Также видно, что вне источников эмиссии, возле здания сформировалась сложная по форме зона химического заражения. Хорошо видно, что шлейф опасного вещества полностью обходит здание с обеих сторон и создает подзону загрязнения на подветренной стороне здания. Это означает, что за зданием отсутствует защитная подзона. Если люди будут покидать здание, при эвакуации, то они попадают в зону химического заражения на любой стороне здания. Это ставит задачу формирования «save rooms» в здании, чтобы избежать эвакуации из объекта. С другой стороны при разработке планов эвакуации необходимо сделать соответствующую корректировку.

На рисунке 2 представлена матрица потенциального территориального риска в районе эмиссии опасного вещества для момента времени 210 с для рассматриваемых метеоситуаций. Вероятность поражения людей показана в процентах на рисунке 2.

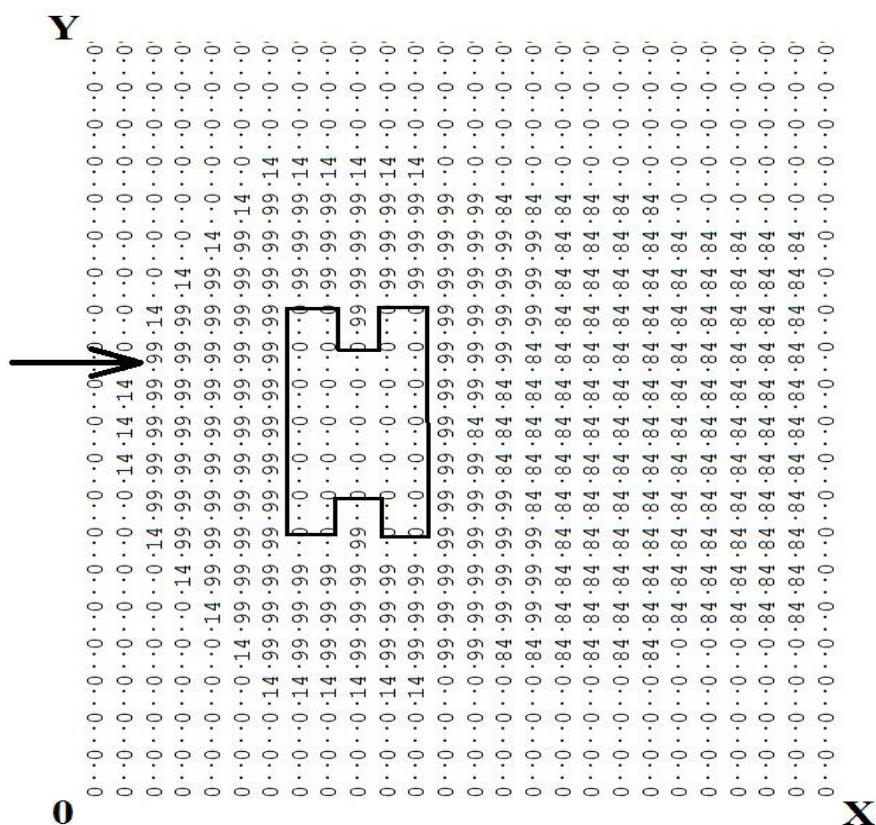


Рис. 2. Матрица территориального риска

Из рисунка 2 видно, что при эмиссии из цистерн риск химического поражения людей в районе здания – крайне высок. За зданием, на подветренной стороне, непосредственно возле здания, риск поражения – 99%. На подветрен-

ной стороне, на расстоянии порядка 60 м – риск поражения 84%, т.е. тоже крайне высок.

Затраты компьютерного времени на решение задачи составили 5 с. Данная модель может быть использована при разработке ПЛАСА на химически опасных объектах. Следует подчеркнуть, что в Украине, в настоящее время, отсутствуют модели такого класса, позволяющие оценивать территориальный риск с учетом влияния зданий на формирование зон химического заражения.

Выводы. Предложена численная модель для оценки территориального риска в случае эмиссии химически опасного вещества в условиях застройки. Оценка риска осуществляется на базе численного моделирования процесса рассеивания опасного вещества в атмосферном воздухе в условиях застройки. На основе такого расчета проводится оценка размеров зон, попадающих под влияние источника эмиссии химически опасного вещества. Дальнейшее совершенствование данного направления следует проводить в направлении создания 3D модели для расчета территориального риска в случае эмиссии химически опасного вещества.

Перечень ссылок

1. Biliaiev, M.M., Gunko, E.Yu., Rostochilo, N.V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv*. Dnipropetrovsk: Aktsent PP.
2. Biliaiev, M.M., Gunko, E.Yu., Kirichenko, P.S., Muntyan, L.Ya. (2017). *Otsenka tekhnogenogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoy Rog: Kozlov R.A. Publ.
3. Stoetskiy, V.F., Golin'ko, V.I., Dranishnikov, L.V. (2014). Otsenka riska pri avariyaх tekhnogenogo kharaktera. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 117-124.
4. Anthony, M.B. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. Ph.D. Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania.
5. Biliaiev, M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 87-91.

ABSTRACT

The results numerical model to simulate the air pollution and territorial risk after accident with toxic chemical emission.

The purpose of the study is development of quick computing numerical model to calculate territorial risk and air pollution after accident with toxic chemical.

The method: CFD simulation of toxic chemical dispersion in atmosphere.

Findings. New numerical model is proposed to compute territorial risk and atmosphere pollution after accident.

The originality. New model was developed for computing of atmosphere pollution and territorial risk assessment after accident with toxic chemical.

Practical implications. Developed model allows quick computing of territorial risk after accident or terror act near building. Results of numerical experiment are presented.

Keywords: *air pollution, toxic chemical emission, territorial risk assessment*