

## ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 502.3:504.5:656.085.6

Т. И. РУСАКОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, ул. Казакова, 18, корп. № 14, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, эл. почта rusakovat@yandex.ru, ORCID 0000-0001-5526-3578

### ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ ПРИ АВАРИЯХ НА ДОРОГАХ ГОРОДА

**Цель.** В работе рассмотрен вопрос о создании математического аппарата для оценки экологической ситуации при авариях на дорогах города (взрывах). Прежде всего это касается разработки численной модели для расчета уровня загрязнения атмосферного воздуха при эмиссии химически опасного вещества с учетом метеорологических параметров окружающей среды. Предполагается также выявление участков, где наблюдается превышение предельно допустимой концентрации по данному загрязнителю (в нашем случае, – по аммиаку), и участков, благоприятных для населения. **Методика.** В исследовании применялась разработанная методика численного расчета концентрации загрязнения воздушной среды при выбросе химически опасного вещества (аммиака), которая основана на совместном решении гидродинамической задачи и задачи по переносу примеси в атмосфере. Решение гидродинамической задачи базируется на методе дискретных вихрей с учетом различной геометрии зданий и их взаимного расположения, а решение задачи по переносу загрязнителя – на уравнении конвективно-диффузионного переноса примеси с использованием неявных разностных схем. **Результаты.** На основе разработанной численной модели проведен ряд вычислительных экспериментов. В результате выполненных расчетов были получены: вихревые структуры, которые формируются при обтекании зданий; поле скорости ветрового потока вблизи зданий; картина линий тока в области течения. Рассчитаны концентрации химически опасного вещества (аммиака) во всей исследуемой области; проведен сравнительный анализ с предельно допустимой концентрацией (ПДК) по данному загрязнителю; установлены закономерности по изменению концентрации аммиака с наветренной и подветренной стороны зданий. **Научная новизна.** Создана численная модель, которая позволяет наглядно воссоздать и проанализировать структуру потока, наличие застойных зон, областей возвратного течения при различной геометрии зданий и их взаимном расположении, что оказывает влияние на распространение загрязняющего вещества в атмосфере. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволят проводить оценку уровня токсичного поражения людей при авариях (взрывах) на дорогах города с учетом влияния геометрии зданий на гидродинамическую структуру потока и рассеивание загрязнителя.

**Ключевые слова:** химически опасное вещество; интенсивность выброса загрязнителя; концентрация загрязняющего вещества; метод дискретных вихрей; уравнение переноса примеси; численная модель

#### Введение

Аварии на химически опасных объектах (ХОО) при транспортировке опасных грузов, а также при терактах приводят к поступлению в атмосферу различных веществ, многие из которых могут вызвать поражение людей. Украин-

на имеет хорошо развитую химическую промышленность и большое количество промышленных объектов, где используются химически опасные вещества. Кроме этого, ежедневно осуществляется транспортировка химически опасных веществ различными видами транспорта. Все это создает угрозу химического за-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

гязнення отуражающей среды при чрезвычайных ситуациях на таких объектах.

На основе данных, предоставленных МЧС в Днепропетровской области, был выполнен анализ чрезвычайных ситуаций, при которых произошла эмиссия химически опасных веществ и в период с 2006 г. по 2013 г. Этот анализ показал, что наиболее часто эмиссия химически опасных веществ происходила [2]:

- при транспортировке химически опасных грузов железнодорожным транспортом;
- при транспортировке химически опасных грузов автомобильным транспортом;
- непосредственно на химически опасных предприятиях в г. Днепропетровске, расположенных в селитебных зонах или на городских сетях.

За рубежом количество аварий, сопровождающихся эмиссией химически опасных веществ, очень велико, что связано с широким развитием химической промышленности. Так, в период с 1998 г. по 2008 г., в США произошло порядка 170 тыс. аварий только при транспортировке опасных грузов. Кроме этого, опасность токсичного поражения людей исходит от терактов с применением химического оружия (например, Сирия, август 2013 г.). Нестабильная обстановка в ряде районов Украины создает огромный потенциальный риск химического загрязнения атмосферы, поскольку в этих районах располагаются крупные химические производства.

Следует подчеркнуть, что при чрезвычайных ситуациях, сопровождающихся эмиссией химически опасных веществ или биологических загрязнителей наиболее быстро наступает поражение за счет ингаляции опасных веществ, что обусловлено быстрым их распространением в воздушной среде [18–19].

Достаточно часто аварийные ситуации, сопровождающиеся выбросом (разливом) химически опасных веществ, возникают на следующих объектах: пункты заправки; прирельсовые склады; базовые склады; полевые емкости; цеха по производству опасных веществ; цеха, где используются опасные вещества в технологическом процессе; железнодорожные сортировочные станции.

Следует отметить, что крайне опасны аварии на складах, где могут быть сосредоточены большие объемы химически опасных веществ,

а также на железнодорожных сортировочных станциях, где имеют место маневровые работы с крупнотоннажными грузами (цистерны по 60 и 120 т). При авариях на ХОО с участием железнодорожного транспорта может происходить сход цистерн, нарушение целостности их оболочки и вылив значительного количества опасного груза. Даже при небольшой эмиссии ХОВ, вследствие атмосферной диффузии, создается большая зона загрязнения. Однако, хорошо известно, что даже при относительно невысокой концентрации загрязнителя в атмосфере, но достаточно длительном времени экспозиции может наступить токсическое поражение людей.

Теракты являются чрезвычайной ситуацией, в результате которой может произойти умышленная эмиссия опасных веществ (в первую очередь, химических или биологических, реже – радиоактивных) в воздушную среду.

