

УДК 502.3  
UDC 502.3

## ТОЧНІСТЬ ОЦІНКИ ПРИ РОЗРАХУНКУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН У ВУЛИЧНОМУ КАНЬЙОНІ

*Бакуліч О.О.*, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна

*Самойленко Є.С.*, Національний транспортний університет, Київ, Україна

## ACCURATE ASSESSMENT IN CALCULATING THE CONCENTRATION OF POLLUTANTS IN STREET CANYONS

*Bakulich O.O.*, Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine

*Samoylenko E.S.*, National Transport University, Kyiv, Ukraine

## ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ ПРИ РАСЧЕТЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАГРЕЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В УЛИЧНОМ КАНЬОНЕ

*Бакуліч Е.А.*, кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина

*Самойленко Е.С.*, Национальный транспортный университет, Киев, Украина

**Постановка проблеми.** Моделювання розсіювання забруднюючих речовин від автотранспорту є однією з найскладніших задач, оскільки транспортні потоки, які функціонують у вулично-дорожній мережі можна вважати нестационарними, лінійними, приземними джерелами холодних викидів[1]. При цьому, поля забруднення, які утворюються, мають значні просторові градієнти концентрації з сильною часовою мінливістю. Складність моделювання таких полів обумовлена не лише тим, що джерела викидів стохастичні, а й мінливістю метеорологічних полів, зокрема векторного поля вітру в шарі шорсткості вуличного каньйону, яка обумовлена специфічними особливостями підстильної поверхні [2].

При складанні прогнозу рівня забруднення у вуличних каньйонах неминуче виникають похибки різних типів: похибка задачі, яка обумовлена наближенням характером вибраної моделі, а саме неможливістю повністю врахувати всі фактори, що впливають на рівень забруднення (дана похибка вважається неусувною); похибка заокруглень та методична похибка, яка пов'язана зі способом вирішення відповідної задачі [3].

**Метою статті** є оцінка похибки, а саме ступінь достовірності прогнозу рівня забруднення у вуличному каньйоні, яка обумовлена параметризацією вектору швидкості вітру.

**Виклад основного матеріалу.** Стан атмосферного повітря досліджується, як правило, шляхом проведення відповідних натурних спостережень та математичним моделюванням. Побудова математичних моделей базується на результатах теоретичного та експериментального дослідження закономірностей розповсюдження забруднюючих речовин. Існують різні підходи до вирішення задачі розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері та моделюванні полів забруднення, зокрема: аналітичне вирішення рівняння турбулентної дифузії, чисельне моделювання турбулентних течій, Гаусові моделі, Лагранжеві моделі, моделі міських каньйонів, статистичні моделі. Найбільш часто для розрахунку рівня забруднення атмосфери використовують гаусові моделі, зокрема від точкового джерела, які описуються нормальним розподілом концентрацій вздовж координатних осей [4]:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \quad (1)$$

де  $C$  – середня концентрація викиду в точці  $(x, y, z)$ ;

$Q$  – потужність джерела викидів;

$u$  – швидкість вітру, усереднена для шару перемішування;

$\sigma_y, \sigma_z$  – відхилення розподілу концентрацій в горизонтальному і вертикальному напрямках;

Для лінійного джерела забруднення, що знаходиться вздовж осі  $y$ , розподіл концентрації характеризується лише змінами у вертикальній площині ( $x, z$ ). Якщо враховувати мінливість напрямку вектору швидкості вітру відносно джерела викиду, то використовується його проекція  $u \sin \varphi$ .

До найбільш поширених моделей забруднення від лінійних джерел відносяться, зокрема, модель Caline-4, розробник Каліфорнійський департамент транспорту, в основі якої лежить Гаусова модель факелу. Дана модель оцінює концентрацію забруднюючих речовин в радіусі не більше 500м від автомагістралі. Клас стійкості приземного шару атмосфери визначаються за допомогою модифікованих кривих Паскуїлла-Гіффорда. Незважаючи на широке використання даної моделі, результати моделювання можна розглядати лише як якісні оцінки, оскільки в моделі не враховано багато факторів, що впливають на розсіювання, а саме: особливості міської забудови, рельєф місцевості, метеорологічні характеристики тощо.

