

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

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

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

УДК 622.457:519.6

© Н.Н. Беляев, Т.И. Русакова

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ГОРОДА ОТ ДЕЙСТВУЮЩИХ ТЕХНОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

© М. Biliaiev, Т. Rusakova

### **PREDICTION THE LEVEL OF AIR POLLUTION OF THE CITY FROM ACTIVE TECHNOGENIC SOURCES**

Создание методики базируется на совместном решении уравнений конвективно-диффузионного переноса примеси для каждого загрязнителя, который непосредственно поступает от предприятия и образуется дополнительно за счет химических реакций в атмосфере. Разработанное программное обеспечение позволяет проводить ряд численных экспериментов и получать зоны загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота. , определять районы, которые наиболее подвержены загрязнению с учетом влияния метеорологических параметров.

Створення методики методика базується на спільному розв'язанні рівнянь конвективно-дифузійного переносу домішки для кожного забруднювача, який безпосередньо надходить від підприємства і утворюється додатково за рахунок хімічних реакцій в атмосфері. Розроблене програмне забезпечення дозволяє проводити ряд чисельних експериментів і отримувати зони забруднення атмосферного повітря діоксидом азоту, визначати райони, які найбільш схильні до забруднення з урахуванням впливу метеорологічних параметрів.

**Вступление.** Как известно, для развития экономики страны ее отрасли должны быть конкурентоспособны за рубежом, уметь предложить что-то внешнему рынку. Металлургия – одна из индустрий, которая позволяет конкурировать на международном рынке. Украина находится в десятке мировых лидеров по производству стали, в 2016 году было произведено 24,2 млн. тонн стали. В последние годы страна немного уступила позиции конкурентам, с 8-го места в мире (2010 г – 33 млн. тонн, 2011 г – 36 млн. тонн) Украина опустилась на 10-е место в 2012 г – 34 млн. тонн, на котором уверенно держится уже несколько лет.

Металлургия производит четвертую часть экспортируемой Украиной продукции. Metallургический экспорт в 2016 году принес Украине 8,3 млрд. долларов. Экспорт черных металлов обогнал экспорт в сферах зерновых и IT-услугах. Доходы от экспорта в 2016 году составили: черные металлы – 7,9 млрд. долларов, зерновые – 6,1 млрд. долларов, трубопровод – 2,6 млрд. долларов, IT услуги – 1,6 млрд. долларов.

В самой Украине внутреннее потребление стали падает. Metallургия – одна из важнейших отраслей экономики, потому что благодаря ей могут развиваться другие отрасли. Потребление металла – важный индикатор развития экономики. Если в 1989 году страна потребляла 74 млн. тонн стали, то в 2016 – только 4 млн. тонн, что соответствует падению экономики.

Metallургические области Украины – Запорожская, Днепропетровская и Донецкая. «Интерпайп Нижнеднепровский трубопрокатный завод» – крупнейший производитель и поставщик стальных труб различного назначения, железнодорожных колес, бандажей, крупногабаритных кольцевых изделий, фланцев. Продукция с торговой маркой завода поставляется в более, чем 50 стран мира, отличается высокой надежностью и долговечностью. Однако это предприятие относится к числу экологически-небезопасных объектов на территории г. Днепра.

Распределение основных годовых выбросов «Интерпайп Нижнеднепровского трубопрокатного завода» по данным экологического паспорта города представлено в таблице 1.

Таблица 1

Годовые выбросы «Интерпайп Нижнеднепровского трубопрокатного завода»

Загрязняющие вещества	Всего выбросов, т/год	К общему количеству выбросов объекта, %	К общему количеству выбросов (населенного пункта), %
$SO_2$	9,279	0,6	0,02
$NO_x$	437,807	28,6	2,4
$CO$	861,972	56,2	13,3
Твердые вещества	98,751	6,4	0,6

Анализ публикаций показывает, что расчеты по исследованию распространения выбросов от крупных промышленных предприятий в атмосферном воздухе выполняются на основе модифицированных моделей Гаусса, Лагранжевых моделей, которые позволяют рассчитывать уровень концентрации загрязняющих веществ при стационарных точечных источниках загрязнения без больших затрат компьютерного времени [4]. Большое количество прогнозных моделей

