

7. Давыдов С.А. Численный расчет взаимодействия свободной поверхности жидкости с сетчатой разделительной перегородкой / С.А.Давыдов // Сб. научн. тр. «Математическое моделирование в механике жидкости и газа». – Днепропетровск, 1992. – С. 72 – 77.

8. Йи К.К. Свободные и вынужденные колебания жидкости в осесимметричном резервуаре в условиях слабого тяготения / К.К. Йи // «Прикладная механика». – 1967. – №1. – С. 98 – 106.

9. Колесников К.С. Колебания жидкости в цилиндрическом сосуде / К.С. Колесников. – М., 1964. – 370 с.

10. Кочин Н.Б. Теоретическая гидромеханика / Н.Б. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. – М., 1955 – Т.1. – 510 с.

11. Луковский И.А. Нелинейные колебания жидкости в сосудах сложной геометрической формы / И.А. Луковский. – Киев, 1975. – 135 с.

12. Луковский И.А. Математические модели нелинейной динамики твердых тел с жидкостью / И.А. Луковский. – Киев, 2010. – 408 с.

13. Микишев Г.Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов / Г.Н. Микишев. – М., 1978. – 248 с.

14. Abramson H. N. The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers with Applications to Space Vehicle Technology NASA SP-106 / H. N. Abramson. – Washington, D. C., 1966. – 468 p.

Надійшла до редколегії 22.10.13.

УДК 519.6

Н. Н. Беляев, Н. В. Росточило, А. Ю. Чорная

*Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКРАНА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТА ПРИ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНОГО ВЕЩЕСТВА В АТМОСФЕРЕ

Розроблена модель для визначення ефективності екранів для локального захисту будівель при міграції токсичних речовин. Модель базується на використанні рівнянь переносу аероіонів та моделі нев'язкої нестислої рідини. Розв'язання задачі знаходиться за допомогою різницьових схем.

Ключові слова: захист будівель, забруднення атмосфери, чисельне моделювання.

Разработана модель для определения эффективности экранов для локальной защиты зданий при миграции токсичных веществ. Модель базируется на использовании уравнений переноса аэроионов и модели невязкой несжимаемой жидкости. Решение задачи находится с помощью разностных схем.

Ключевые слова: защита зданий, загрязнение атмосферы, численное моделирование.

A model to estimate the effectiveness of the local shields to protect buildings in the case of the pollutant dispersion in the atmosphere was developed. The model is based on the pollutant dispersion equation and the model of the potential flow. To solve the model equations the difference schemes are used.

Key words: protection of buildings, pollution of the atmosphere, numerical simulation.

Введение. В настоящее время большой интерес проявляется к проблеме защиты людей при возникновении риска поражения химически опасными веществами

(ХОВ). Такая проблема возникает не только на химически опасных объектах и прилегающим к ним селитебным зонам, но и в случае применения химического оружия в жилых районах (Сирия, август 2013г.). В рамках этой сложной и глубокой проблемы можно выделить задачу об организации локальной защиты объекта от попадания ХОВ. Такая защита может представлять собой экран (непроницаемая перегородка), который устанавливается в определенном месте на объекте, создает механическое препятствие на пути переноса ХОВ и локально обеспечивает понижение концентрации ХОВ в этом месте на объекте. Такой способ защиты достаточно дешев и может быть быстро организован. Но важной задачей является определение эффективности работы такой защиты. Совершенно очевидно, что применение метода физического моделирования процесса в (изучение в аэродинамических трубах) – не целесообразно, так как на это требуются большие затраты времени и большие экономические затраты. Оперативно решение такой задачи может быть получено с помощью метода математического моделирования. Поэтому разработка математических моделей, служащих для поддержки принятия решений по организации защитных мероприятий является важной задачей в области экологической и промышленной безопасности. Анализ литературных источников показывает, что существует ограниченное количество работ, посвященных математическому решению этой проблемы [2].

Целью данной работы является разработка математической модели для расчета эффективности применения экранов для локальной защиты объектов при миграции ХОВ в атмосфере.

Формулировка задачи. Рассматривается ситуация миграции в атмосфере ХОВ. Требуется локально снизить концентрацию этого вещества возле объекта – здания. Более того, снижение концентрации необходимо обеспечить в определенном месте здания, например, там, где располагается устройство для забора воздуха и подачи его в производственное помещение (рис.1, точка, отмеченная «кружком»). В дальнейшем это место будем называть рецептором.