Розсіювання забруднення у вуличних каньйонах значно відрізняється від розсіювання на відкритих територіях, оскільки будівлі суттєво впливають на формування повітряних потоків, деформують їх, надаючи турбулентний характер течії. Ця особливість поведінки повітряних потоків у міських каньйонах призводить до виникнення великих градієнтів концентрації забруднюючих речовин вздовж вулиць. Особливо це характерно для підвітряної та навітряної сторони вулиць [5].

Одна з перших моделей забруднення вулиць - модель Street (W. Johnson та ін.[6]), де концентрація забруднюючих речовин оцінювалася за формулою:

$$C = \frac{Q}{u_b(W/2)} \cdot \frac{F}{1-F} \quad (2)$$

де  $F$  – рециркулююча частина забруднення в каньйоні;

$Q$  – об'єм викидів;

$W$  – ширина автомагістралі;

$u_b$  – швидкість вітру над будівлями.

Дана модель є найпростішою, вона заснована на емпіричних даних отриманих на вулицях міста Сан-Хосе та Сент-Луїс (США) з врахуванням навітряного-підвітряного градієнту концентрацій.

В моделі CPBM (Canyon Plum-Box Model) за допомогою поєднання моделі факела (для оцінки прямого впливу забруднення) з box-моделлю (для визначення додаткового впливу забруднення, яке циркулює під впливом повітряних потоків), концентрація забруднюючих речовин у вуличному каньйоні розраховується, наступним чином:

$$C = \frac{K}{U + U_s} \cdot \frac{H - z}{H} \sum \frac{Q_i}{W} \quad (3)$$

де  $u$  – швидкість вітру над будівлями;

$u_s$  – швидкість вітру, що виникає від руху автомобілів;

$H, W$  – відповідно висота та ширина каньйону;

$K$  – емпірична константа;

$z$  – висота джерела забруднення;

$Q_i$  – об'єм викидів від  $i$ -ої ділянки.

Модель OSPM (Operational street pollution model) використовує подібний підхід, що і модель Canyon Plum-Box Model, проте при оцінці забруднення вона враховує конфігурації міських каньйонів (довжину, висоту забудов) та механічну турбулентність, яка виникає внаслідок руху автомобілів. Недоліком OSPM є те, що вона не враховує деформацію загального вітрового потоку в залежності від конфігурації забудов та не дозволяє оцінити забруднення у віддалених від автомагістралі точках [7].

Розрахунок концентрацій забруднюючих речовин здійснюється за наступною формулою:

$$C = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{u_b} \sum \frac{Q_i}{h_0 + (\sigma_w / u_b) \cdot x_i} + \frac{Q_i}{Q_{wt} \cdot W} \quad (4)$$

де  $\sigma_w$  – дисперсія швидкості вітру;  
 $\sigma_{wt}$  – дисперсія вітру, що виникає від руху автомобілів;  
 $u_b$  – швидкість вітру над будівлями;  
 $w$  – ширина автомагістралі;  
 $h_0$  – висота джерела викидів;  
 $Q_i$  – об'єм викидів від  $i$ -ої ділянки автомагістралі;  
 $x_i$  – відстань від  $i$ -ого джерела викидів.

Таким чином, як видно з представлених моделей, для оцінки рівня забруднення, необхідно мати уявлення про стан атмосфери, в першу чергу, мається на увазі вектору швидкості вітру. Мінливість якого, необхідно враховувати для якісної оцінки рівня забруднення повітря у вуличних каньйонах міста. У зв'язку з цим, був проведений статистичний аналіз квазінеперервних значень швидкості та напрямку вітру, з дискретністю 1 хв., протягом року в м. Києві (рис.1). Метеорологічна інформація зі складових вітру була отримана на метеостанції Київ Центральної геофізичної обсерваторії, де вимірювання проводиться за допомогою двох основних вітровимірювальних приладів: анемометра МАРК та анеморумбометра М-63 [8].

