

УДК 504.063

Artem Goncharenko, graduate student
ORCID ID: 0000-0001-5647-1360 *e-mail*: hosting.pat@gmail.com

Rostyslav Sipakov, PhD
ORCID ID: 0000-0002-0862-5043 *e-mail*: sipakov.rv@knuba.edu.ua

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

THE FORMATION OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION EMISSIONS FROM SEPARATE EXPLOSIONS AS A RESULT OF MILITARY OPERATIONS

***Abstract.** As is well known, military operations in urbanized areas lead to deterioration of atmospheric air quality. The article examines the model of the formation of atmospheric polluted air from individual explosions as a result of military operations. A technique based on the theory of the convective jet is proposed for estimating the concentrations of hazardous substances formed above the burning area as a result of the explosion. The proposed approach makes it possible to obtain the concentration of pollutants in the conditions of emission into the atmosphere open to solar radiation at a height of three or more diameters of the explosion funnel (or the conventional diameter of the warm surface), the temperature and speed of hot air jets over the warm surface, the consumption of the desired substance. The obtained data make it possible to calculate the emission of hazardous substances into the atmosphere according to the formulas for a high unshaded source of pollution depending on the meteorological conditions of the area, to determine the concentration of the main acid-forming substances when assessing the probability of acid precipitation, and to serve as a basis for modern innovative atmospheric air monitoring systems.*

An assessment of the existing approach to determining atmospheric air pollution due to the impact of X-101 missile fragments in Kyiv on December 16, 2022 was made, which is a confirmation of the validity of this approach when calculating the impact of a separate explosion on atmospheric air quality. Calculated emissions of pollutants and their concentrations in the air in the upper part of the convective polluted jet in the case of separate explosions of the Kalibr cruise missile, the Kh-101 missile and the BUK-M1 projectile. The error from the comparison of these calculation results with the atmospheric air monitoring system depends on the nearest active observation points. This approach to assessing and forecasting concentrations of pollutants in atmospheric air can be used under neutral atmospheric conditions that determine the emission of pollutants and transformations of chemical substances in the air.

***Key words:** military operations; separate explosion; atmospheric air quality; convective jet.*

© А.В. Гончаренко, Р.В. Сіпаков, 2023

А.В. Гончаренко, Р.В. Сіпаков

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ФОРМУВАННЯ ЕМІСІЇ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД ОКРЕМИХ ВИБУХІВ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ

***Анотація.** Як відомо, воєнні дії на урбанізованих територіях призводять до погіршення якості атмосферного повітря. В статті розглянуто модель формування атмосферного забрудненого повітря від окремих вибухів внаслідок воєнних дій. Запропоновано методика, що заснована на теорії конвективного струменя при оцінці концентрацій небезпечних речовин, що утворюється над площею горіння внаслідок вибуху. Пропонований підхід дозволяє отримувати концентрації забруднюючих речовин в умовах емісії у відкриту сонячному випромінюванню атмосферу на висоту до трьох і більше діаметрів воронки вибуху (або умовного діаметра теплої поверхні), температуру та швидкість гарячого струменя повітря над теплою поверхнею, витрату шукваної речовини. Отримані дані дозволять в подальшому розраховувати емісію в атмосферу небезпечних речовин за формулами для високого незатіненого джерела забруднення в залежності від метеорологічних умов місцевості, визначати концентрацію основних кислотоутворюючих речовин при оцінці імовірності випадіння кислотних опадів та слугувати підосною для сучасних інноваційних систем моніторингу атмосферного повітря.*

Зроблено оцінку існуючого підходу до визначення забруднення атмосферного повітря внаслідок попадання уламків ракет типу X-101 в м. Києві 16 грудня 2022 року, що є підтвердженням правомірності даного підходу при розрахунках впливу окремого вибуху на якість атмосферного повітря. Розраховані викиди забруднюючих речовин та їх концентрації в повітрі у верхній частині конвективного забрудненого струменя у випадку окремих вибухів крилатої ракети «Калібр», ракети «X-101» та снаряду «БУК-М1». Похибка від співставлення даних результатів розрахунку з моніторинговою системою атмосферного повітря залежить від відстані до найближчих діючих пунктів спостережень. Даний підхід до оцінки та прогнозування концентрації забруднюючих речовин в атмосферному повітрі можна використовувати при нейтральних умовах атмосфери, що визначають емісію забруднень та перетворень хімічних речовин в повітрі.

