

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 504.5:[625.7:519.86:614]

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, Т. И. РУСАКОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, ул. Казакова, 18, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, эл. почта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

### ВЫЯВЛЕНИЕ ЗОН ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ГОРОДАХ И ОЦЕНКА РИСКОВ ХРОНИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

**Цель.** Научная работа своей целью имеет создание методологии выявления зон химического загрязнения на территориях промышленных городов и учет возможности оценки рисков хронических заболеваний. **Методика.** Метод численного расчета концентрации диоксида азота в атмосферном воздухе основывается на решении трехмерных уравнений переноса примеси, которая непосредственно поступает от постоянно действующего стационарного источника (промышленного предприятия) и линейно распределенного источника (автомагистрали). Методика учитывает процесс химической трансформации примеси и фотолиза в атмосфере. Численная модель основывается на расщеплении модельных уравнений и их решении с помощью неявной разностной схемы. **Результаты.** Создано программное обеспечение, позволяющее проводить вычислительные эксперименты по расчету зон загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота с учетом взаимовлияния примеси, поступающей от различного типа источников загрязнения, с учетом метеорологических параметров. На основе полученного поля концентрации диоксида азота проведена оценка изменения риска хронической интоксикации, связанного с загрязнением атмосферного воздуха диоксидом азота на протяжении 50 лет. **Научная новизна.** Впервые установлены закономерности изменения уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота с учетом взаимовлияния выбросов промышленного предприятия и автомагистрали и их химической трансформации в атмосфере. Выполнен расчет риска хронической интоксикации и проведен анализ его изменения с учетом взаимовлияния выбросов промышленного предприятия и автомагистрали, показано, что это приводит к росту риска на 10 %. **Практическая значимость.** Разработанная математическая модель и методика численного расчета, созданное на их основе программное обеспечение позволяют оперативно получать количественные результаты, необходимые в разработке системы мониторинга техногенно нагруженных регионов города. Полученные закономерности рассеивания примеси позволяют оценить уровни загрязнения урбанизированных территорий города выбросами промышленных предприятий и автомагистралей. Учет взаимовлияния выбросов и расчет рисков интоксикации позволяет решать экологические задачи, возникающие при разработке транспортной стратегии в городах.

**Ключевые слова:** промышленное предприятие; автомагистраль; рассеивание примеси; химическое взаимодействие; риск заболевания

#### Введение

Атмосферный воздух территорий крупных городов содержит большое количество примесей антропогенного происхождения: выбросы промышленных предприятий, автотранспорта, мини-котелен, продукты сгорания топлива и сжигания отходов. Для этих примесей харак-

терно постоянное нахождение в пространстве, неоднородность и неравномерность распределения. Рост автотранспорта сохраняет лидерство в загрязнении атмосферного воздуха городов, в отличие от выбросов стационарных источников, которые имеют тенденцию к стабильному сокращению.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Для передвижных источников загрязнения (автомобилей) характерны: высокие темпы роста численности по сравнению с ростом количества стационарных источников; пространственная рассредоточенность; непосредственная близость к жилым районам; более высокая токсичность выбросов по сравнению с выбросами стационарных источников; низкое расположение источника загрязнения от земной поверхности, в результате чего отработавшие газы скапливаются в зоне дыхания людей и медленнее рассеиваются ветром по сравнению с промышленными выбросами. Данные особенности приводят к тому, что автотранспорт создаёт в городах обширные зоны с устойчивым превышением норм загрязнения воздуха.

Постоянное увеличение выбросов оксидов

азота в атмосферный воздух также связано: с развитием автотранспорта; с тенденцией более полного использования топлива, что приводит к увеличению выбросов NOx с ростом температуры при более эффективной работе двигателя; с увеличением скорости движения автотранспорта, в результате чего NOx растет нелинейно. В связи с этим антропогенное загрязнение атмосферного воздуха оксидами азота принимает критический характер в промышленных густонаселенных городах с большой сетью автомобильных дорог.

Согласно данным экологического паспорта г. Днипро, к основным стационарным промышленным источникам загрязнения атмосферного воздуха выбросами NOx относятся несколько предприятий города (табл. 1).

Таблица 1

Основные предприятия города по выбросам NOx

Название объекта	Всего выбросов NOx, т/год	К общему объёму выбросов объекта, %	К общему объёму выбросов (населенного пункта) объекта, %
Приднепровская ТЭС	15 399,971	18,7	84,3
ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат»	4 003,362	3,7	62,2
ЧАО «Днепропетровский металлургический завод»	1 066,608	11,9	5,8
ПАО «Интерпайп Нижнеднепровский трубопрокатный завод»	437, 807	28,6	2,4
ЧАО «Днепропетровский коксохимический завод»	413,750	32,7	4,1

Анализ данных Главного управления статистики в Днепропетровской области показал, что общий объем выбросов NOx от всех стационарных источников загрязнения города Днипро составил около 50 000 т, а от всех видов автотранспорта – около 20 000 т в 2017 году.