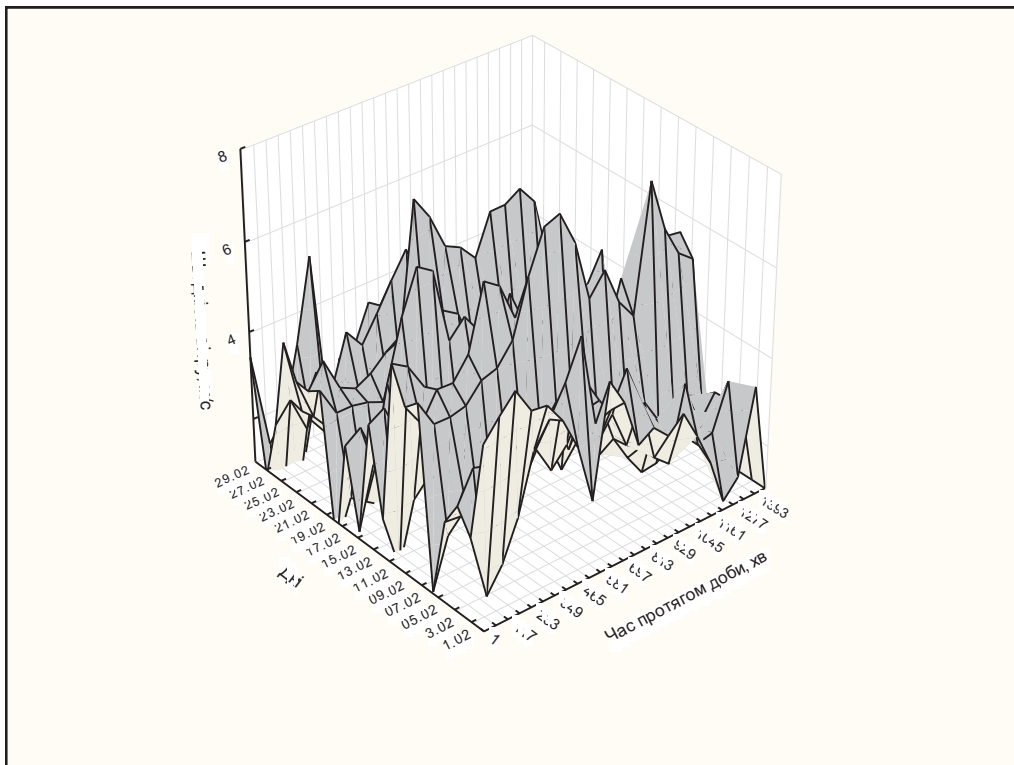


Рисунок 1 – Добовий хід швидкості вітру ( лютий 2016р.)

Протягом року найбільша середньомісячна швидкість вітру (2,7-2,9 м/с) спостерігається у зимові місяці. Починаючи з травня вона поступово зменшується і у серпні набуває найменших значень. Швидкість вітру у денні години значно вища, оскільки за рахунок конвекції створюється значний вертикальний обмін. В нічні і ранкові години збільшується стійкість повітря у нижніх шарах тому швидкість вітру нижча. Протягом лютого середньодобові швидкості вітру становлять 1-5,7 м/с (рис.2). У нічні години коливання швидкості вітру менш значні, а в ранці і вдень дещо збільшується.

Найбільш повторювальні напрями вітру: західний – протягом 6 місяців; північний – протягом 4 місяців та південно-східний – протягом 2 місяців.

Щільність розподілу швидкості та напрямку вітру протягом доби, з незначними винятками, виявилися близькі до нормальних (рис.3,4).