В настоящее время риск осуществления терактов с химическими и биологическими агентами – очень велик [2, 14, 18–19]. При терактах на промышленных объектах и транспорте возможна эмиссия опасных веществ в атмосферу в очень больших количествах. При терактах на улицах городов – в селитебной зоне, возможно поступление в атмосферу хоть и меньшего количества опасного вещества, чем при теракте на ХОО, но риск поражения остается крайне высоким. Это связано с тем, что опасное вещество может быть «доставлено» непосредственно близко к объекту атаки и при отсутствии систем «опознавания опасности и своевременного оповещения» привести к массовому поражению людей. Эмиссия опасных веществ при терактах, ставит крайне важную задачу в области экологической безопасности – быструю минимизацию концентрации опасного вещества в атмосферном воздухе с целью защиты людей от токсичного поражения. Особенно важно организовать такую защиту для людей, находящихся в зданиях. Это связано с тем, что в последнее время целью террористов являются именно здания, как жилые, так и административные [18–19].

В связи с этим возникает важная задача оценки уровня токсичного поражения людей на улицах при аварийных происшествиях на дорогах города. Для решения этой задачи необходимо иметь модели прогноза уровня загрязне-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ния воздушной среды. В настоящее время используется несколько классов математических моделей для решения данных задач. Как правило, это аналитические модели – модель Гаусса [5, 9] и численные модели [2–4, 7, 10–15, 17–20]. Аналитические модели позволяют оперативно рассчитать поле концентрации загрязняющего вещества при мгновенном источнике выброса (теракт). Большим недостатком этих моделей является то, что они не учитывают влияние зданий на улицах на процесс формирования зоны загрязнения. При использовании численных моделей, которые основаны на уравнениях Навье-Стокса требуется значительное количество компьютерного времени (порядка нескольких суток) и наличие универсальной модели турбулентности для данного класса задач. Даже общеизвестные модели турбулентности [16] дают достаточно плохие результаты при моделировании обтекания зданий. Нормативная методика, которая используется в Украине для расчета зон поражения с химически опасными веществами, также не учитывает влияние зданий на перенос загрязняющих веществ в атмосфере.

## Цель

Целью данной работы является создание математического аппарата для оценки экологической ситуации при авариях на дорогах города (взрывах), а именно разработка численной модели для расчета уровня загрязнения атмосферного воздуха при эмиссии химически опасного вещества с учетом метеорологических параметров окружающей среды. Выявление участков, где наблюдается превышение предельно допустимой концентрации по данному загрязнителю (в данном случае по аммиаку), и участков благоприятных для населения.

## Методика

*Гидродинамическая модель.* В данной работе рассматривается процесс нестационарного отрывного обтекания зданий с изломами образующей (рис. 1) в двухмерной постановке. Постройки имеют основные геометрические размеры: длины –  $\ell_1, \ell_2$ ; высоты –  $h_1, h_2$ ; расстояние между зданиями  $\Delta\ell$ .

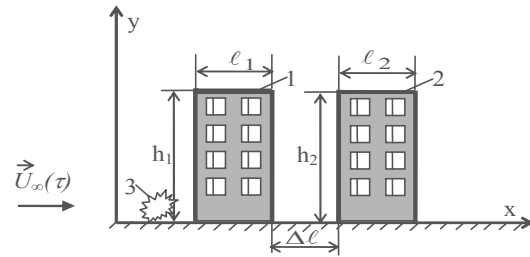


Рис. 1. Схема расчетной области:

1, 2 – здания;

3 – взрыв химически опасного вещества

Fig. 1. The computational domain diagram:

1, 2 – buildings;

3 – explosion of chemically dangerous substance

Параметры  $h_1, h_2, \ell_1, \ell_2, \Delta\ell$  могут варьироваться в зависимости от высоты зданий и способа их расположения. Ветровой поток набегаёт со скоростью  $\bar{U}_\infty(\tau)$  вдоль положительной оси  $Ox$ . За характерный размер принята величина  $\ell = h_1$ , где  $h_1$  – высота первого здания; за характерную скорость – значение скорости набегающего потока  $\bar{U}_\infty(\tau)$ , где  $\tau$  – безразмерное время, которое определяется, как  $\tau = U_\infty(\tau) \cdot t / \ell$ ;  $t$  – физическое время.

Моделирование процесса обтекания зданий потоком воздуха основано на применении гидродинамической модели идеальной жидкости. В основе данной модели лежит метод дискретных вихрей [1, 7].

Для моделирования процесса обтекания данных сооружений у поверхности земли используются основная и зеркально отображенная вихревые системы. Каждая из них состоит из присоединенных дискретных вихрей, циркуляции которых  $\Gamma_\mu$  равны по величине и противоположны по знаку, и свободных  $\delta_1^\tau, \delta_2^\tau, \delta_3^\tau, \delta_4^\tau$  вихревых пелен, сходящих с изломов поверхностей в каждый момент времени  $\tau$  рис. 2. Движение последних в обеих вихревых системах происходит симметрично. При таком разбиении на линии симметрии  $Ox$  автоматически в любой момент времени выполняется условие непротекания, что равносильно присутствию здесь поверхности земли. Схема разбиения поверхностей сооружений включает:  $n$  контрольных точек, где выполняется граничное условие непротекания и  $n$  дискретных вихрей, которые

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ми моделюється непроницаема поверхність зданий. Первіє розполагаються на лініях  $\nu$ , а вторіє – на лініях  $\mu$  между контрольными точками как в основной, так и зеркально отображенной вихревых системах, рис. 2.

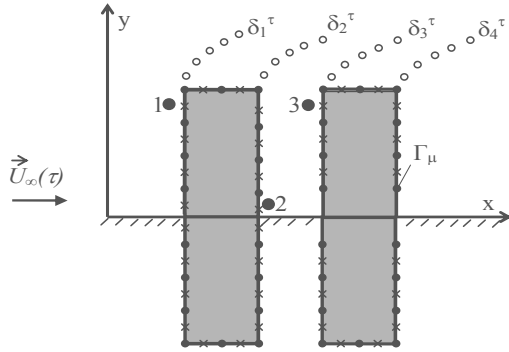


Рис. 2. Моделирование поверхностей зданий системой дискретных вихрей (•) и контрольных точек (×): 1, 2, 3 – точки наблюдения

Fig. 2. Surface modeling of buildings system of discrete vortices (•) and control points (×): 1, 2, 3 – watchpoints