***Ключові слова:** воєнні дії; окремі вибухи; якість атмосферного повітря; конвективний струмінь.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.111-120>

Вступ

Внаслідок російської воєнної агресії в Україні, останнім часом ворог завдає окремих ракетних ударів по цивільній інфраструктурі у великих містах, що призводить, крім людських втрат та руйнування матеріальних об'єктів, також до значного забруднення атмосферного повітря міського середовища. Низкою авторів доведено вплив військової діяльності та воєнних дій внаслідок агресії на глобальні екологічні проблеми [1, 2, 3 та ін.]. Для визначення кількості небезпечних речовин, що вивільняються в атмосферу під час вибуху, в тому числі і таких, що впливають на зміну клімату в глобальному масштабі або проходять повне окислення та спричиняють кислотні дощі, необхідно мати

зручний математичний апарат, який засновано на застосуванні методів математичного моделювання, методів статистичного аналізу та врахуванні законів хімічної кінетики. Крім цього, слід зазначити, що невід'ємною частиною концепції створення сучасної інноваційної моделі моніторингових спостережень є той факт, що вона повинна базуватися на взаємопов'язаних наявних математичних моделях, статистичних залежностях і даних існуючих систем спостережень [4]. Даний математичний апарат може слугувати окремим блоком в системі моніторингових спостережень за станом атмосферного повітря, враховуючи при цьому забруднення повітря внаслідок воєнних дій на міській території.

Постановка проблеми

Дослідження закономірностей розповсюдження небезпечних речовин, що пов'язані з вибухами боєприпасів, є актуальним питанням екологічної безпеки. В існуючих дослідженнях важливе значення приділялося визначенню загального складу та кількості забруднюючих речовин, які утворились внаслідок вибухів, з подальшим їх впливом на довкілля і населення. Ці питання частково розглянуті в роботах [5, 6] на прикладі аварії на складі боєприпасів. Проблема формування вторинних забруднювачів в атмосфері при різних метеорологічних умовах навколишнього середовища, висоті стовпа вибуху та емісії антропогенних домішок в атмосферу Землі розглядалася, в основному, стосовно високих незатінених джерел забруднення [7]. В даній роботі розглядалася математична модель процесів формування кислотних опадів та їх випадання на територіях, що прилягають до зони ТЕС, яка враховує двовимірне тепло- та масоперенесення, кінетику процесу конденсації, дифузію та конвекцію пари оксидів сірки, вирішується чисельним способом методом кінцевих різниць.

Відомі методики оцінки відстаней, на які можуть поширюватися антропогенні компоненти викидів, теж стосуються, в основному, високих виробничих труб. Методики передбачають визначення концентрацій на шляху розвитку забрудненого струменя на трьох ділянках: викиду факелу забруднення, зоні максимального забруднення і поступового зниження концентрації. Вони основані на реалізації математичної моделі атмосферної дифузії та статистичних моделей [8–10 та ін.]. Задача характеру формування теплового куполу над теплою поверхнею міського середовища за допомогою рівняння кількості руху забрудненого повітря, його параметри та кількість теплоти джерела досить детально описані в роботі [11]. Для визначення параметрів конвективного струменя авторами використовувався інтегральний метод Л. Ейлера, який полягає в рівності змін кількості вхідних та вихідних рухів потоку в окреслений об'єм та суми імпульсів об'ємних активних і реактивних сил. Аналогічний підхід правомірно застосувати при розгляді теплового забрудненого струменя при одиночному вибуху (рис. 1).

Метою даного дослідження є оцінка викидів шкідливих речовин на підставі створення моделі конвективного струменя, що дозволяє визначити формування купола забруднення над місцем вибуху в залежності від метеоумов місцевості.

Основна частина

Циліндричний об'єм, що розглядається, окреслений перерізом I – I зі сторони теплої поверхні і перерізом II – II на межі ділянки формування конвективного струменя. Всі вектори підтікання атмосферного повітря є перпендикулярними вертикальній осі системи.