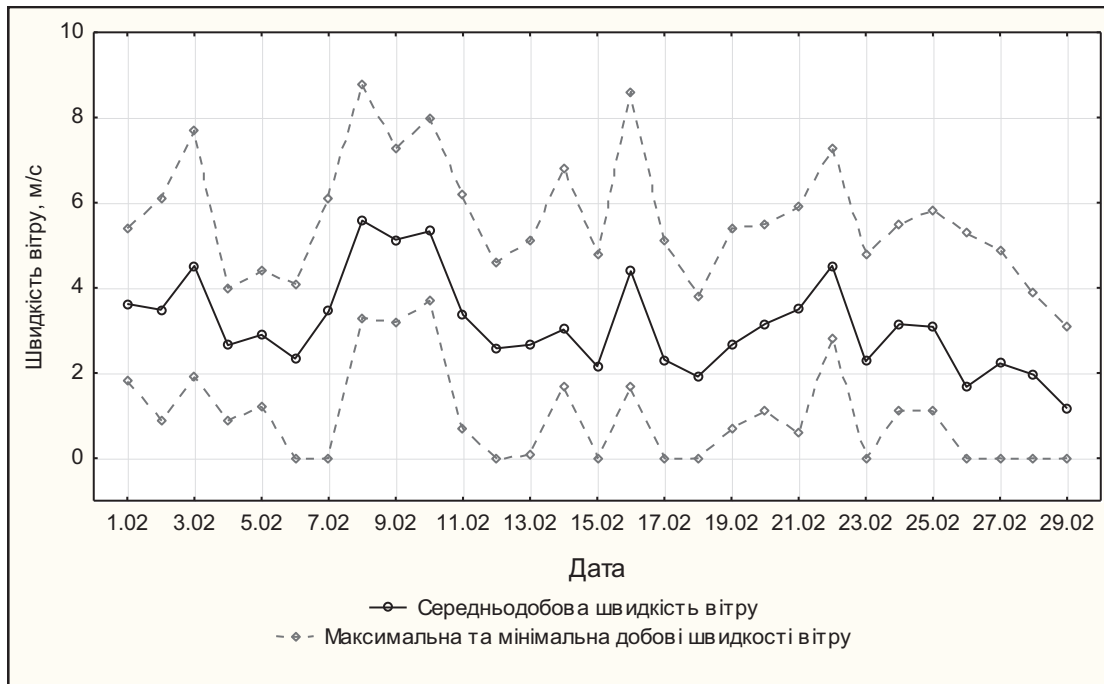


Рисунок 2 – Мінливість значень швидкості вітру протягом доби

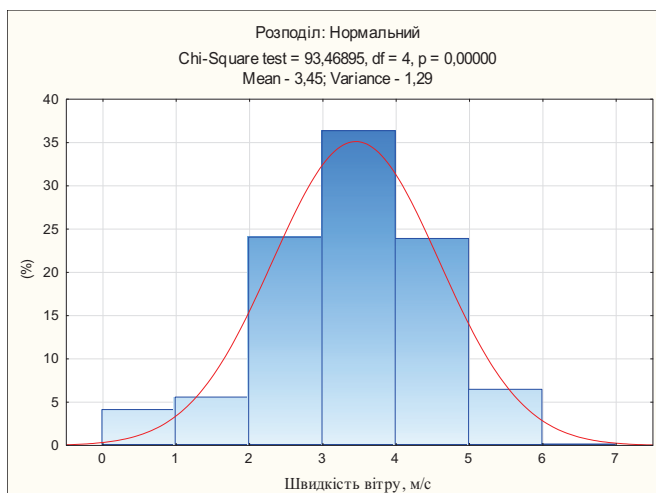


Рисунок 3 - Щільність добового розподілу швидкості вітру – 7.02.16

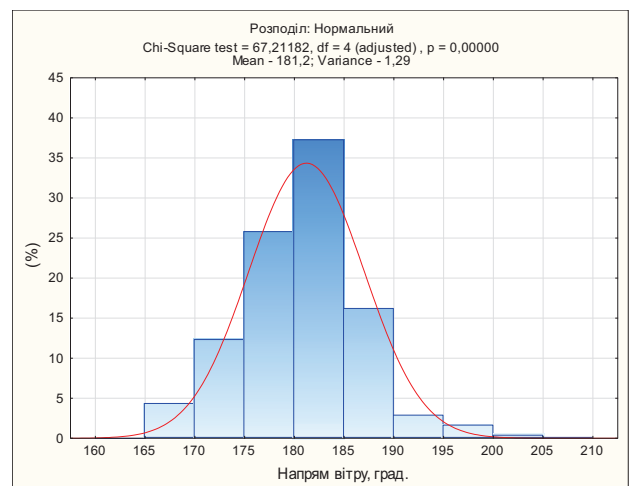


Рисунок 4 - Щільність добового розподілу напрямку вітру – 7.02.16

Оскільки вектор швидкості вітру є випадкова величина, а його зміна з плином часу – це випадковий процес, то використання відповідних середніх значень призводить до істотних похибок в розрахункових значеннях концентрації забруднюючої речовини. У такому разі необхідно оцінити точність з якою можливо провести відповідні розрахунки. Для цього використовувалася інтервальна оцінка вектору швидкості вітру за *t*-критерієм. Із заданою надійністю (0,95) були встановлені довірчі інтервали для швидкості та напрямку вітру з різним часовими періодами осереднення (рис. 5-7).