Требуется оценить эффективность защиты рецептора при использовании экранов различного типа.

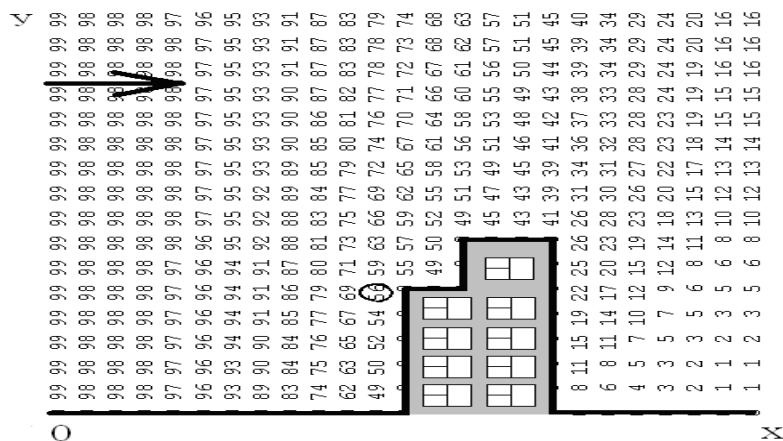


Рис. 1. Распределение концентрации опасного вещества возле здания при отсутствии защитного экрана ($t=15$ с.);
О – точка расположения рецептора

Моделирующие уравнения. Для расчета концентрации опасного вещества в атмосфере используется осредненное по ширине переноса (профильная задача) уравнение [1;3;4;6]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где C – концентрация примеси (химически опасное вещество); u, v , – компоненты вектора скорости движения ветрового потока; w – скорость гравитационного оседания примеси; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты атмосферной диффузии; t – время; ось Y направлена вертикально вверх.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [4;6].

Для расчета коэффициентов атмосферной диффузии используются такие зависимости [3]

$$\mu_y = 0,11 u;$$

$$\mu_x = 0,2 u,$$

где u – скорость ветра, y – текущее значение высоты; $n=0.15$ – параметр. Профиль скорости на входе в расчетную область полагается равномерным.

Решение уравнения (1) можно получить, если известно поле скорости ветрового потока, которое формируется под влиянием застройки и экрана. Для расчета поля скорости ветрового потока используется модель потенциального течения. Для решения задачи в такой постановке необходимо проинтегрировать уравнение [4;5]

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

где P – потенциал скорости.

Для уравнения (2) ставятся такие граничные условия [4;5]:

– на твердых стенках (здания, экран, верхняя и нижняя границы области):

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0,$$

где n – внешняя нормаль к данному участку границы;

– на входной границе (граница втекания потока ветра):

$$\frac{\partial P}{\partial n} = V_n,$$

где V_n – известное значение скорости ветра;

– на выходной границе расчетной области:

$$P = P_0 + const. \text{ (условия Дирихле).}$$

Компоненты вектора скорости воздушной среды рассчитываются на основе зависимостей [4;5]

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

Численное интегрирование моделирующих уравнений. Численное интегрирование уравнений гидродинамики и массопереноса осуществляется на прямоугольной разностной сетке. Формирование вида расчетной области (место расположения зданий) осуществляется с помощью технологии «porosity technique» [1;2;4]. Кроме этого, данная технология используется для задания места положения и формы экрана.

При решении гидродинамической задачи будем использовать идею установления решения по времени, то есть вместо решения уравнения Лапласа будем численно интегрировать следующее уравнение

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где η – фиктивное время.

При $\eta \rightarrow \infty$ решение уравнения (3) будет стремиться к «установлению», т.е. к решению уравнения (2).

Для численного интегрирования уравнения (3) используется метод Рундсона [7]. Для численного интегрирования уравнения (1) сначала выполняется предварительное расщепление данного уравнения на последовательность двух одномерных уравнений. Каждое одномерное уравнение интегрируется с помощью попеременно-треугольной неявной разностной схемы, [1;2;4]. На основе построенной модели создан код «SHIELD», реализованный на алгоритмическом языке FORTRAN.

Алгоритм расчета.

Основные этапы расчета на базе построенной CFD модели состоят в следующем:

1. Вводится исходная информация, определяющая физическую постановку моделируемого процесса (скорость ветра, положение экрана, его размеры и т.п.)
2. Осуществляется решение уравнения для потенциала скорости.
3. Рассчитывается поле скорости ветрового потока.
4. Осуществляется решение уравнения переноса примеси для расчета концентрации ХОВ в атмосфере в различные моменты времени.
5. Осуществляется печать поля концентрации ХОВ в расчетной области и на месте расположения рецептора для данного момента времени.