основывается на статистических оценках метеорологических параметров конкретных территорий [5], что является большим недостатком этих моделей, так как они не учитывают изменяющиеся во времени метеорологические данные. Моделирование нерегулярных «импульсных» источников загрязнения проводится с использованием метода Монте-Карло для получения реалистических годовых максимумов концентрации и оценки рисков для здоровья с учетом наихудших метеорологических условий [6]. Как за рубежом, так и в Украине численные модели лежат в основе готовых очень дорогостоящих программных пакетов. В связи с этим остается актуальной задача создания пакета программ для проведения оперативных расчетов по распределению выбросов в атмосфере на основе численного моделирования. Такой комплекс программ является необходимым вспомогательным инструментом, который позволит осуществить непрерывный контроль и управление источниками организованных промышленных выбросов с целью исключения возможности наложения полей загрязнений от нескольких источников и, соответственно, превышения уровней ПДК загрязнителей. Анализ полей распространения загрязнений очень важен для прогнозирования и сигнализации о нарастании параметров, определяющих чрезвычайные экологические условия (аварии, катаклизмы), а также для оценки и прогнозирования эффективности применяемых и предлагаемых защитных мероприятий в условиях чрезвычайных ситуаций.

**Целью** данной работы является создание программного обеспечения для оперативного проведения вычислительных экспериментов по исследованию техногенного воздействия на атмосферный воздух газовых выбросов «Интерпайп Нижнеднепровского трубопрокатного завода». Оценка зон загрязнения и их воздействия на прилегающие территории.

**Изложение основного материала.** Выбросы оксидов азота претерпевают химическую трансформацию в атмосфере. Уравнения (1) – (3) описывают процесс рассеивания  $NO$  и  $NO_2$  в атмосфере при эмиссии из труб завода [1].

$$\frac{\partial[NO]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO]}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial[NO]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial[NO]}{\partial y} \right) + Q_{NO} \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (1)$$

$$\frac{\partial[O_3]}{\partial t} + \frac{\partial u[O_3]}{\partial x} + \frac{\partial v[O_3]}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial[O_3]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial[O_3]}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial[NO_2]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO_2]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO_2]}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial[NO_2]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial[NO_2]}{\partial y} \right) + Q_{NO_2} \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (3)$$

где  $Q_{NO}$  – интенсивность выброса  $NO$ ;  $Q_{NO_2}$  – интенсивность выброса  $NO_2$ ;  $u, v$  – компоненты вектора скорости ветра;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $x_i, y_i$  – координаты источника выброса загрязняющего вещества;  $\delta(x - x_i), \delta(y - y_i)$  – дельта-функция Дирака, с помощью которой моделируется выброс от завода, значение функции  $\delta$  тождественно равно нулю во всех ячейках, кроме тех, где расположен источник выброса.

Численное интегрирование уравнений переноса примеси (1) – (3) проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления, согласно краевых условий, рассмотренных в работах [2, 3].

Решение уравнений (4) – (6) методом Эйлера позволяет учесть процесс химической трансформации данных загрязнителей.

$$\frac{d[NO]}{dt} = -k_1[NO][O_3] + J[NO_2], \quad (4)$$

$$\frac{d[NO_2]}{dt} = k_1[NO][O_3] - J[NO_2], \quad (5)$$

$$\frac{d[O_3]}{dt} = -k_1[NO][O_3] + J[NO_2]. \quad (6)$$

Эмпирические параметры  $k_1$  и  $J$  определяются экспериментально и могут в оценочных расчетах приниматься:  $J = 0,0045 \text{ s}^{-1}$ ,  $k_1 = 0,00039 \text{ ppb}^{-1}\text{s}^{-1}$  (Berkowicz R., Overman H.).

Интенсивность выброса оксидов азота «Интерпайп Нижнеднепровского трубoproкатного завода» составляет  $Q=14,076 \text{ г/с}$ . Размеры расчетной области 16 км на 10 км, коэффициент диффузии согласно [6]  $\mu = (0,1 \div 1) \cdot U$ , осреднение по высоте переноса 600 м, скорость ветра с северо-востока составляла  $U = 10 \text{ м/с}$ . Направление ветра с северо-востока  $\alpha = 35^\circ$ , та как северо-восточное направление ветра преобладает для города 13,2 % в году.

В результате проведенных вычислительных экспериментов (рис. 1-3) в зону загрязнения попадают: ул. Столетова – 80 %; пр. Мануйловский, ул. Любарского – 70-60 %; центральный район – 50 %; пр. Пушкина, часть пр. Дмитрия Яворницкого, ул. Михаила Грушевского – 40 %; ул. Надежды Алексеенка, пр. Александра Поля – 30 %; ул. Рабочая, ул. Макарова, ул. Криворожская, ул. Титова, ул. Суворова – 20 %; ул. Лихачева – 10 %; ул. Поточная – менее 5 %. На этих рисунках показаны значения концентрации, которые представлены в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени:  $t=30 \text{ с}$ ,  $C_{\max}=0,078 \text{ мг/м}^3$  (рис. 1),  $t=40,5 \text{ с}$ ,  $C_{\max}=0,174 \text{ мг/м}^3$  (рис. 2),  $t=52,5 \text{ с}$ ,  $C_{\max}=0,318 \text{ мг/м}^3$  (рис. 3). Оценивая значение концентрации в разные моменты времени и сравнивая с предельно допустимой концентрацией  $NO_2$  (м.р. –  $0,085 \text{ мг/м}^3$ , с.с. –  $0,04 \text{ мг/м}^3$ ), можно сказать, что