Особенностью загрязнения атмосферного воздуха в промышленных городах является то, что происходит взаимовлияние выбросов от различного типа источников. Наиболее типична ситуация – это взаимодействие выбросов промышленных предприятий с выбросами от автомагистралей (рис. 1). Оценка уровня загрязнения с учетом взаимодействия выбросов является достаточно сложной задачей как с математи-

ческой точки зрения, так и в численной реализации. Сложность обусловлена необходимостью решения трехмерных уравнений массопереноса примесей, которые поступают в атмосферу от различного типа источников загрязнения, а также необходимостью учета процессов химической трансформации примеси в атмосфере.

При решении данного класса задач выполняют исследования по изучению изменения концентрации в атмосферном воздухе примесей, поступивших либо от стационарных, либо от передвижных источников с учетом или без учета процесса их химической трансформации в атмосфере [2].

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

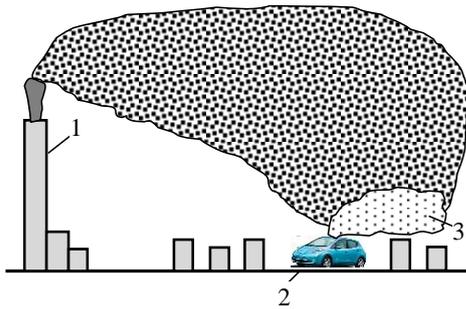


Рис. 1. Схема влияния выбросов:  
1 – промышленный объект; 2 – автомагистраль;  
3 – зона взаимодействия выбросов от 1 и 2

Как за рубежом, так и в Украине расчеты проводят на основе эмпирических или аналитических моделей или на основе численных моделей программных пакетов [10–15]. В данных работах рассмотрен ряд факторов, влияющих на состояние атмосферного воздуха города, предложены эффективные методы по уменьшению техногенной нагрузки. В работе [11] изучено математическое моделирование пространственно-временного распределения загрязняющих веществ от электростанции, которое выполнено в программном комплексе FlexPDE. Оценена эффективность системы моделирования загрязнения воздуха и воздействия на человека на основе географической информационной системы AirGIS [7]. Рассмотрено влияние источников выброса на загрязнение окружающей среды  $PM_{2.5}$  [8, 14]. Фоновое загрязнение представляет собой самые низкие уровни загрязнения атмосферного воздуха, которым постоянно подвергается население, но лишь немногие исследования были сосредоточены на моделировании этого вида загрязнения [9].

Однако остается актуальным вопрос о взаимовлиянии примесей, поступивших от выбросов промышленных предприятий и автомагистралей, с одновременным учетом их химической трансформации в атмосфере.

В промышленных городах большое значение имеет прогноз рисков для населения. Оценке рисков при авариях техногенного характера посвящена работа В. И. Голинько, Л. В. Дранникова, В. Ф. Стоецкого [3], анализ рисков при систематическом загрязнении атмосферного воздуха опасными химическими веществами выполнен в работе В. В. Меньшикова, А. А. Швыряева, Т. В. Захаровой [5], процессы химической трансформации изложены в работе

Н. Т. Overmana [13]. Очевидно, где имеет место взаимодействие примесей различного типа источников (рис. 1, зона 3). Риск заболевания еще больше возрастает, так как жители этого региона могут не подозревать, что находятся в зоне влияния нескольких источников загрязнения атмосферного воздуха. Выявить зоны на карте города и оценить возможные риски можно с помощью методов математического моделирования. Данный вопрос также важен с точки зрения системы мониторинга техногенно нагруженных регионов.

Металлургия является одной из важнейших отраслей экономики, так как благодаря ей могут развиваться другие отрасли. «Интерпайп Нижнеднепровский трубопрокатный завод» – крупнейший производитель и поставщик стальных труб различного назначения. Продукция этого завода, поставляемая в 50 стран мира, отличается высокой надежностью и долговечностью. Однако это предприятие оказывает техногенное воздействие на атмосферный воздух, оно относится к числу экологически небезопасных объектов, находящихся на территории города.

В работе рассмотрены выбросы оксидов азота «Интерпайп Нижнеднепровского трубопрокатного завода», которые, согласно известным статистическим данным, составляют 437,807 т/год (табл. 1). Это промышленное предприятие занимает промежуточную позицию среди других предприятий города по количеству выбросов  $NO_x$ , что позволяет оценить взаимовлияние его выбросов и близлежащей автомагистрали с определенной интенсивностью движения.