Практическая реализация CFD модели. Для моделирования рассматриваемого процесса необходимо задать следующую входную информацию:

- параметры метеоситуации;
- положение зданий и их форму;
- положение и форму экрана;
- координаты рецептора;
- концентрацию ХОВ на входе в расчетную область.

Ввод исходных данных осуществляется в отдельном файле типа «DAT».

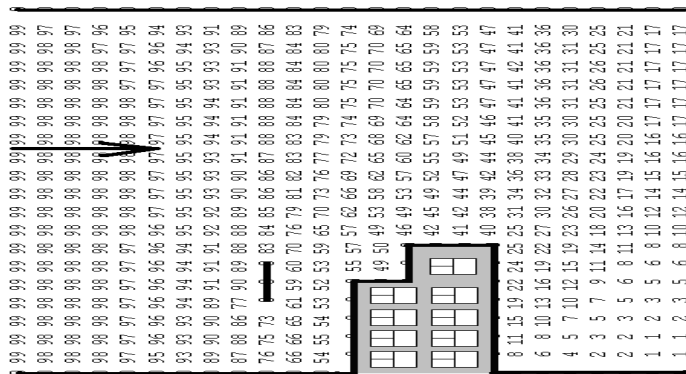
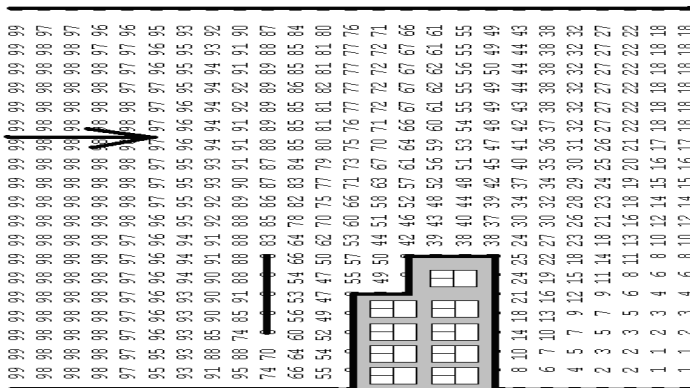
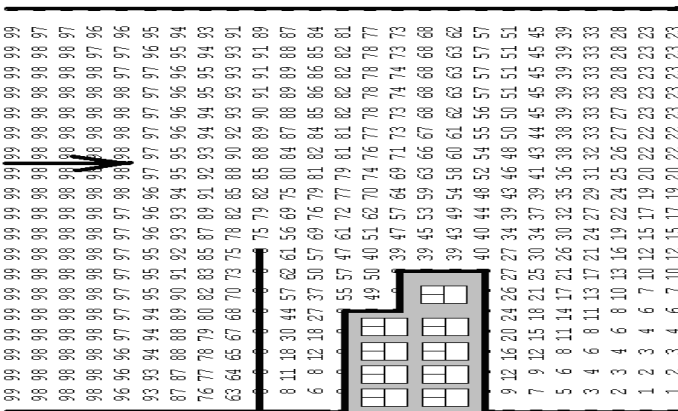
Разработанная модель была использована для исследования влияния различных экранов на снижение концентрации ХОВ в точке расположения рецептора (рис. 1., координаты рецептора: $x=46$ м, $y=9$ м). Рассматривались следующие сценарии:

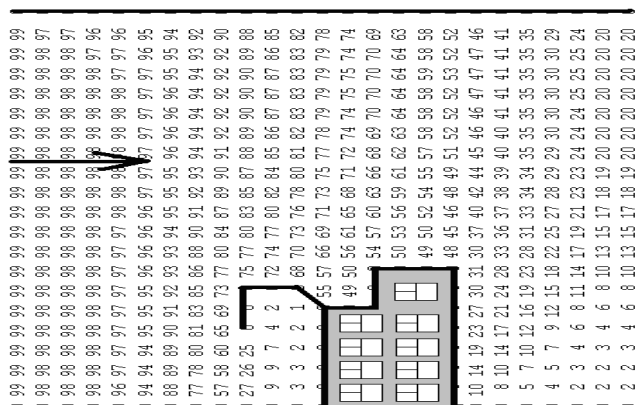
1. Нет защитного экрана перед объектом (рис. 1).
2. Экран «короткая пластина», рис. 2 (высота экрана 6 м).
3. Экран «удлиненная пластина», рис. 3 (высота экрана 10 м).
4. Экран «забор», рис.4 (высота экрана 16 м).
5. Экран «крючок», рис. 5 (высота экрана – 6 м, длина – 8 м).