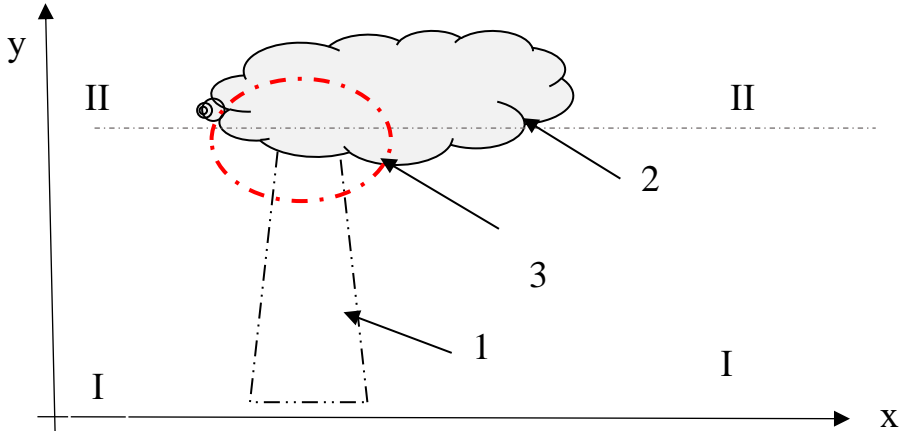


Рис. 1. Схема постановки задачі: 1 – стовп вибуху; 2 – напрямок руху вибухових газів; 3 – умовне локальне джерело викидів при розповсюдженні в атмосфері

Від певних метеоумов місцевості та їх комбінацій залежать умови формування основних шляхів розповсюдження забруднень в повітрі. Провідними метеорологічними факторами можна назвати швидкість вітру, турбулентність атмосфери в межах планетарного прилежого шару і вертикальне розподілення температури (адіабатичне, інверсійне і шарувате різноманітне).

З використанням критерія Річардсона Ri розрізняють стабільні $Ri > 1$, нестабільні $Ri < 1$ і нейтральні при $Ri \approx 1$ умови атмосфери.

Згідно з визначенням (1) нейтральність настає при врівноваженості факторів, які обумовлюють процеси дестабілізації і стабілізації атмосфери. Вектори підтікання атмосферного повітря є перпендикулярними вертикальній осі системи.

$$Ri = \frac{g^* \left(\frac{dt}{dH} - A \right)}{T^* \left(\frac{du}{dH} \right)^2} . \quad (1)$$

Питома енергія вибухових речовин приймається 4184 Дж/г. Для крилатої ракети типу «Калібр» з бойовою частиною 450 кг теплота по площі горіння складає $1,88 \cdot 10^9$ Дж, або 449330,78 ккал; ракети X-101 з бойовою частиною 400 кг складає $1,67 \cdot 10^9$ Дж, або 339139,57 ккал; зенітної ракети середньої дальності «БУК-М1» з бойовою частиною вагою 50-70 кг теплота по площі горіння складає $2,5 \cdot 10^8$ Дж, або 59751,43 ккал [12, 13]. Розрахунок викидів деяких кислотоутворюючих речовин та парникових газів наведено в таблиці 1. Коефіцієнт питомих викидів речовин з деякими припущеннями було взято

нами з Методики розрахунку неорганізованих викидів забруднюючих речовин або суміші таких речовин внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій та/або під час дії воєнного стану та визначення розмірів завданої шкоди. Затверджено Наказом Міністерства довкілля та природних ресурсів України 13 квітня 2022 року, № 175 [14].

Таблиця 1. Розрахунок маси викиду окремих речовин при вибуху крилатої ракети типу «Калібр», ракети типу Х-101 та снаряду «БУК-М1»

№	Забруднююча речовина	Середній коефіцієнт питомих викидів, т/т	Маса згорілої речовини, М, т; Крилата ракета «Калібр»/ракета Х-101/снаряд «БУК-М1»	Викид, Мв, т; Крилата ракета «Калібр»/ракета Х-101/снаряд «БУК-М1»
1	Діоксид азоту, NO _x	0,0014	0,540/0,400/0,070	0,000756/0,00056/0,000098
2	Сірчистий ангідрид, SO _x	0,000013	0,540/0,400/0,070	0,000007/0,0000052/0,0000009
3	Вуглецю діоксид, CO ₂	3,449	0,540/0,400/0,070	1,86246/1,3796/0,24143
4	Вуглецю оксид, CO	0,0063	0,540/0,400/0,070	0,0034/0,00252/0,000441
5	Тверді речовини, ОКВЧ+PM10+PM2,5 (сажа)	0,0026	0,540/0,400/0,070	0,001404/0,00104/0,000182

Різницю між середньою температурою повітря на поверхні горіння та найвужчому перерізі теплового конвективного струменя, що підіймається вгору, а також середню швидкість піднімання теплового забрудненого повітря знаходимо з формулами конвективної теплопередачі.