она в любой момент времени выше среднесуточного значения. Зона загрязнения быстро охватывает районы по направлению ветра, ее размеры с течением времени меняются, но незначительно, изменяется максимальная концентрация рассматриваемого шлейфа.

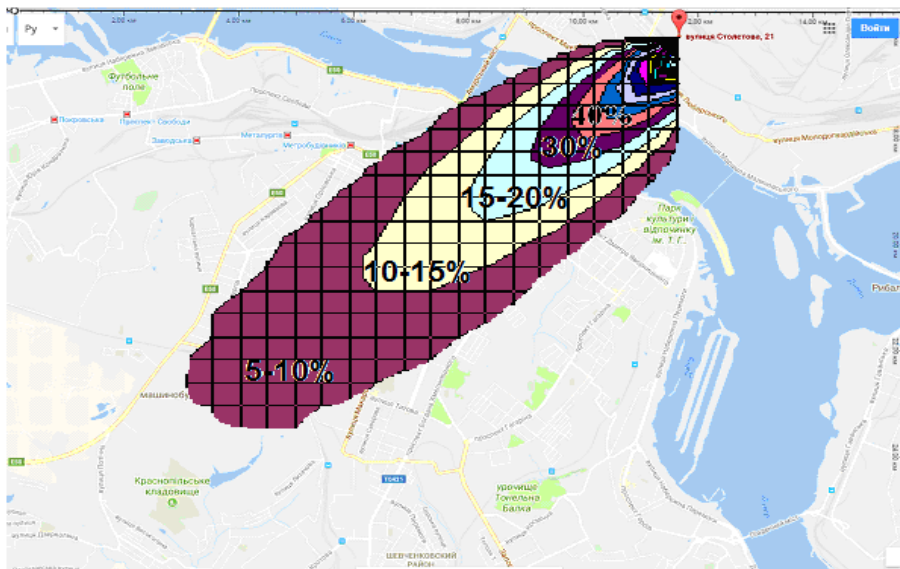


Рис. 1. Зона загрязнения диоксидом азота  $t=30$  с

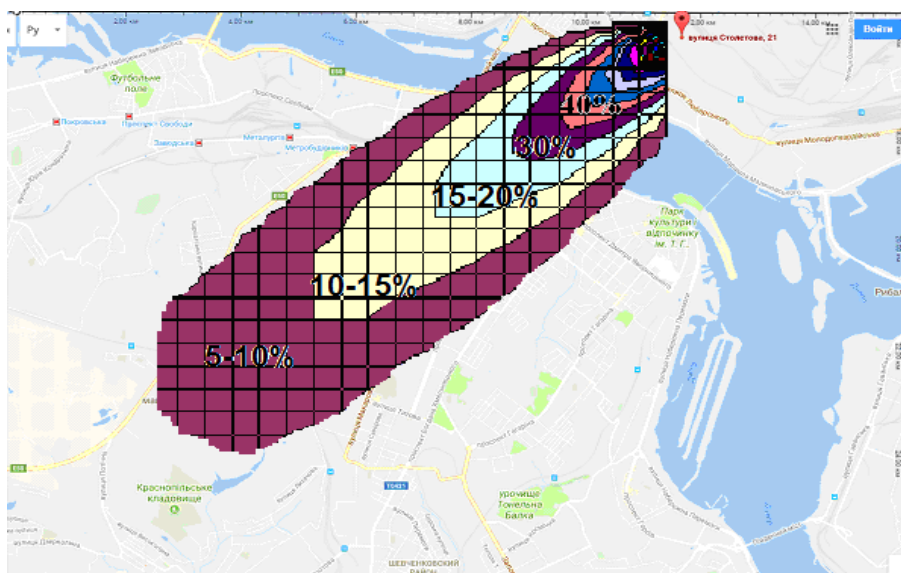


Рис. 2. Зона загрязнения диоксидом азота  $t=40,5$  с

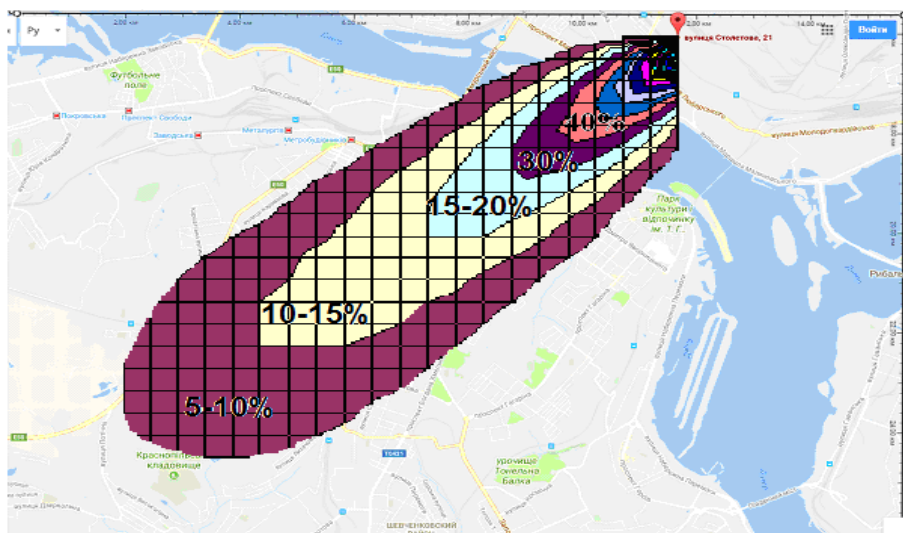


Рис. 3. Зона загрязнення диоксидом азота  $t=52,5$  с

**Выводы.** На основе разработанной численной модели и созданного пакета программ были проведены вычислительные эксперименты по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами диоксида азота при работе «Интерпайп Нижнеднепровского трубопрокатного завода». Выполнены анализ и оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота в зоне влияния данного завода. Оперативность в проведении данного класса расчетов (менее 1 мин) является важным практическим инструментом для прогнозирования экологической ситуации при функционировании данного промышленного предприятия, являющегося источником поступления в атмосферу вредных загрязняющих веществ.

#### Перечень ссылок

1. Izrael, YU.A. (1984). *Ekologiya i kontrol sostoyaniya prirodnoy sredy*. Moskva: Gidrometeoizdat.
2. Marchuk, G.I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushhey sredy*. Moskva: Nauka.
3. Zgurovskiy, M.Z., Skopetskiy, V.V., Khrushch, V.K., Belyayev, N.N. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova Dumka.
4. Gorle, J.M.R., Sambana, N.R. (2016). Dispersion modeling of thermal power plant emissions on stochastic space. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3), 119-131.
5. Vlachogianni, A., Kassomenos, P., Karppinen, Ari, Karakitsios, S., Kukkonen, Jaakko (2011). Evaluation of a multiple regression model for the forecasting of the concentrations of NO<sub>x</sub> and PM<sub>10</sub> in Athens and Helsinki. *Science of the Total Environment*, 409(8), 1559-1571.
6. Balter, B.M., Faminskaya, M.V. (2017). Irregularly emitting air pollution sources: acute health risk assessment using AERMOD and the Monte Carlo approach to emission rate. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10(4), 401-409.