Циркуляции присоединенных вихрей  $\Gamma_\mu$  на  $k$ -ом шаге по времени определяются из решения системы линейных алгебраических уравнений (1), которая выражает собой условие непротекания поверхностей зданий и условие бесциркуляционного обтекания.

$$\sum_{\nu=0}^n \left[ \sum_{\mu=0}^n \Gamma_\mu (a_{\nu\mu} - a'_{\nu\mu}) = -\cos(\vec{U}_\infty, \vec{n})_\nu \right] - \sum_{kk=1}^4 \sum_{i=1}^k \delta_{kk i} (a_{kk i} - a'_{kk i})_\nu, \quad (1)$$

где  $\Gamma_\mu$  – циркуляция  $\mu$ -ого присоединенного вихря;  $a_{\nu\mu}$ ,  $a'_{\nu\mu}$  – нормальные составляющие скорости в  $\nu$ -ой контрольной точке от  $\mu$ -ого присоединенного вихря основной и зеркально отображенной вихревых систем;  $(a_{kk i})_\nu$ ,  $(a'_{kk i})_\nu$  – нормальные составляющие скорости в  $\nu$ -ой контрольной точке от  $i$ -ого свободного вихря основной и зеркально отображенной вихревых систем;  $kk$  – порядковый номер вихревой пелены;  $k$  – количество свободных вихрей в потоке в момент времени  $\tau$  в соответствующей вихревой пелене  $kk$ ;

doi 10.15802/stp2015/42171

$\cos(\vec{U}_\infty, \vec{n})_\nu$  – косинус угла между вектором скорости потока  $\vec{U}_\infty(\tau)$  и нормалью  $\vec{n}$  к поверхности тела в каждой контрольной точке. Вычисленные значения циркуляций присоединенных дискретных вихрей  $\Gamma_\mu$  в местах излома поверхностей определяют циркуляции свободных вихрей  $\delta_1^i$ ,  $\delta_2^i$ ,  $\delta_3^i$ ,  $\delta_4^i$  в расчетные моменты времени  $\tau$ ,  $i=1, \dots, k$ .

Новое положение свободных вихрей определяется согласно методу Эйлера по соотношениям (2), (3).

$$x_{kk i}^{\tau+1} = x_{kk i}^\tau + \left[ \sum_{\mu=0}^n (V_{xi\mu} - V'_{xi\mu}) + \sum_{j=1}^k (V_{xij} - V'_{xij}) + U(\tau) \right] \cdot \Delta t, \quad (2)$$

$$y_{kk i}^{\tau+1} = y_{kk i}^\tau + \left[ \sum_{\mu=0}^n (V_{yi\mu} - V'_{yi\mu}) + \sum_{j=1}^k (V_{yij} - V'_{yij}) \right] \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, k; \quad kk = 1, \dots, 4;$$

где  $V_{xi\mu}$ ,  $V'_{xi\mu}$  –  $x$ -е составляющие скорости в расчетной точке  $i$  от присоединенного вихря  $\mu$ , основной и зеркально отображенной вихревых систем;  $V_{yi\mu}$ ,  $V'_{yi\mu}$  –  $y$ -е составляющие скорости в расчетной точке  $i$  от присоединенного вихря  $\mu$ , основной и зеркально отображенной вихревых систем;  $V_{xij}$ ,  $V'_{xij}$  –  $x$ -е составляющие скорости в расчетной точке  $i$  от свободного вихря  $j$ , основной и зеркально отображенной вихревых систем;  $V_{yij}$ ,  $V'_{yij}$  –  $y$ -е составляющие скорости в расчетной точке  $i$  от свободного вихря  $j$ , основной и зеркально отображенной вихревых систем. Эти компоненты скорости можно найти из соотношений (4), (5).

$$V_{xik} = \frac{1}{2\pi} \frac{y_k - y_i}{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}, \quad (4)$$

$$V_{yik} = -\frac{1}{2\pi} \frac{x_k - x_i}{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}, \quad (5)$$

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

где  $k$  – расчетная точка, в которой определяется скорость;  $i$  – вихрь, который индуцирует скорость.

Для расчета поля скорости используются основные зависимости [1, 7] (6) – (7).

$$V_{xi} = \sum_{\mu=0}^n \Gamma_{\mu} (V_{xi\mu} - V'_{xi\mu}) + \sum_{r=1}^p \sum_{j=1}^k \Gamma_{\delta_r} (V_{xj\delta_r} - V'_{xj\delta_r}) + U_{\infty}(\tau), \quad (6)$$

$$V_{yi} = \sum_{\mu=0}^n \Gamma_{\mu} (V_{yi\mu} - V'_{yi\mu}) + \sum_{r=1}^p \sum_{j=1}^k \Gamma_{\delta_r} (V_{yj\delta_r} - V'_{yj\delta_r}), \quad (7)$$

где  $\Gamma_{\mu}$  – циркуляция  $\mu$ -ого присоединенного вихря,  $\Gamma_{\delta_r}$  – циркуляция свободного вихря  $r$ -ой вихревой пелены;  $U_{\infty}(\tau)$  – скорость набегающего потока;  $V_{xi}$ ,  $V_{yi}$  – компоненты скорости в рассматриваемой точке плоскости  $(x_i, y_i)$ , которые можно рассчитать как сумму соответствующих компонент скорости от всей вихревой системы: присоединенных вихрей  $\mu_r$  (компоненты  $V_{x\mu}$ ,  $V_{y\mu}$ ), которыми моделируются поверхности зданий, и свободных вихрей  $\delta_r$  (компоненты  $V_{x\delta_r}$ ,  $V_{y\delta_r}$ ), сошедших с острых кромок, на данный момент времени  $\tau$  основной и зеркально отображенной вихревой системы.