Для всех этих сценариев экран находился на расстоянии 12 м от здания. Моделирование проведено для следующих параметров задачи: размеры расчетной области 100 м*42 м; скорость невозмущенного ветрового потока – 3.8 м/с (скорость потока на входе в расчетную область); минимальная высота здания – 10 м, максимальная высота – 14 м, ширина здания 24 м. Для моделирования наиболее «тяжелой» экологической ситуации, полагалось, что воздушный поток на входе в расчетную область равномерно загрязнен по всей высоте переноса и концентрация ХОВ (аммиак) на входе в расчетную область равна 1 (в безразмерном виде).

Рассмотрим результаты моделирования на базе разработанной модели. На рис. 1–5 представлено распределение безразмерного значения концентрации аммиака в расчетной области для различных моделируемых сценариев. На данных рисунках поле концентрации представлено в виде матрицы, что позволяет быстро определять наиболее загрязненные подзоны и, что особенно важно, – в области расположений экрана и рецептора. Значение концентрации на этих рисунках представлено в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени. Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», то есть дробная часть числа не выдается на печать. Это значит, что если, например, в расчетной точке значение концентрации составляет «53.2 %» от максимальной концентрации на входе в расчетную область «53». Этот вывод результатов на печать эффективен при проведении серийных расчетов, когда осуществляется «перебор» различных вариантов задачи.

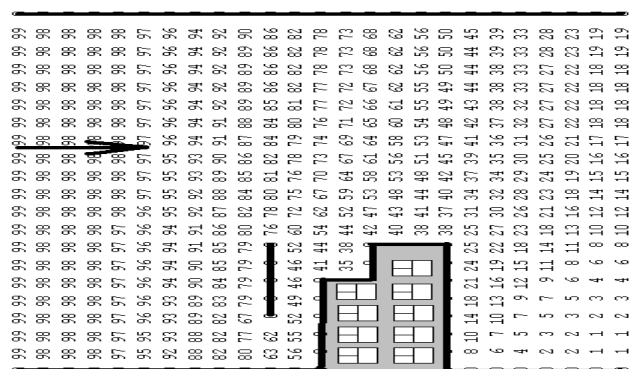
Как видно из представленных рисунков, наличие экрана приводит к локальной деформации возле него поля концентрации ХОВ. Непосредственно за экраном наблюдается снижение концентрации ХОВ.

Рис. 2. Зона загрязнения для момента времени $t=15$ с (экран «короткая пластина»)Рис. 3. Зона загрязнения для момента времени $t=15$ с (экран «удлиненная пластина»)Рис. 4. Зона загрязнения для момента времени $t=15$ с (экран «забор»)

Рис. 5. Зона загрознення для моменту часу $t=15$ с (екран «крючок»)

Представленные рисунки позволяют легко анализировать интенсивность загрязнения атмосферы в любой части расчетной области. Во-первых видно, что за зданием формируется область с пониженной концентрацией опасного вещества, что обусловлено, тем, что само здание выполняет «роль» экрана. Хорошо также виден защитный эффект экрана «крючок»: в зоне его влияния наблюдается минимальная интенсивность загрязнения воздушной среды. Здесь концентрация ХОВ находится в диапазоне от 1 % до 9 % от значения концентрации загрязнителя на входе в расчетную область.

На рис. 6 представлена зона загрязнения для другого расчетного случая – это третий сценарий (экран – удлиненная пластина), но здесь экран располагается ближе к зданию, чем в рассмотренном ранее сценарии, а именно на расстоянии 8 м от здания.

Рис. 6. Зона загрознення для моменту часу $t=15$ с (екран «удлиненная пластина», приближенная к зданию)

Прогнозируемое значение концентрации для этого случая показано в табл. 1. Видно, что приближение данного экрана к зданию позволило незначительно снизить концентрацию на месте расположения рецептора.