Як слідує з табл.1 на точність оцінювання швидкості вітру суттєво впливає тривалість періоду осереднення, що в свою чергу вплине і на точність оцінювання рівня забруднення.

Таким чином, при складанні прогнозу полів забруднення необхідно задавати відповідний часовий масштаб осереднення виходячи з доцільності точності прогнозу.

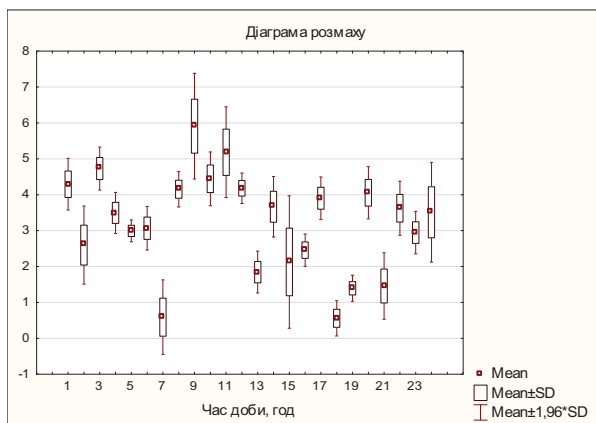


Рисунок 5 – бокс-діаграма середнього та інтервального значення швидкості вітру з часом осереднення 1 год. (1.02.16)

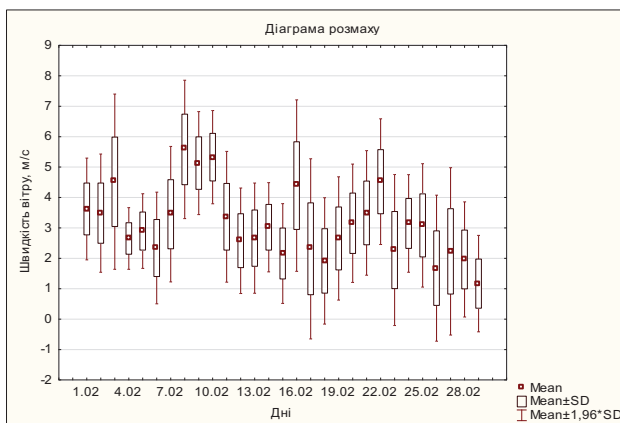


Рисунок 6 – бокс-діаграма середнього та інтервального значення швидкості вітру з часом осереднення 1 доба (1.02.16)

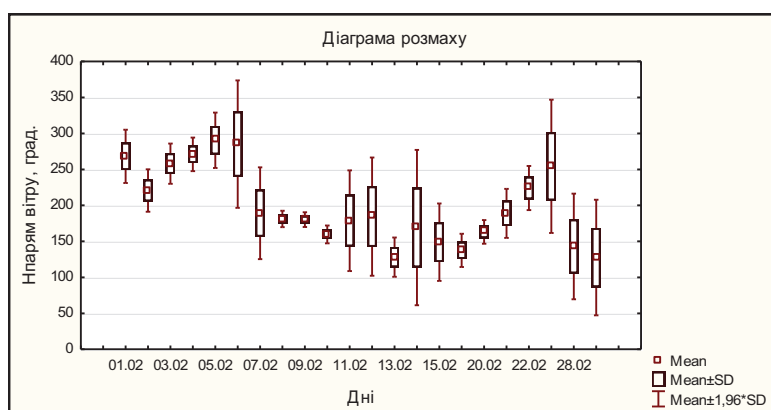


Рисунок 7 – бокс-діаграма середнього та інтервального значення швидкості вітру з часом осереднення 1 доба

На основі інтервальних оцінок визначені відносні похибки відповідних величин (табл.1).