Разработанная численная модель была применена для расчета структуры вихревого потока, линий тока и поля скорости при обтекании зданий ветровым потоком. Эта модель позволяет получить гидродинамическую картину обтекания зданий на улице, что является крайне важным для дальнейшей оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха при эмиссии химически опасного вещества. Наличие плотной и высотной застройки усложняет движение воздушных масс в приземном слое атмосферы города, приводит к торможению воздушных потоков, к резкому ухудшению проветривания городской территории, к увеличению концентрации вредных атмосферных загрязнений. В условиях города поле скорости ветра имеет очень сложный вид, оно

изменяется почти в каждой точке пространства, как по абсолютной величине, так и по направлению. Даже при обтекании ветром одного отдельного дома или сооружения возникает заторможенный поток вокруг любой части преграды, ускоренный поток на боковых поверхностях и над крышей, отрывные течения на подветренной стороне объекта.

*Модель массопереноса.* При эмиссии химически опасных веществ на улице крайне важно рассчитать динамику изменения концентрации опасного вещества в различных точках на улице на пешеходном уровне или на уровне различных этажей. Для решения этой задачи используется уравнение переноса примеси (8) [5, 10].

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad}C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (8)$$

где  $C$  – концентрация химически опасного вещества;  $u, v$  – компоненты вектора скорости ветра;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса химически опасного вещества (аммиака);  $\delta(x - x_i)(y - y_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i$  – координаты источника выброса химически опасного вещества;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий химический распад химически опасного вещества;  $t$  – время.

На практике для определения уровня опасности химического загрязнения воздушной среды используется несколько подходов. Одним из подходов является оценка уровня загрязнения воздушной среды с помощью предельно допустимой концентрации (ПДК). В табл. 1 представлено значение ПДК для некоторых химических веществ, широко применяемых на химически опасных объектах Украины.

Из табл. 1 видно, что ПДК в рабочей зоне значительно выше такого показателя, как максимально разовая ПДК, поэтому для экспресс оценки опасности уровня загрязнения воздушной среды при чрезвычайных ситуациях можно использовать значение ПДК в рабочей зоне как «отправную» точку. Это особенно важно, когда нет информации о значении смертельной концентрации для вещества.

Таблица 1

## Значение ПДК для некоторых химически опасных веществ

Table 1

## MPC value for some chemical dangerous substances

Вещество	ПДК в рабочей зоне, мг/м <sup>3</sup>	Максимально разовая ПДК, мг/м <sup>3</sup>
Аммиак	20	0,2
Хлор	1	0,1
Оксид углерода	20	5
Сероуглерод	1	0,03
Сероводород	10	0,008

Предельно допустимая концентрация (ПДК) аммиака составляет в воздухе населенных пунктов: среднесуточная 0,04 мг/м<sup>3</sup>, максимальная разовая 0,2 мг/м<sup>3</sup>. В воздухе рабочей зоны производственных помещений 20 мг/м<sup>3</sup>. В воде водоемов 2 мг/м<sup>3</sup>. Порог восприятия запаха 0,5 мг/м<sup>3</sup>. При концентрации 40–80 мг/м<sup>3</sup> наблюдается резкое раздражение глаз, верхних дыхательных путей, головная боль, при 1200 мг/м<sup>3</sup> – кашель, возможен отек легких. Смертельными считаются концентрации 1 500–2 700 мг/м<sup>3</sup>, действующими в течение 0,5–1 часа. Максимально допустимая концентрация аммиака для фильтрующих промышленных и гражданских противогазов составляет 15 000 мг/м<sup>3</sup>.

**Метод решения.** Постановка краевых условий для уравнения (1) рассмотрена в работах [2–4, 7–8]. Для формирования вида расчетной области положения зданий, их формы используем метод маркирования расчетной области. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке. Используя данный метод, можно формировать любую форму зданий на улицах и выбирать их взаимное расположение.

Для интегрирования уравнения переноса примеси (6) применяется попеременно-треугольная разностная схема расщепления [8, 10]. Обозначаем  $\delta_{ij}$  – число «1» или «0», в зависимости от того, расположен или нет в разностной ячейке « $ij$ » источник выброса химически опасного вещества. Значение  $Q_{ij}$  равно интенсивности  $Q_k$  соответствующего  $k$ -ого

источника, размещенного в разностной ячейке « $ij$ », деленной на площадь этой ячейки  $Q_{ij} = Q_k / (\Delta x \cdot \Delta y)$ . В разностном аналоге уравнение переноса расщепляем на четыре разностных уравнения так, чтобы на каждом шаге учитывалось лишь одно направление переноса возмущений, определяемое знаком при конвективной производной [7].

**Практическая реализация модели.** Построена численная модель распространения химически опасного вещества на улице. Данная модель позволяет учитывать следующие факторы: наличие зданий и их взаимное расположение; скорость и направление ветра; атмосферную диффузию; местоположение и интенсивность выброса химически опасного вещества.

Ставится задача изучения динамики загрязнения атмосферного воздуха при эмиссии опасного вещества (аммиака) на улице интенсивностью  $Q=1000$  г/с. Полагается, что выброс осуществляется в течение короткого промежутка времени, порядка нескольких секунд  $t=5$  с (рис. 1). Расчет выполняется при следующих параметрах: размеры расчетной области 150 м на 84 м; скорость ветра 6 м/с; коэффициент диффузии  $\mu=3$  м<sup>2</sup>/с; здания одинаковой длины  $\ell_1 = \ell_2=12$  м и высоты  $h_1=h_2=21$  м, расстояние между зданиями  $\Delta\ell=36$  м.

Результаты расчета структуры вихревого потока и поля скорости представлены на рис. 3–4. Видно формирование застойных зон и зон возвратного течения.

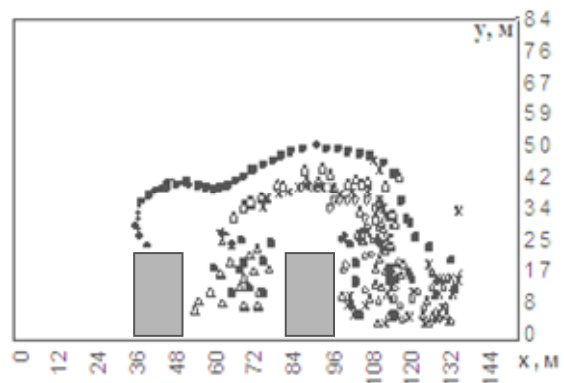


Рис. 3. Вихревая структура при обтекании зданий ветровым потоком

Fig. 3. Vortex structure in the flow around buildings wind flow

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

На рис. 5–8 показана динаміка формування зон замітнення на улице в різні моменти часу  $t=10, 20, 30, 40$  с. На цих рисунках значення концентрації представлено в процентах від величини максимальної концентрації на даний розрахунковий момент часу.