Для оценки эффективности применения каждого экрана в табл. 1 представлено значение концентрации ХОВ в точке расположения рецептора, а также значение «эффективности» защиты, которая рассчитывалась следующим образом

$$I = \frac{(C - C_s) \cdot 100\%}{C},$$

где C – концентрация ХОВ в точке расположения рецептора без экрана; C_s – концентрация ХОВ в точке расположения рецептора при наличии экрана.

Таблица 1

Значение концентрации химического опасного вещества в точке расположения рецептора при использовании различных защитных экранов

Сценарий	Время t=11 с	Время t=13 с	Время t=15 с	I – интенсивность снижения концентрации на момент времени t=15с в точке расположения рецеп- тора
Нет экрана	0.292	0.438	0.565	-----
Экран «короткая пластина»	0.246	0.390	0.523	7 %
Экран «удлиненная пластина»	0.210	0.345	0.472	16 %
Экран «забор»	0.113	0.191	0.275	51 %
Экран «крючок»	0.003	0.008	0.016	97 %
Экран «удлиненная пластина», при- ближенная к зданию	0.163	0.327	0.466	17 %

Как видно из данной таблицы, наиболее эффективную защиту обеспечивает экран типа «крючок».

В заключение отметим, что расчет задачи на базе разработанной модели составляет 7 с компьютерного времени.

Выводы. В работе представлена новая CFD модель для расчета эффективности применения экрана для локальной защиты объекта от загрязнения при миграции опасных веществ в атмосфере. Моделирование основывается на предварительном расчете поля скорости ветрового потока на базе модели потенциального течения. Для расчета переноса опасного в атмосфере используется модель Марчука Г. И. [6]. Для практической реализации на ПК разработанной CFD модели требуется несколько секунд времени, что является крайне важным для ее практического применения как в режиме «on line», так и в случае проведения серийных расчетов при разработке ПЛАСа (план ликвидации аварийной ситуации). Разработанная модель может служить инструментом решения комплекса задач в области экологической и промышленной безопасности. Дальнейшее развитие данной тематики следует вести в направлении построения 3-D модели подачи.

Библиографические ссылки

1. Антошкина Л.И. Оценка экологического риска при авариях с химически опасными веществами / Л.И. Антошкина, Н.Н. Беляев, Е.Ю. Гулько. – Днепропетровск, 2008. – 132с.
2. Беляев Н.Н., Лисяк В.М. Защита атмосферы от загрязнения при миграции токсичных веществ / Н.Н. Беляев. – Днепропетровск, 2006. – 150 с.
3. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л., 1985. – 273 с.
4. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев, 1997. – 368 с.
5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М., 1978. – 735с.
6. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. – М., 1982. – 320 с.
7. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М., 1980. – 616 с.

Надійшла до редколегії 18.10.2013.

UDC 519.6

E. Gunko

Academician V. Lasarjan Dnepropetrovsk National University of Railway Engineering

CFD MODELING OF THE ATMOSPHERE POLLUTION IN THE CASE OF ACCIDENTS FOR SOLVING MONITORING PROBLEMS

Розроблено CFD модель та код для моделювання тривимірного процесу переносу забруднювача в умовах забудови. Розроблена модель базується на чисельному інтегруванні тривимірного рівняння переносу домішки та моделі потенціальної течії. Для чисельного інтегрування використовуються неявні різницеві схеми.

Ключові слова: забруднення атмосфери, чисельне моделювання, розсіювання домішки.

Разработано CFD модель и код для моделирования трехмерного процесса переноса загрязнителя в условиях застройки. Разработанная модель основывается на численном интегрировании трехмерного уравнения переноса примеси и модели потенциального течения. Для численного интегрирования используются неявные разностные схемы.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, численное моделирование, рассеивание примеси.

CFD model and code were developed to simulate the pollutant dispersion among buildings. The model is based on the K-gradient model of pollutant dispersion and the model of the potential flow. The implicit schemes are used for the numerical integration.

Key words: atmosphere pollution, numerical simulation, pollutant dispersion.

Introduction. In the problem of the ecological monitoring, the prediction of the atmosphere pollution after accidents is the problem of the great interest because the solution of this problem provides the experts with the necessary information about the hitting areas and the level of the danger. To predict the air pollution after accidents with toxic substances, the special standard model is used in Ukraine [7]. This is the empirical model. This model has a lot of lacks and is widely criticized in scientific circles. This model can provide the information about the square of contaminated area. This model doesn't take into account the influence of the wind velocity or wind direction on the concentration dispersion. The main lack of this model is that it cannot predict the change of the concen