Середня температура в перехідному перерізі конвективного струменя знаходиться за формулою:

$$\Delta t_{\text{уср}} = \frac{41 \cdot Q_s^{\frac{2}{5}}}{(y-y_0)^{\frac{3}{5}}} \text{ град.} \quad (2)$$

Середню по площі швидкість теплового повітря, яке підіймається вгору, знаходимо за формулою:

$$V_y = 0.56 \left(\frac{Q_s}{y-y_0} \right)^{0.33}, \quad (3)$$

де: $y - y_0$ – відстань від поверхні землі до шуканого перерізу конвективного вертикального струменя, м.

Приймаючи діаметр воронки вибуху (або площі горіння) приблизно 20 м (D), висоту конвективного струменя приблизно 100 м, шуканий переріз вертикального конвективного струменя буде приблизно $3D = 60$ м для ракети типу «Калібр» і 30 м – для зенітної ракети середньої дальності «БУК-М1».

Відповідно для крилатої ракети типу «Калібр» дані швидкості складають $V_y = 18,99$ м/с; ракети типу Х – 101 $V_y = 17,03$ м/с; зенітної ракети середньої дальності «БУК-М1» $V_y = 6,86$ м/с.

Концентрація забруднюючих речовин від вибуху в найвужчому перерізі забрудненого струменя представлена в табл. 2.

Таблиця 2. Концентрація забруднюючих речовин в конвективному струмені вибуху від крилатої ракети «Калібр», ракети Х-101 і снаряду «БУК-М1» на відстані 60 м і 30 м від поверхні землі в залежності від типу снаряду

№	Забруднююча речовина	Викид, Мв, г Крилата ракета «Калібр»/Х-101/ снаряд «БУК-М1»	Витрата у верхньому струмені, м ³ /с Крилата ракета «Калібр»/снаряд «БУК-М1»	Концентрація викиду С _x , мг/м ³ ; Крилата ракета «Калібр»/снаряд «БУК-М1»	ГДК макс./раз./ ГДК _{серед.} доб., мг/м ³
1	Діоксид азоту, NO _x	756/560/98	5962,86/ 5347,42/ 251,985	126,78/ 104,72/38,8	0,2/0,04
2	Сірчистий ангідрид, SO _x	7/5,2/0,9	5962,86/ 5347,42/ 251,985	1,17/0,972/ 3,57	0,5/0,005
3	Вуглецю діоксид, CO ₂	1862460/ 1379600/ 241430	5962,86/ 5347,42/ 251,985	312430/ 257990/ 958110	-/-
4	Вуглецю оксид, CO	3400/2520/ 441	5962,86/ 5347,42/ 251,985	570,1/471,2/ 1750	5/3
5	Тверді речовини, ОКВЧ+PM10+ PM2,5 (сажа)	1404/1040/ 182	5962,86/ 5347,42/ 251,985	235,45/ 194,48/722,0	0,5/0,15 (-/- + 0,5/0,15 + +0,15/0,05)

На основі даного підходу до визначення концентрацій забруднюючих речовин у верхній частині конвективного забрудненого теплового струменя від вибуху, можна вирішувати також низку задач, в тому числі і тих, що пов'язані з впливом воєнних дій на розвиток глобальних екологічних процесів, а саме:

- визначити концентрацію кислотоутворюючих речовин у вертикальному конвективному струмені над поверхнею вибуху та частку перетворення його у кислоти при певних метеоумовах (при вирішенні задачі утворення кислотних опадів від конкретного вибуху ракети або снаряду);
- визначити концентрації парникових газів в забрудненому теплому струмені повітря та знаходити загальний викид парникових газів від серії одиночних вибухів в межах досліджуваної території;
- розраховувати емісію забруднень небезпечних речовин від конвективного струменя за аналогією з високим незатіненим джерелом за відомими методами;

- слугувати підсистемою при реалізації інтегрованої мережі екологічного моніторингу складових навколишнього середовища внаслідок бойових дій;
- здійснювати розрахунки еколого-економічних збитків від ведення бойових дій та інш.