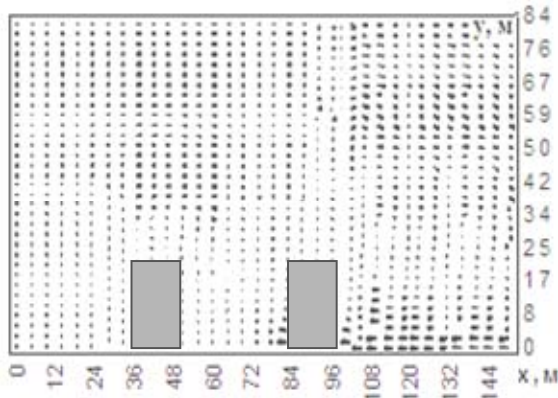


Рис. 4. Поле шкритости при обтекании зданий ветровым потоком

Fig. 4. The velocity field in the flow around buildings wind flow

Хорошо видно, как с течением времени формируется сложная зона замітнення, вызванная влиянием зданий, которые являются препятствиями при распространении химически опасного вещества. Облако замітнення очень быстро охватывает оба здания, создавая тем самым угрозу токсического поражения людей на улице.

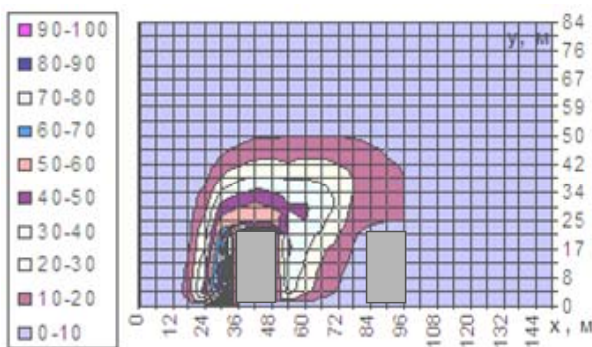


Рис. 5. Зона замітнення атмосферного воздуха для  $t=10$  с,  $C_{\max}=1,093$  г/м<sup>3</sup>

Fig. 5. Zone air pollution for  $t = 10$  s,  $C_{\max} = 1.093$  g/m<sup>3</sup>

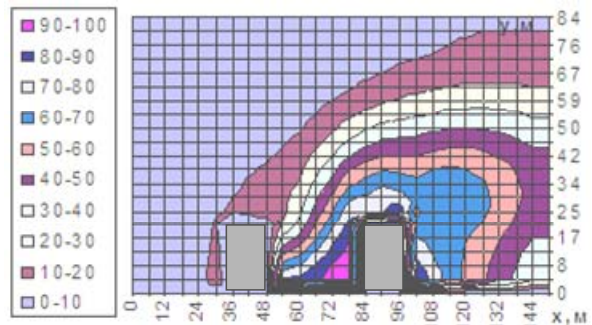


Рис. 6. Зона замітнення атмосферного воздуха для  $t=20$  с,  $C_{\max}=0,289$  г/м<sup>3</sup>

Fig. 6. Zone air pollution for  $t = 20$  s,  $C_{\max} = 0.289$  g/m<sup>3</sup>

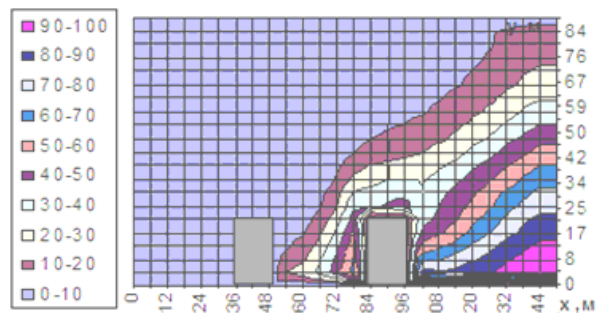


Рис. 7. Зона замітнення атмосферного воздуха для  $t=30$  с,  $C_{\max}=0,159$  г/м<sup>3</sup>

Fig. 7. Zone air pollution for  $t = 30$  s,  $C_{\max} = 0.159$  g/m<sup>3</sup>

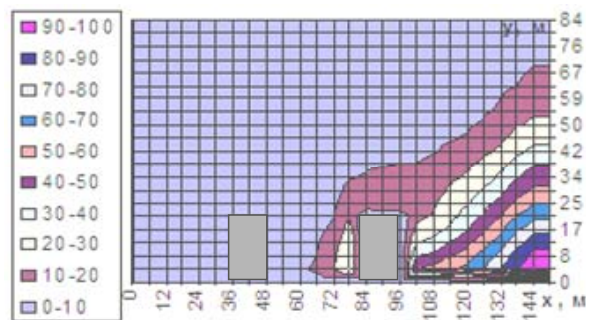


Рис. 8. Зона замітнення атмосферного воздуха для  $t=40$  с,  $C_{\max}=0,061$  г/м<sup>3</sup>

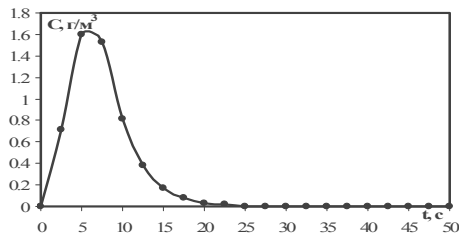
Fig. 8. Zone air pollution for  $t = 40$  s,  $C_{\max} = 0.061$  g/m<sup>3</sup>

Для оценки уровня угрозы токсического поражения людей рассчитана концентрация химически опасного вещества (аммиака) в различных точках на улице (показанных кружочком на рис. 2), а именно: точка 1 – наветренная сторона первого здания (место размещения

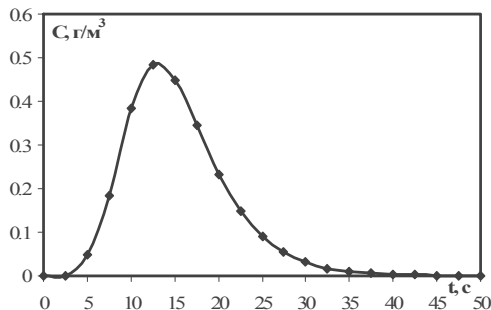
## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

воздухо-заборника); точка 2 – пешеходный уровень (подветренная сторона первого здания); точка 3 – наветренная сторона второго здания (место размещения воздухо-заборника). На рис. 9 показано изменение концентрации в этих точках с течением времени.