**ABSTRACT**

**Purpose.** Development of methodology and software for determining levels and zones of atmospheric air pollution by emissions from «Interpipe Nizhnedneprovsky Pipe Plant».

**The methodology.** The prediction of the level of atmospheric air pollution by emissions is based on the mathematical model for calculating the concentration of nitrogen dioxide, which takes into account the processes of its oxidation, the formation and evaporation of sulfuric acid in the atmosphere. The numerical method is based on the common solution of the equations of convective-diffusion transfer of pollutants that comes directly from enterprises or is formed additionally due to chemical reactions in the atmosphere. The methodology is implemented using implicit difference schemes.

**Findings.** The developed methodology and software allow to predict the levels of atmospheric air pollution by big industrial enterprises that take into account chemical transformations of pollutants in the environment. The number of numerical experiments have been carried out to estimate the levels and zones of atmospheric air pollution in the city Dnipro by nitrogen dioxide near industrial enterprises taking into account various meteorological conditions.

**The originality.** The dependencies of atmospheric air pollution by industrial enterprise are determined based on the common solution of impurity transfer equations. These impurities are coming from sources of pollution and transformation due to chemical reactions in the atmosphere.

**Practical implication.** The developed prediction method and software allow to determine the concentration of pollutants in the atmosphere and to assess the level of environmental hazard of big industrial enterprises. The obtained dependencies contaminant dispersion allows to predict pollution levels of environmental objects on the territory of industrial cities and take measures to protect their air environment with time.

**Keywords:** *industrial enterprise, emission, dispersion, chemical interaction, numerical model*