### Цель

Основной целью данного исследования является разработка математического метода численного расчета для оценки концентрации оксидов азота в атмосферном воздухе города при взаимовлиянии выбросов промышленного предприятия и автотранспорта, с учетом их химических превращений в атмосфере и метеорологических параметров, на базе трёхмерных уравнений переноса. На основе полученного поля концентраций  $NO_x$  следует выполнить оценку рисков хронической интоксикации населения, проживающего в районе влияния выделенных источников загрязнения.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

## Методика

При движении автотранспорта и при его работе на холостом ходу в атмосферный воздух поступают различного рода загрязняющие вещества, которые под действием солнечного света подвергаются трансформации. Рассмотрим основные химические реакции, происходящие в атмосферном воздухе между оксидом азота  $NO$ , диоксидом азота  $NO_2$  и озоном  $O_3$ :



Учитываем только основные три реакции (1) – (3), так как для расчета химической трансформации выбросов в атмосфере необходимо знать скорости их химических реакций, которые определяют экспериментальным путем. Они были изучены в работах [12, 13].

Чтобы выполнить расчет уровня загрязнения воздушной среды этими загрязнителями, нужно на первом этапе решить уравнения переноса для каждой примеси в атмосфере:

$$\begin{aligned} \frac{\partial[NO]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO]}{\partial y} + \frac{\partial w[NO]}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[NO]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[NO]}{\partial y}) + \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial[NO]}{\partial z}) + \\ + Q_{NO} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \delta(z-z_0); \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[NO_2]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO_2]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO_2]}{\partial y} + \frac{\partial w[NO_2]}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[NO_2]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[NO_2]}{\partial y}) + \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial[NO_2]}{\partial z}) + \\ + Q_{NO_2} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \delta(z-z_0); \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[O_3]}{\partial t} + \frac{\partial u[O_3]}{\partial x} + \frac{\partial v[O_3]}{\partial y} + \frac{\partial w[O_3]}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[O_3]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[O_3]}{\partial y}) + \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial[O_3]}{\partial z}), \quad (6) \end{aligned}$$

где  $Q_{NO}$  – интенсивность выброса  $NO$  от промышленного предприятия или автотранспорта,  $Q_{NO_2}$  – интенсивность выброса  $NO_2$  от промышленного предприятия или от автотранспорта;  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости ветра;  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коэффициенты турбулентной диффузии;  $x_0, y_0, z_0$  – координаты источника выброса загрязняющего вещества (промышленного предприятия или автомагистрали);  $\delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \delta(z-z_0)$  – дельта-функция Дирака, с помощью которой моделируют выброс загрязнителя. Значения коэффициентов диффузии рассчитываем по формулам:  $\mu_x = (0,1 \div 1) \cdot U$ ,  $\mu_y = (0,1 \div 1) \cdot U$ , где  $U$  – скорость ветра;  $\mu_z = k \left( \frac{z}{z_1} \right)^m$ , где  $z$  – высота над уровнем Земли,  $z_1$  – высота, где задана скорость ветра  $U$ ,  $m \approx 1$ ,  $k = 0,2$  [4, 6].

На втором этапе необходимо рассчитать химическую трансформацию примесей. Процесс химической трансформации рассчитываем на основе зависимостей:

$$\frac{d[NO]}{dt} = -k_1 [NO] [O_3] + J_{NO_2} [NO_2]; \quad (7)$$

$$\frac{d[NO_2]}{dt} = -k_1 [NO] [O_3] - J_{NO_2} [NO_2]; \quad (8)$$

$$\frac{d[O_3]}{dt} = -k_1 [NO] [O_3] + J_{NO_2} [NO_2]. \quad (9)$$

Химические реакции и реакция фотолиза взаимосвязаны в атмосфере. Скорость фотолиза  $J_{NO_2}$ ,  $[s^{-1}]$  и константу скорости реакции  $k_1$ ,  $[ppb^{-1} \cdot s^{-1}]$ , зависящие от температуры, определяем выражениями:

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$J_{NO_2} = 8,14 \cdot 10^{-3} (0,97674 + 8,37 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273,15) + 4,5173 \cdot 10^6 \cdot (T - 273,15)^2); \quad (10)$$

$$k_1 = 44,05 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{1370}{T}\right). \quad (11)$$

Диоксид азота разлагается с выделением оксида азота, а последний окисляется озоном. В результате ряда последовательных реакций одна молекула оксида азота способствует уничтожению в среднем 10 молекул озона. Более токсичен  $NO_2$ , чем  $NO$ . Масштабы трансформации  $NO$  составляют 10 км в течение 1 ч, а  $NO_2$  – 100–200 км в течение 2 суток. Для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота, с учетом взаимовлияния выбросов промышленных предприятий и автомагистрали, необходимо решить совместно уравнения (7) – (9). Постановка краевых условий для решения уравнений переноса рассмотрена в работах Марчука Г. И., Самарского А. А.