*a–a*



*b–b*



*b–c*

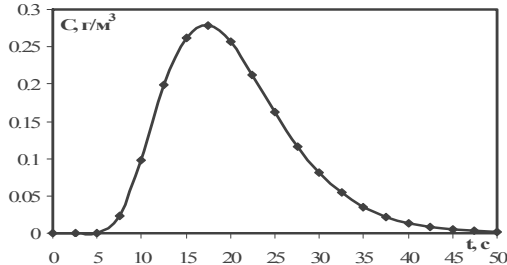


Рис. 9. График изменения концентрации аммиака в течение первых 50 с:  
*a* – точка 1; *b* – точка 2; *c* – точка 3

Fig. 9. Changes in the concentration of ammonia in the first 50 seconds:  
*a* – point 1; *b* – point 2; *c* – point 3

Анализируя данные, представленные на рис. 9, видно, что максимальное значение концентрации в точке 1 достигается в первые 6 с и по величине в 2–5 раз выше, чем в точках 2 и 3, так как эта точка наблюдения находится с наветренной стороны первого здания. Так как здания являются препятствиями при распространении химически опасного вещества, то и максимальное значение концентрации в точках 2 и 3 достигается 12 и 17 с, т. е. значительно позже, чем в точке 1. Сравнение с ПДК=20 мг/м<sup>3</sup>

doi 10.15802/stp2015/42171

(рабочая зона производственных помещений) показывает, что превышение будет более чем в 100 раз. Токсическое поражение людей, находящихся на улице, произойдет в ближайшую минуту времени после момента взрыва.

### Научная новизна и практическая значимость

Создана численная модель на основе совместного решения гидродинамической задачи и задачи массопереноса. Разработан пакет вычислительных программ, который позволяет провести достаточное количество численных экспериментов, чтобы наглядно увидеть и проанализировать структуру потока, наличие застойных зон, областей возвратного течения при различной геометрии зданий, их взаимном расположении, что оказывает влияние на распространение загрязняющего вещества в атмосфере. Полученные результаты позволяют легко проанализировать интенсивность загрязнения атмосферного воздуха в любой части расчетной области, что является важным для оценки уровня угрозы токсического поражения людей и принятия решения. А именно, за зданиями формируется область с пониженной концентрацией опасного вещества. Это обусловлено тем, что здания служат своего рода препятствиями при распространении химически опасного вещества.

### Выводы

На основе разработанной численной модели, основанной на базе метода дискретных вихрей и уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси, можно оценить уровень загрязнения атмосферного воздуха на улицах города с учетом эмиссии химически опасного вещества при известных метеорологических условий и выявить участки, где наблюдается превышение ПДК по данному загрязнителю (в данном случае по аммиаку), и участки благоприятные для населения.

Расчеты, проведенные для данного класса задач, необходимы в случае оценки экологической ситуации при авариях на дорогах города (что приводит к попаданию в атмосферу химически опасных веществ и возникновению угрозы токсического поражения людей) и разработки мероприятий по защите населения.



## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белоцерковский, С. М. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел / С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ. – Москва : Наука, 1988. – 232 с.
2. Беляев, Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.
3. Беляев, Н. Н. Моделирование локальной защиты зданий (shelter in-place) с учетом сорбции опасного вещества на поверхностях внутри помещений / Н. Н. Беляев, Н. В. Росточило, Ф. В. Недопекин // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2014. – № 4 (52). – С. 23–36.
4. Беляев, Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 127 с.
5. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
6. Пляцук, Л. Д. Оцінка впливу поля вітру та коефіцієнта турбулентності при моделюванні розповсюдження викидів в атмосфері / Л. Д. Пляцук, В. В. Бойко // Вісн. КНУ ім. М. Остроградського. – Київ, 2011. – Вип. 1, № 66. – С. 141–144.
7. Русакова, Т. И. Прогнозирование загрязнения воздушной среды от автотранспорта на улицах и в микрорайонах города / Т. И. Русакова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2013. – № 6 (48). – С. 32–44.
8. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
9. Светличная, С. Д. Оценка полученной токсодозы при распространении первичного облака токсического вещества / С. Д. Светличная // Пробл. надзвич. ситуацій. – Харків : УЦЗУ, 2011. – Вип. 13. – С. 127–132.
10. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ : Наук. думка, 1997. – 368 с.
11. Biliaiev, M. M. Expert Systems for Assessing Disaster Impact on the Environment / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov, N. V. Rostochilo // Improving Disaster Resilience and Mitigation – IT Means and Tools, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – 2014. – P. 153–165. doi: 10.1007/978-94-017-9136-6\_10.
12. Boudier, F. Risk Perception and Communication / F. Boudier // Improving Disaster Resilience and Mitigation – IT Means and Tools, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – 2014. – P. 45–62. doi: 10.1007/978-94-017-9136-6\_3.
13. Chen, Q. Protecting buildings from chemical and biological warfare agent attacks – a long journey / Q. Chen // Editorial, HVAC&R Research. – 2004. – Vol. 10. – Iss. 4. – P. 389–391. doi: 10.1080/10789669.2004.10391110.
14. Development of Building Resolving Atmospheric CFD Code Taking into Account Atmospheric Radiation in Complex Geometries / Y. Qu, M. Millez, L. Musson-Genon, B. Carissimo // Air Pollution Modeling and its Application XXI, NATO SPS Series C: Environmental Security. – 2012. – P. 75–80. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_13.
15. Kitada, T. Episodic High Surface Ozone in Central Japan in Warm Season: Relative Importance of Local Production and Long Range Transport / T. Kitada // Air Pollution Modeling and its Application, NATO SPS Series C: Environmental Security. – 2010. – P. 233–239. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_39.
16. Murakami, S. Comparison of «k-ε» model, ASM and LES with wind tunnel test for flow field around cubic model / S. Murakami, A. Mochida, H. Yoshihiko // 8th Intern. Conf. on Wind Engineering. – Western Ontario, 1991. – № 12. – P. 3.
17. Persily, A. Building Retrofits for Increased Protection Against Airborne Chemical and Biological Releases [Електронний ресурс] / A. Persily, R. Chapman, J. S. Emmerich // National Institute of Standards and Technology. Technology Administration. U.S. Department of Commerce. – 2007. – P. 1–179. – Режим доступа: <http://fire.nist.gov/bfrl-pubs/build07/PDF/b07006.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 12.03.2015.
18. Protecting Buildings Occupants and Operations from Biological and Chemical Airborne Threats [Електронний ресурс] // Committee on Protecting Occupants of DOD Buildings from Chemical and Biological Release. – 2007. – P. 3–152. – Режим доступа: [http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=11965&page=R2](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=11965&page=R2). – Загл. с экрана. – Проверено : 12.03.2015.
19. Roberto, F. Transport and Dispersion of Biological Agents/Toxins [Електронний ресурс] / F. Roberto, D. J. Rodi // SCAPA. Biosafety Working Group. – 2009. – P. 1–25. – Режим доступа: <http://orise.orau.gov/emi/scapa/files/TransportandDispersion.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 12.03.2015.
20. Sathe Yogesh, V. Air Quality Modeling in Street canyons of Kolhapur City / V. Sathe Yogesh // Universal J. of Environmental Research and Technology. – 2012. – Vol. 2. – Iss. 2. – P. 97–105.