Таблиця 1 – Відносні похибки при визначенні напрямку та швидкості вітру з різним часовим осередненням

Час осереднення (τ)	Відносна похибка швидкості вітру, %	Відносна похибка напрямку вітру, %
Місяць	94,6	84,9
Доба	71,8	36,2
6 годин	54,7	29,6
3 години	46,9	24,9
1 година	33,7	15,8
30 хвилин	29,5	14,1

**Висновки.** Аналіз основних моделей, що використовуються для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря в місті, показав про доцільність моніторингу вектору швидкості вітру в межах вуличного каньйону. Статистичний аналіз мінливості вектору швидкості вітру протягом року, дозволив із заданою надійністю встановити довірчі інтервали для різних часових масштабів осереднення та визначити точність відповідних оцінок.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тасейко О.В. Моделирование пространственного распределения загрязнителей от автотранспорта в условиях городской застройки / О.В. Тасейко, С.В. Михайлюта // География и природные ресурсы. – 2004. – Специальный выпуск. С. 180-185.
2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М.Е. Бероянд - Л.: Гидрометеиздат, 1975, 439 с.

3. Вержбицкий В.М. Основы численных методов: Учебник для вузов / В.М. Вержбицкий. - М.: Высш. шк., 2002. — 840 с.
4. ОНД-86. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат, 1987.
5. Бакуліч О.О. Потенційна екологічна небезпека вуличних каньйонів міста / О.О. Бакуліч, Р.В. Олійник, Є.С. Самойленко // Вісник Національного транспортного університету. – К.:НТУ, 2014. – Вип.31.
6. Hertel, O. R., Berkowicz R. Modelling from traffic in a street canyon. Evaluation of data and model development. Roskilde, National Environmental Research Institute, 1989. — 77 p.
7. O. Hertel, R. Berkowicz, Operational street pollution model (OSPM) – evaluation of data and model development, Ministry of the Environment, National Environmental Research Institute: Roskilde, Denmark, 1989
8. Осадчий В.І. Клімат Києва / В.І. Осадчий, О.О. Косовець, В.М. Бабіченко – К.: К49 Ніка-Центр, 2010. – 320 с.

#### REFERENCES

1. Taseyko O.V., Mykhayliuta S.V. *Modelirovaniye prostranstvennogo raspredeleniya zagryazniteley ot avtotransporta v usloviyakh gorodskoy zastroyki* [Modeling the spatial distribution of pollutants from motor vehicles in urban conditions]. *Geographiya i prirodnyye resursy [Geography and natural resources]*, 2004, special issue, pp. 180-185. (Rus)
2. Berlyand M.E. *Sovremennyye problemy atmosfernoй difuzii i zagryazneniya atmosfery* [Modern problems of atmospheric diffusion and air pollution]. Leningrad, Gidrometeo Publ., 1975. 439 p. (Rus)
3. Verzhbitskiy V.M. *Osnovy chislennykh metodov* [Fundamentals of numerical methods]. Moskva, High school Publ., 2002. 840 p. (Rus)
4. ОНД-86. *Metodika rascheta kontsentratsii v atmosfernom vozdukhе vrednykh veshscestv soderzhashchikhsya v vybrosakh predpriyatiy* [The methodology for calculating the concentration in the air of harmful substances contained in industrial emissions]. Leningrad, Gidrometeo Publ., 1987. (Rus)
5. Bakulich O.O., Oliynyk R.V., Samoylenko E.S. *Potentsiyна ekologichna nebezpeka vulychnykh kanyoniv mistа* [Potential environmental hazards of street canyons]. *Visnyk natsionalnogo transportnogo universytetu [Visnyk National Transport University]*. – Kyiv, National Transport University Publ. 2014. – Vol. 31. (Ukr)
6. Hertel, O. R., Berkowicz R. Modelling from traffic in a street canyon. Evaluation of data and model development. Roskilde, National Environmental Research Institute, 1989. — 77 p.
7. O. Hertel, R. Berkowicz, Operational street pollution model (OSPM) – evaluation of data and model development, Ministry of the Environment, Roskilde, National Environmental Research Institute Publ., 1989.
8. Osadchyy V.I., Kosovets O.O., Babichenko V.M. *Klimat Kyуeva* [The climate of Kiev]. Kiev, K49 Nika Center Publ., 2010. 320 p. (Rus)