Как известно, риск – категория рыночной экономики, которая является понятием многоплановым. Классификацию рисков проводят в зависимости от основной причины их возникновения: природные, техногенные, экологические, коммерческие. С точки зрения применения понятия риска при его анализе и управлении техногенной безопасностью, важными категориями являются индивидуальный, потенциальный территориальный, социальный, коллективный риски.

Для описания риска хронической интоксикации (в том числе канцерогенного риска), связанного с загрязнением атмосферного воздуха, часто используют линейно-экспоненциальную модель [1]:

$$R_3 = 1 - \exp\left[-0,174 \cdot \left(\frac{C}{ПДК_{cc} \cdot K_3}\right)^\beta \cdot t\right], \quad (12)$$

где  $R_3$  – риск,  $C$  – концентрация вещества, оказывающая воздействие в течение времени  $t$ ;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий особенности токсических свойств веществ;  $ПДК_{cc}$  – предельно допустимая среднесуточная концентрация химического вещества в воздухе населенных мест,  $мг/м^3$ . Эта концентрация не должна

оказывать на человека прямого или косвенного вредного воздействия при неопределенно долгом (годы) вдыхании. Оксиды азота относятся к умеренно опасным веществам, они имеют 3-ий класс опасности. Рекомендованные Алымовым В. Т., Тарасовой Н. П. для расчета риска значения параметров:  $\beta = 1$ ,  $K_3 = 4,5$ .

Для численного решения уравнения переноса примеси (4) – (6) относительно автомагистрали и промышленного объекта используем неявную разностную схему. Суть данной схемы заключается в том, что проводят расщепление модельных уравнений на уравнения более простого вида. На каждом шаге расщепления неизвестные значения концентраций оксида азота  $NO$ , диоксида азота  $NO_2$  и озона  $O_3$  рассчитывают по методу бегущего счета [2, 4, 6]. В каждой разностной ячейке для расчета процесса химической трансформации, т. е. для решения уравнений (7) – (9), используем метод Эйлера. Процесс моделирования загрязнения атмосферного воздуха  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$  сводится к последовательному решению на каждом временном шаге уравнений (4) – (6) и (7) – (9).

В результате математического и численного моделирования была разработана компьютерная программа «Transformation» для проведения вычислительных экспериментов. Выполнение расчетов с помощью данной программы основывается на следующей информации: скорости и направлении ветра; состоянии атмосферы; координатах источников загрязнения (промышленного объекта и автомагистрали); интенсивности эмиссии загрязняющего вещества; коэффициентах химической трансформации; коэффициентах, входящих в модель, по оценке риска.

Согласно архиву погоды Днепропетровской области, по усредненной повторяемости направлений ветра за год преобладающим является восточное направление и составляет 15 %.

## Результаты

Рассматриваем промышленный объект «Интерпайп Нижнеднепровский трубопрокатный завод», интенсивность выбросов которого по  $NO_x$  составляет  $Q = 14,076$  г/с, и автомагистраль Слобожанский проспект, которая нахо-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

диться на відстані 710 м від джерел викиду (труб) підприємства. Інтенсивність руху автотранспорту на розглянутому ділянці дороги становить 300 авт./хв з урахуванням восьмирядного руху, відносне число автомобілів на 1 м автомагістралі – 0,45 авт./м, з інтенсивністю викидів  $NO_x$  на 1 м  $Q_{авт} = 0,012$  г/с.

Величини розрахункової області 3,5х1,2 км, швидкість вітру з сходу становила  $U = 7$  м/с. Ізолінії концентрації  $NO_2$  показані на рівні  $z = 12$  м.

Були виконані розрахунки по оцінці рівня концентрації  $NO_2$  в атмосферному повітрі, з урахуванням надходження приміс тільки від промислового підприємства (рис. 2). В зону забруднення потрапляють: територія заводу – 90 %, ул. Столетова – 80 %, ул. Бажова і Воєнна – 70 %, ул. Ізмуродна і Саперна – 60 %, ул. Каразина і Луговська – 50 %, ул. Ростовська і Трамвайна – 40 %, ул. Проскурівська і Леси Українки – 30 %, ул. Світла і Радистів – 20 %, ул. Ясельна і Мануйлівський просп. – 10 %, ул. Каруни – 5 %.

На рис. 3 показано зону забруднення, яка формується під впливом автомагістралі. В зону забруднення потрапляють: ул. Бажова і Воєнна – 80 %, ул. Ізмуродна і Саперна – 70 %, ул. Каразина і Луговська – 60 %, ул. Ростовська і Трамвайна – 40 %, ул. Проскурівська і Леси Українки – 30 %, ул. Світла і Радистів – 10–20 %, ул. Ясельна – 5 %.