Т. І. РУСАКОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, вул. Казакова, 18, корп. № 14, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, ел. пошта rusackovat@yandex.ru, ORCID 0000-0001-5526-3578

## ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ ПРИ АВАРІЯХ НА ДОРОГАХ МІСТА

**Мета.** В роботі розглянуто питання щодо створення математичного апарату для оцінки екологічної ситуації при аваріях на дорогах міста (вибухах). Перш за все це стосується розробки чисельної моделі для розрахунку рівня забруднення атмосферного повітря при емісії хімічно небезпечної речовини з урахуванням метеорологічних параметрів навколишнього середовища. Передбачається також виявлення ділянок, де спостерігається перевищення гранично допустимої концентрації за даним забруднювачем (у нашому випадку, – за аміаком), і ділянок, безпечних для населення. **Методика.** У роботі використано розроблену методику чисельного розрахунку концентрації забруднення повітряного середовища при викиді хімічно небезпечної речовини (аміаку), яка ґрунтується на одночасному вирішенні гідродинамічної задачі та задачі по перенесенню домішки в атмосфері. Рішення гідродинамічної задачі базується на методі дискретних вихорів із урахуванням різної геометрії будівель та їх взаємного розташування, а рішення задачі по перенесенню забруднювача – на рівнянні конвективно-дифузійного переносу домішки з використанням неявних різницевих схем. **Результати.** На основі розробленої чисельної моделі проведено ряд обчислювальних експериментів. В результаті виконаних розрахунків були отримані: вихрові структури, які формуються при обтіканні будівель; поле швидкості вітрового потоку поблизу будівель; структура ліній струму в області течії. Розраховано концентрацію хімічно небезпечної речовини (аміаку) в усій досліджуваній області; проведено порівняльний аналіз із гранично допустимою концентрацією (ГДК) за даним забруднювачем; встановлені закономірності по зміні концентрації аміаку з різних сторін будівель. **Наукова новизна.** Створена чисельна модель, яка дозволяє наочно відтворити і проаналізувати структуру потоку, наявність застійних зон, областей зворотної течії при різній геометрії будівель та їх взаємному розташуванні, що впливає на поширення забруднюючої речовини в атмосфері. **Практична значимість.** Отримані результати дозволять проводити оцінку рівня токсичного ураження людей при аваріях (вибухах) на дорогах міста з урахуванням впливу геометрії будівель на гідродинамічну структуру потоку та розсіювання забруднювача.

**Ключові слова:** хімічно небезпечна речовина; інтенсивність викиду забруднювача; концентрація забруднюючої речовини; метод дискретних вихорів; рівняння переносу домішки; чисельна модель

Т. І. RUSAKOVA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Aerohydrodynamics and Masstransfer», Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Kazakov St., 18, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 82 05, e-mail rusackovat@yandex.ru, ORCID 0000-0001-5526-3578

## EVALUATION OF ECOLOGICAL SITUATION IN CASE OF ACCIDENTS ON TOWNSHIP ROADS

**Purpose.** The paper examines the question of creation a mathematical apparatus for estimation the ecological situation in case of accidents on township roads (explosions). First of all the development of numerical model to calculate the level of air pollution in the emission of toxic chemical, taking into account meteorological parameters of the environment. Identifying areas where the maximum allowable concentration of this pollutant (in this case, ammonia) is exceeded and favorable areas for the population. **Methodology.** The developed method of numerical calculation of the air pollution concentration in case of toxic chemical (ammonia) was used, which is based on the coordinated decision of the hydrodynamic task and task of the pollutants transfer in the atmosphere. Hydrodynamic solution is based on the method of discrete vortices with the different geometry of buildings and their relative position, and solution of the task about transfer the pollutant is based on convection-diffusion equation of pollutant transfer using implicit difference schemes. **Findings.** Several computational experiments were made on the base of the developed numerical model. As a result of the calculations the vortex structures were obtained, which are

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

formed in the flow around buildings; the velocity field of the wind flow around buildings and picture of the streamlines in the flow were come out; the concentration of the toxic chemical (ammonia) in research domain was calculated; the comparative analysis with the maximum permissible concentration (MPC) for this pollutant were made; the regularities of changing the ammonia concentration from different sides of the building were determined. **Originality.** A numerical model that allows visually reconstructing and analyzing the flow pattern, the presence of dead zones, areas of reverse flow at different geometry of buildings and their relative position that influences the distribution of pollutant in the atmosphere was calculated. **Practical value.** The obtained results will allow evaluating the level toxic shock to persons in case of accidents (explosions) on township roads with taking into account the influence of the buildings geometry on the hydrodynamic flow structure and dispersion of pollution.