#### РЕФЕРАТ

Бакуліч О.О. Точність оцінки при розрахунку концентрації забруднюючих речовин у вуличному каньйоні / О.О. Бакуліч, Є.С. Самойленко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2017. – Вип. 1 (37).

Стаття присвячена визначенню точності оцінки при розрахунку концентрації забруднюючих речовин у вуличному каньйоні.

Об'єкт дослідження – вплив мінливості вектору швидкості вітру на рівень забруднення.

Мета роботи – оцінка похибки, а саме ступінь достовірності прогнозу рівня забруднення у вуличному каньйоні, яка обумовлена параметризацією вектору швидкості вітру.

Методи дослідження: методи статистичного аналізу, методи математичного моделювання.

Стан атмосферного повітря досліджується, як правило, шляхом проведення відповідних натурних спостережень та математичним моделюванням. При складанні прогнозу рівня забруднення у вуличних каньйонах неминує виникати похибки різних типів, зокрема, методичні похибки, що пов'язані зі способом вирішення відповідної задачі. Оскільки вектор швидкості вітру є випадковою величиною, то використання відповідних середніх значень призводить до істотних похибок в розрахункових значеннях концентрації забруднюючої речовини.



Аналіз основних моделей, що використовуються для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря в місті, показав про доцільність моніторингу вектору швидкості вітру в межах вуличного каньйону. Статистичний аналіз мінливості вектору швидкості вітру протягом року дозволив із заданою надійністю встановити довірчі інтервали для різних часових масштабів осереднення та визначити точність відповідних оцінок. Таким чином, при складанні прогнозу полів забруднення необхідно задавати відповідний часовий масштаб осереднення виходячи з доцільності точності прогнозу.

Результати даної роботи дозволять більш якісно управляти станом атмосферного повітря міста.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ТОЧНІСТЬ ОЦІНКИ, ВУЛИЧНИЙ КАНЬЙОН, РІВЕНЬ ЗАБРУДНЕННЯ, ВЕКТОРНЕ ПОЛЕ ВІТРУ, ДОВІРЧИЙ ІНТЕРВАЛ, ВІДНОСНА ПОХИБКА.

#### ABSTRACT

Bakulich O.O., Samoylenko E.S. Accurate assessment in calculating the concentration of pollutants in street canyons. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2017. – Issue 1 (37).

The article is devoted to the definition of accuracy assessment in calculating the concentration of pollutants in a street canyon.

The object of study - the impact of variability of vector wind velocity for contamination level.

Purpose of the study - error estimation, namely the reliability degree of the forecast level of pollution in a street canyon which is caused parameterization vector wind velocity.

Research methods: the methods of statistical analysis, mathematical modeling techniques.

State investigates air, usually through the relevant field observations and mathematical modeling. When forecasting the level of pollution in street canyons inevitably there are errors of various types, including methodological errors related to the way of resolving the problem. As the wind speed vector is a random variable, then use the corresponding mean values leads to significant errors in the calculated values of pollutant concentrations.

Analysis of the main models used to assess the level of air pollution in the city, showed the feasibility of monitoring wind velocity vector within the street canyon. Statistical analysis of the variability of the vector wind velocity during the year allowed the given reliability set confidence intervals for different time scales and averaging to determine the accuracy of the relevant assessments. Thus, the pollution forecasting fields must set the correct time scale based on the feasibility of averaging the accuracy of the forecast.