На рис. 4 представлено зону забруднення з урахуванням взаємодії викидів промислового підприємства і автомагістралі. Починаючи від першого джерела (завода), шлейф забруднення витягується вздовж напрямку руху повітряних мас, відсотковий вміст приміс поступово зменшується. Дійшовши до автомагістралі, концентрація  $NO_2$  знову починає зростати, так як шлейф забруднення від другого джерела з урахуванням принципу суперпозиції накладається на той, який уже присутній в атмосферному повітрі, концентрація приміс і зона забруднення збільшуються. Концентрація діоксида азоту змінюється за такою залежністю: територія заводу – 90 %, ул. Столетова – 80 %, ул. Бажова і Воєнна – 80–90 %, ул. Ізмуродна і Саперна –

70 %, ул. Каразина і Луговська – 60 %, ул. Ростовська і Трамвайна – 50 %, ул. Проскурівська і Леси Українки – 40 %, ул. Світла і Радистів – 30 %, ул. Ясельна і Мануйлівський просп. – 20 %, ул. Каруни – 10 %, ул. Амур-Гаванська – 5 %.

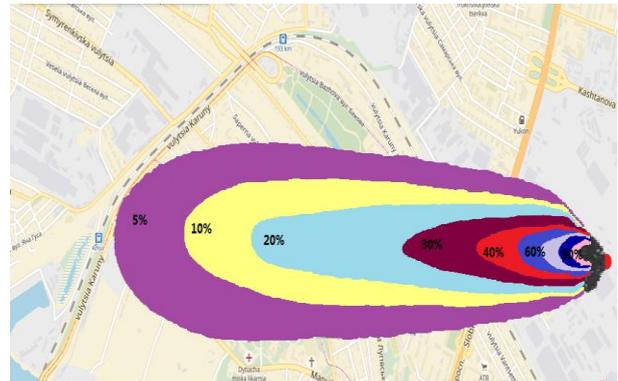


Рис. 2. Зона забруднення діоксидом азоту, один джерело забруднення – промислове підприємство

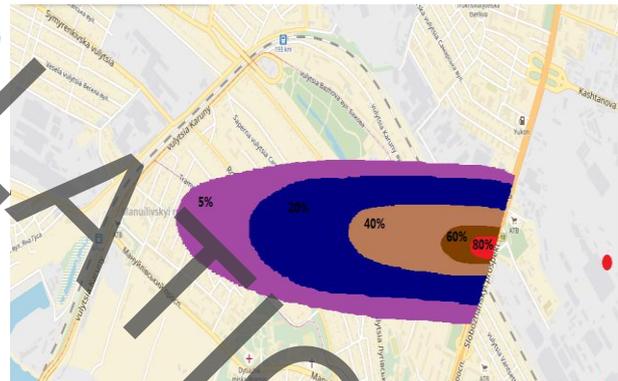


Рис. 3. Зона забруднення діоксидом азоту, один джерело забруднення – автомагістраль

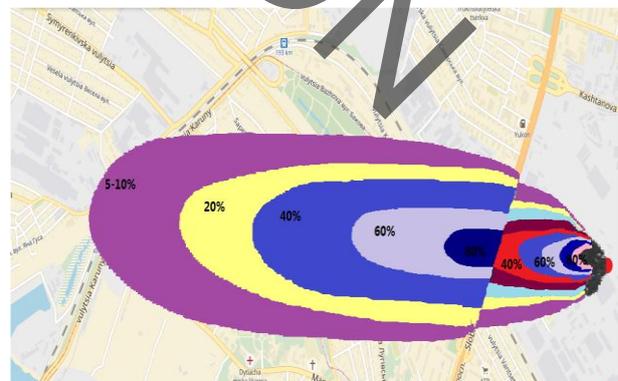


Рис. 4. Зона забруднення діоксидом азоту, два джерела забруднення – промислове підприємство і автомагістраль

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

На рис. 2–4 показаны значения концентрации, которые представлены в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени  $t = 52,5$  мин:  $C_{\max} = 0,0928$  мг/м<sup>3</sup> (рис. 2) – учтены выбросы  $NO_x$  только от промышленного предприятия,  $C_{\max} = 0,0359$  мг/м<sup>3</sup> (рис. 3) – учтены выбросы  $NO_x$  только от автомагистрали,  $C_{\max} = 0,1279$  мг/м<sup>3</sup> (рис. 4) – учтены выбросы от двух источников загрязнения.

Найденное поле концентрации примеси позволило оценить изменение риска хронической интоксикации, связанного с загрязнением атмосферного воздуха диоксидом азота на протяжении 50 лет (рис. 5). Расчет риска возникновения хронических заболеваний выполнен по модели (12), при расчете рассмотрена концентрация диоксида азота. Расчет риска выполнен для точек, расположенных на расстоянии порядка 30 м от автомагистрали.