**Keywords:** chemically hazardous substance; emission of pollutant intensity; concentration of the pollutant; the method of discrete vortices; equation of transfer impurity; the numerical model

## REFERENCES

1. Belotserkovskiy S.M., Kotovskiy V.N., Nisht M.I. *Matematicheskoye modelirovaniye ploskoparallelnogo otrivnogo obtekaniya tel* [Mathematical modeling of plane-parallel separated flow around bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 232 p.
2. Belyayev N.N., Gunko Ye.Yu., Rostochilo N.V. *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv* [Protection of buildings against the penetration of hazardous substances]. Dnipropetrovsk, Akcent PP Publ., 2014. 136 p.
3. Belyayev N.N., Rostochilo N.V., Nedopekin F.V. Modelirovaniye lokalnoy zashchity zdaniy (shelter in-place) s uchetom sorbtzii opasnogo veshchestva na poverkhnostyakh vnutri pomeshcheniy [Modeling of the building local protection (shelter in-place) including sorbtion of hazardous contaminant on indoor surfaces]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, No. 4 (52), pp. 23-36.
4. Belyayev N.N., Berlov A.V., Mashikhina P.B. *Modelirovaniye nestatsionarnykh protsessov avariynogo zagryazneniya atmosfery* [Simulation of nonstationary processes of accidental pollution in the atmosphere]. Dnipropetrovsk, Akcent PP Publ., 2014. 127 p.
5. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushhey sredy* [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
6. Pliatsuk L.D., Boiko V.V. Otsinka vplyvu polia vitru ta koefitsiienta turbulentsnosti pry modeliuvanni rozpovsiudzhennia vykydiv v atmosferi [Impact assessment of wind field and turbulence factor at simulation of emission atmospheric propagation]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho* [Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University], 2011, no. 66, vol. 1, pp. 141-144.
7. Rusakova T.I. Prognozirovaniye zagryazneniya vozdushnoy sredy ot avtotransporta na ulitsakh i microrayonakh goroda [Prediction of air pollution from moto transport on city streets and districts]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 6 (48), pp. 32-44.
8. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
9. Svetlichnaya S.D. Otsenka poluchennoy toksodozy pri rasprostraneniі pervichnogo oblaka toksicheskogo veshchestva [Evaluation of the toxic dose during the primary cloud propagation of toxic substance]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii – Problems of Emergencies*, 2011, issue, 13, pp. 127-132.
10. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyayev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modelling of pollution in the environment]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1997. 368 p.
11. Biliaiev M. M., Rostochilo N. V., Kharytonov M.M. Expert systems for assessing disaster impact on the environment. Improving Disaster Resilience and Mitigation – IT Means and Tools, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 2014, pp. 153-165. doi: 10.1007/978-94-017-9136-6\_10.
12. Boudier F. Risk Perception and Communication. Improving Disaster Resilience and Mitigation – IT Means and Tools, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 2014. pp. 45-62. doi: 10.1007/978-94-017-9136-6\_3.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

13. Chen Q. Protecting buildings from chemical and biological warfare agent attacks– a long journey. *Editorial, HVAC&R Research*, 2004, vol. 10, issue 4, pp. 389-391. doi: 10.1080/10789669.2004.10391110.
14. Qu Y., Millez M., Musson-Genon L., Carissimo B. Development of Building Resolving Atmospheric CFD Code Taking into Account Atmospheric Radiation in Complex Geometries. *Air Pollution Modeling and its Application XXI, NATO SPS Series C: Environmental Security*, 2012, pp. 75-80. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_13.
15. Kitada T. Episodic High Surface Ozone in Central Japan in Warm Season: Relative Importance of Local Production and Long Range Transport. *Air Pollution Modeling and its Application, NATO SPS Series C: Environmental Security*, 2010, pp. 233-239. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_39.
16. Murakami S., Mochida A., Yoshihiko H. Comparison of «k-ε» model, ASM and LES with wind tunnel test for flow field around cubic model. 8th Intern. Conf. on Wind Engineering. Western Ontario, 1991, no. 12, p. 3.
17. Persily A., Chapman R., J. S. Emmerich Building Retrofits for Increased Protection against Airborne Chemical and Biological Releases. National Institute of Standards and Technology. Technology Administration. U.S. Department of Commerce, 2007, pp. 1-179. Available at: [http:// fire.nist.gov/bfrlpubs/build07/PDF/b07006.pdf](http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build07/PDF/b07006.pdf) (Accessed 12 March 2015).
18. Protecting Buildings Occupants and Operations from Biological and Chemical Airborne Threats. Committee on Protecting Occupants of DOD Buildings from Chemical and Biological Release, 2007, pp. 1-152. Available at: [http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=11965&page=R2](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=11965&page=R2) (Accessed 12 March 2015).
19. Roberto F., Rodi D.J. Transport and Dispersion of Biological Agents/Toxins. SCAPA. Biosafety Working Group, 2009, pp. 1-25. Available at: [http://orise.orau.gov/emi/scapa/files/ Transportand Dispe- rsion.pdf](http://orise.orau.gov/emi/scapa/files/TransportandDispersion.pdf) (Accessed 12 March 2015).
20. Sathe Yogesh V. Air Quality Modeling in Street canyons of Kolhapur City. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 2012, vol. 2, issue 2, pp. 97-105.

*Статья рекомендована к публикации д.физ.-мат.н., проф. О. Г. Гоманом (Украина); д.т.н., проф. Н. Н. Беляевым (Украина)*

Поступила в редколлегию 1.02.2015

Принята к печати 25.03.2015