The results of this work will allow to better control the air quality of the city.

**KEY WORDS:** ACCURATE ASSESSMENT, STREET CANYON, POLLUTION, VECTOR FIELD OF WIND, CONFIDENCE INTERVALS, RELATIVE ERROR.

#### РЕФЕРАТ

Бакулич Е.А. Точность оценки при расчете концентрации загрязняющих веществ в уличном каньоне / Е.А. Бакулич, Е.С. Самойленко // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2017. – Вып. 1 (37).

Статья посвящена определению точности оценки при расчете концентрации загрязняющих веществ в уличном каньоне.

Объект исследования - влияние изменчивости вектора скорости ветра на уровень загрязнения.

Цель работы - оценка погрешности, а именно степень достоверности прогноза уровня загрязнения в уличном каньоне, которая обусловлена параметризацией вектора скорости ветра.

Методы исследования: методы статистического анализа, методы математического моделирования.

Состояние атмосферного воздуха исследуется, как правило, путем проведения соответствующих натурных наблюдений и математическим моделированием. При составлении прогноза уровня загрязнения в уличных каньонах неизбежно возникают ошибки различных типов, в частности, методические погрешности, связанные с способом решения соответствующей задачи. Поскольку вектор скорости ветра является случайной величиной, то использование соответствующих средних значений приводит к существенным погрешностям в расчетных значениях концентрации загрязняющего вещества.

Анализ моделей, используемых для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха в городе, показал целесообразность мониторинга вектора скорости ветра в пределах уличного каньона.

Статистический анализ изменчивости вектора скорости ветра в течение года позволил с заданной надежностью установить доверительные интервалы для различных временных масштабов осреднения и определить точность соответствующих оценок. Таким образом, при составлении прогноза полей загрязнения необходимо задавать соответствующий временной масштаб осреднения исходя из целесообразности точности прогноза.

Результаты данной работы позволят более качественно управлять состоянием атмосферного воздуха города.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ, УЛИЧНЫЙ КАНЬОН, УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ВЕКТОРНОЕ ПОЛЕ ВЕТРА, ДОВЕРИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРВАЛ, ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ.

**АВТОРИ:**

Бакуліч О.О., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, декан факультету менеджменту, логістики та туризму, e-mail: bakulich.elena@gmail.com, тел. +380937451421, Україна, 01010, м. Київ, вул. Суворова 1.

Самойленко Є.С., Національний транспортний університет, аспірант, e-mail: sirius27@ukr.net, тел. +380988088008, Україна, 01010, м. Київ, вул. Суворова 1.

**AUTHOR:**

Bakulich O.O. Ph.D., (engineering), National Transport University, Dean of the Faculty of Management, logistics and tourism, e-mail: bakulich.elena@gmail.com, tel. +380937451421, Ukraine, 01010 Kyiv, Suvorova str. 1.

Samoylenko E.S., National Transport University, postgraduate, e-mail: sirius27@ukr.net, tel. +380988088008, Ukraine, 01010 Kyiv, Suvorova str.1.

**АВТОРЫ:**

Бакуліч Е.А., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, декан факультета менеджмента, логистики и туризма, e-mail: bakulich.elena@gmail.com, тел. +380937451421, Украина, 01010, г. Киев, ул. Суворова 1.

Самойленко Е.С., Национальный транспортный университет, аспирант, e-mail: sirius27@ukr.net, тел. +380988088008, Украина, 01010, г. Киев, ул. Суворова 1.

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Данчук В.Д., доктор фіз.-мат. наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри електроніки та обчислювальної техніки, Київ, Україна.

Олійник Р.В., кандидат фіз.-мат. наук, доцент, Київський Національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

**REVIEWER:**

Danchuk V.D, Ph.D, Professor, National Transport University, Head of Department of Electronics and Computer Science, Kyiv, Ukraine.

Oliynik R.V. Ph.D., assistant professor, National University named after T. Shevchenko, Kyiv, Ukraine.