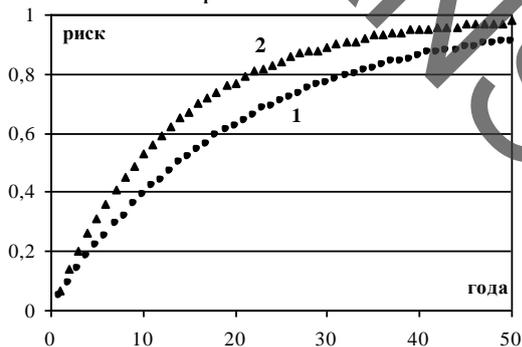


Рис. 5. Изменение риска хронической интоксикации диоксидом азота:

- 1 – без учета выбросов автомагистрали;  
2 – с учетом выбросов автомагистрали

Как видно из рис. 5, взаимовлияние выбросов  $NO_2$  от автомагистрали и от завода приводит к росту риска возникновения хронических заболеваний у населения на 10 %. Таким образом, необходима разработка мероприятий по снижению уровня риска заболевания населения в данном районе.

### Научная новизна и практическая значимость

В работе впервые:

1. Установлены закономерности изменения уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота с учетом одного точечного источника загрязнения – промышленного пред-

приятия и одного линейного источника загрязнения – автомагистрали. Получена качественная картина поля концентрации диоксида азота с учетом взаимовлияния выбросов промышленного предприятия, автомагистрали и их химической трансформации в атмосфере.

2. Выполнен расчет риска хронической интоксикации и проведен анализ его изменения с учетом взаимовлияния выбросов промышленного предприятия и автомагистрали, показано, что это приводит к росту риска на 10 %.

3. Разработан математический метод численного расчета поля концентрации загрязнителя с учетом взаимовлияния выбросов источников загрязнения различного типа. На его основе создано программное обеспечение, позволяющее оперативно получать количественные результаты, необходимые в разработке системы мониторинга техногенно нагруженных регионов города.

Полученные закономерности рассеивания примеси позволяют оценить уровни загрязнения территорий города выбросами промышленных предприятий и автомагистралей. Учет взаимовлияния выбросов и расчет рисков интоксикации позволяет решать экологические задачи, возникающие при разработке транспортной стратегии в городах и оценки уровня интоксикации работников выносной торговли, рабочие зоны которых размещаются в зоне влияния нескольких источников загрязнения.

### Выводы

В результате выполнения исследований получены следующие результаты:

- разработан математический метод численного расчета концентрации примеси в атмосфере на основе трехмерных уравнений массопереноса;
- метод позволяет проводить расчет уровня концентрации как отдельно для постоянно действующего точечного источника загрязнения или для линейно распределенного, так и с учетом их взаимного влияния;
- разработано программное обеспечение для проведения вычислительных экспериментов по расчету зон загрязнения диоксидом азота для одного источника загрязнения – промышленного предприятия или автомагистрали, с учетом двух источников поступления примеси;
- разработанный метод позволяет выполнять оценку риска хронической интоксикации,

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

связанного с загрязнением атмосферного воздуха диоксидом азота на протяжении 50 лет на основе рассчитанного поля концентрации.

Перспективой развития данного направления является создание модели, учитывающей затекание примеси в здания.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алымов, В. Т. Техногенный риск. Анализ и оценка : учеб. пособие для вузов / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасова. – Москва : Академкнига, 2004. – 118 с.
2. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
3. Меньшиков, В. В. Анализ риска при систематическом загрязнении атмосферного воздуха опасными химическими веществами : учеб. пособие / В. В. Меньшиков, А. А. Швыряев, Т. В. Захарова. – Москва : Изд-во МГУ, 2003. – 245 с.
4. Прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния городских автомагистралей / Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова, В. Е. Колесник, А. В. Павличенко // *Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту.* – 2016. – № 1. – С. 90–98.
5. Стоецкий, В. Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера / В. Ф. Стоецкий, В. И. Голинько, Л. В. Дранишников // *Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту.* – 2014. – № 3. – С. 117–124.
6. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
7. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // *Наука та прогрес транспорту.* – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953
8. Evaluation of the Danish AirGIS air pollution modeling system against measured concentrations of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, and black carbon / U. A. Hydtfeldt, M. Ketzel, M. Sørensen, O. Hertel, J. Khan, J. Brandt, O. Raaschou-Nielsen // *Environmental Epidemiology.* – 2018. – Vol. 2. – Iss. 2. doi: 10.1097/EE9.0000000000000014
9. Gómez-Losada, Á. Modelling background air pollution exposure in urban environments: Implications for epidemiological research / Álvaro Gómez-Losada, José Carlos M. Pires, Rafael Pino-Mejías // *Environmental Modelling & Software.* – 2018. – Vol. 106. – P. 13–21. doi: 10.1016/j.envsoft.2018.02.011
10. Liu, C.-H. Numerical study on the ozone formation inside street canyons using a chemistry box model / Chun-Ho Liu, Dennis Y. C. Leung // *Journal of Environmental Sciences.* – 2008. – Vol. 20. – Iss. 7. – P. 832–837. doi: 10.1016/s1001-0742(08)62134-8
11. Mărunțălu, O. Mathematical model for air pollutants dispersion emitted by fuel combustion / Oliver Mărunțălu, Gheorghe Lăzăroiu, Dana Andreea Bondrea // *U.P.B. Sci. Bull., Series D.* – 2015. – Vol. 77. – Iss. 4. – P. 229–236.
12. Merah, A. Modeling and Analysis of NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> in a Street Canyon / A. Merah, A. Noureddine // *Der Pharma Chemica.* – 2017. – Vol. 9. – Iss. 19. – P. 66–72.
13. Overman, H. T. Simulation model for NO<sub>x</sub> distribution in a street canyon with air purifying pavement : Master thesis / H. T. Overman ; University Twente. – Enschede, Netherlands, 2009. – 107 p.
14. Source influence on emission pathways and ambient PM<sub>2.5</sub> pollution over India (2015–2050) / C. Venkataraman, M. Brauer, K. Tibrewal [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics.* – 2018. – Vol. 18. – Iss. 11. – P. 8017–8039. doi: 10.5194/acp-18-8017-2018
15. Zhong, J. Modelling the dispersion and transport of reactive pollutants in a deep urban street canyon: Using large-eddy simulation / J. Zhong, X.-M. Cai, W. J. Bloss // *Environmental Pollution.* – 2015. – Vol. 200. – P. 42–52. doi: 10.1016/j.envpol.2015.02.009

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, Т. І. РУСАКОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені О. Гончара, вул. Козакова, 18, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, ел. пошта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

## ВИЯВЛЕННЯ ЗОН ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В МІСТАХ Й ОЦІНКА РИЗИКІВ ХРОНІЧНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

**Мета.** Наукова робота має за мету створення методології виявлення зон хімічного забруднення на територіях промислових міст і врахування можливості оцінки ризиків хронічних захворювань. **Методика.** Метод чисельного розрахунку концентрації діоксиду азоту в атмосферному повітрі базується на вирішенні тривимірних рівнянь переносу домішки, яка безпосередньо надходить від постійно діючого стаціонарного джерела (промислового підприємства) і лінійно розподіленого джерела (автомагістралі). Методика враховує процес хімічного перетворення домішки і фотолізу в атмосфері. Чисельна модель ґрунтується на розщепленні модельних рівнянь і їх розв'язанні за допомогою неявної різницевої схеми. **Результати.** Створено програмне забезпечення, що дозволяє проводити обчислювальні експерименти з розрахунку зон забруднення атмосферного повітря діоксидом азоту з урахуванням взаємовпливу домішки, що надходить від різних типів джерел забруднення, з урахуванням метеорологічних параметрів. На основі отриманого поля концентрації діоксиду азоту проведена оцінка зміни ризику хронічної інтоксикації, пов'язаного із забрудненням атмосферного повітря діоксидом азоту протягом 50 років. **Наукова новизна.** Уперше встановлено закономірності зміни рівня забруднення атмосферного повітря діоксидом азоту з урахуванням взаємовпливу викидів промислового підприємства й автомагістралі і їх хімічного перетворення в атмосфері. Виконано розрахунок ризику хронічної інтоксикації й проведено аналіз його зміни з урахуванням взаємовпливу викидів промислового підприємства й автомагістралі, показано, що це призводить до зростання ризику на 10 %. **Практична значимість.** Розроблена математична модель і методика чисельного розрахунку, створене на їх основі програмне забезпечення дозволяють оперативну отримувати кількісні результати, необхідні під час розробки системи моніторингу техногенно навантажених регіонів міста. Отримані закономірності розсіювання домішки дозволяють оцінити рівні забруднення урбанізованих територій міста викидами промислових підприємств й автомагістралей. Облік взаємовпливу викидів і розрахунок ризиків інтоксикації дозволяє вирішувати екологічні задачі, що виникають під час розробки транспортної стратегії в містах.

**Ключові слова:** промислове підприємство; автомагістраль; розсіювання домішки; хімічна взаємодія; ризик захворювання

М. М. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, Т. І. RUSAKOVA<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 45 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Dep. «Aerohydrodynamics and Masstransfer», Oles Honchar Dnipro National University, Kazakov St., 18, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 82 05, e-mail rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

## DETERMINING ZONES OF CHEMICAL POLLUTION IN THE CITIES AND ASSESMENT OF CHRONIC DISEASES RISKS

**Purpose.** The scientific paper is aimed at creating a methodology of chemical pollution zones in the territories of industrial cities and accounting the possibility of assessing the risks of chronic diseases. **Methodology.** The method of numerical calculation of nitrogen dioxide concentration in atmospheric air is based on the solution of three-dimensional impurity transfer equations, which directly comes from a permanently stationary source (industrial enterprise) and a linearly distributed source (highway). The method takes into account the process of chemical transformation of impurities and photolysis in the atmosphere. The numerical model is based on the splitting of model equations and their solution using an implicit difference scheme. **Findings.** The created software allows conducting computational experiments to calculate the areas of atmospheric air pollution with nitrogen dioxide, taking into account the interaction of impurities coming from various types of pollution sources and meteorological parameters. On the basis of the obtained field of nitrogen dioxide concentration, an assessment of the change in the risk of chronic intoxication associated with atmospheric air pollution with nitrogen dioxide over 50 years was carried out. **Originality.** For the first time the regularities of changes in the level of atmospheric air pollution with nitrogen dioxide have been established with due regard to the mutual influence of emissions from the industrial enterprise and highway and their chemical transformation in the atmosphere. The risk of chronic intoxication has been calculated and its changes have been analyzed with due regard to the interaction of emissions from the industrial enter-

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2019/159508

© Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова, 2019

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

prise and highway, it leads up to 10% of risk increasing. **Practical value.** Authors developed a mathematical model and method of numerical calculation. Software created on their base allows obtaining quickly quantitative results necessary in developing the system for monitoring the man-made loaded regions of the city. The obtained patterns of impurities dispersion allow us to estimate the levels of pollution in urban areas of the city by emissions from industrial enterprises and highways. Accounting of the mutual impact of emissions and the calculation of risks of intoxication allows solving environmental problems arising in the development of transport strategy in cities.

*Keywords:* industrial enterprise, highway, dispersion of impurities, chemical interaction, risk of disease

## REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: uchebnoye posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
3. Menshikov, V. V., Shvyryayev, A. A., & Zakharova, T. V. (2003). *Analiz riska pri sistematicheskoy zagryaznenii atmosferynoy vozdukh opasnyimi khimicheskimi veshchestvami: uchebnoye posobie*. Moscow: Izdatelstvo MGU. (in Russian)
4. Biliaev, N. N., Rusakova, T. I., Kolesnik, V. Ye., & Pavlichenko, A. V. (2016). The predicted level of atmospheric air pollution in the city area affected by highway. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 90-98. (in Russian)
5. Stoetsky, V. F., Golinko, V. I., & Dranishnikov, L. V. (2014). Risk assessment in man-caused accidents. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 117-124. (in Russian)
6. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova Dumka. (in Russian)
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. doi: 10.15802/stp2016/60953 (in English)
8. Hvidtfeldt, U. A., Ketzler, M., Sørensen, M., Hertel, O., Khan, J., Brandt, J., & Raaschou-Nielsen, O. (2018). Evaluation of the Danish AirGIS air pollution modeling system against measured concentrations of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, and black carbon. *Environmental Epidemiology*, 2(2). doi: 10.1097/ee9.000000000000014 (in English)
9. Gómez-Losada, Á., Pires, J. C. M., & Pino-Mejías, R. (2018). Modelling background air pollution exposure in urban environments: Implications for epidemiological research. *Environmental Modelling & Software*, 106, 13-21. doi: 10.1016/j.envsoft.2018.02.011 (in English)
10. Liu, C.-H., & Leung, D. Y. C. (2008). Numerical study on the ozone formation inside street canyons using a chemistry box model. *Journal of Environmental Sciences*, 20(7), 832-837. doi: 10.1016/s1001-0742(08)62134-8 (in English)
11. Mărunțălu, O., Lăzăroiu, G., & Bondrea, D. A. (2015). Mathematical model for air pollutants dispersion emitted by fuel combustion. *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, 77(4), 229-236. (in English)
12. Merah, A., & Nouredine, A. (2017). Modeling and Analysis of NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> in a Street Canyon. *Der Pharma Chemica*, 9(19), 66-72. (in English)
13. Overman, H. T. (2009). *Simulation model for NO<sub>x</sub> distribution in a street canyon with air purifying pavement*. (Master thesis). University Twente, Enschede, Netherlands. (in English)
14. Venkataraman, C., Brauer, M., Tibrewal, K., Sadavarte, P., Ma, Q., Cohen, A., ... Wang, S. (2018). Source influence on emission pathways and ambient PM<sub>2.5</sub> pollution over India (2015–2050). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(11), 8017-8039. doi: 10.5194/acp-18-8017-2018 (in English)
15. Zhong, J., Cai, X.-M., & Bloss, W. J. (2015). Modelling the dispersion and transport of reactive pollutants in a deep urban street canyon: Using large-eddy simulation. *Environmental Pollution*, 200, 42-52. doi: 10.1016/j.envpol.2015.02.009 (in English)

Поступила в редколлегию: 21.09.2018

Принята к печати: 15.01.2019