Обговорення результатів досліджень

Для перевірки правомірності даного підходу щодо визначення забруднення атмосферного повітря від окремих вибухів внаслідок воєнних дій було зроблено розрахунок концентрацій основних забруднюючих речовин та моніторингових даних щодо якості атмосфери в м. Києві внаслідок обстрілу ракетами Х-101 території Голосіївського та Дніпровського районів м. Києва 16 грудня 2022 року (табл. 3). Концентрації забруднюючих речовин станом на зазначену дату брались з системи моніторингових спостережень по м. Києву [15], розрахунок індексу якості повітря AQI проводився за допомогою калькулятора [16].

Похибка від співставлення даних результатів розрахунку з моніторинговою системою атмосферного повітря залежить від відстані до найближчих діючих пунктів спостережень. В таблиці 3 наведено пункти спостережень в даних районах, на яких зафіксовано найбільші дані перевищення окремих речовин викиду, осереднені дані по м. Києву зазначених речовин, а також розрахункові дані на відстані 2 км від умовного місця вибуху за діючими Методичними вказівками щодо прогнозування метеорологічних умов формування рівнів забруднення повітря в містах України, КД 52.9.4.01–09 [8].

Таблиця 3. Концентрації забруднюючих речовин в атмосферному повітрі станом на 16 грудня 2022 року в м. Києві (розрахункові та осереднені по Дарницькому та Голосіївському районах)

№	Забруднююча речовина	Концентрація викиду C_x від окремої ракети Х-101, $\text{мг}/\text{м}^3$ (розрахунок)	Дані спостережень, Голосіївський район, $\text{мг}/\text{м}^3$ (Пр-т Науки) (розрахунок)	Дані спостережень, Дніпровський район, $\text{мг}/\text{м}^3$ (Дніпровське шосе) (розрахунок)	Середні значення всіх постів спостережень по м. Києву станом на 10.00 16.12.2022, $\text{мг}/\text{м}^3$	Концентрація C_x на відстані 2 км від умовного падіння окремої ракети Х-101, $\text{мг}/\text{м}^3$
1	Діоксид азоту, NO_2	104,72	55,2	41,4	47,1	65,0
2	Сірчистий ангідрид, SO_2	0,972	1,3	1,6	2,1	0,55
3	Вуглецю оксид, CO	471,2	581	466,6	710,7	292
4	$\text{PM}_{2,5} + \text{PM}_{10}$	194,48	186,9	121,5	73,2	120,7
5	AQI $\text{PM}_{2,5}$	185	184	149	103	182

Слід зазначити, що даний підхід до оцінки та прогнозування концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі в період ведення воєнних дій можна використовувати при певних умовах атмосфери, що визначають емісію забруднень та перетворень хімічних речовин в повітрі.

Висновки

Оцінку та прогнозування викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря урбанізованих територій при окремих вибухах снарядів та ракет різного типу внаслідок російської воєнної агресії можна здійснити на підставі математичної моделі гарячого конвективного струменя від поверхні вибуху з подальшим застосуванням теорії розсіювання та кінетичних перетворень в повітрі. Даний підхід дозволяє визначити формування купола забруднення над місцем вибуху в залежності від метеоумов місцевості, а також оцінити вплив емісії забруднень на навколишнє середовище та організм людини.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Belcher O., Bigger P., Neimark B., Kennelly C. (2020) Hidden carbon costs of the “everywhere war”: Logistics, geopolitical ecology, and the carbon boot-print of the US military 2020. *Journal Citation Reports (Clarivate Analytics)*, 14/85 (Geography), 65–80.
2. Бондар О.І., Улицький О.А., Єрмаков В.М. (2018) Звіт про результати вивчення екологічної ситуації на території Донецької та Луганської області. Київ, 70 с. URL: <http://dea.edu.ua/img/source/Doc/LugDon%20Obl.pdf>.
3. Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. (2022) Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*, Vol. 837. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>.
4. Honcharenko A., Voloshkina O., Kupinskyi I., Zhukova O. (2021) Modern comprehensive information system for environmental quality monitoring. *Environmental Problems*, Vol. 6 (4), 251-258.
5. Сидоренко В.Л., Азаров С.І. (2010) Оцінка ризику впливу продуктів аварії на складі боєприпасів на населення. Екологічна безпека і природокористування, вип. 5, 67–74.
6. Оцінка наслідків від вибухів різних боєприпасів на військових складах. URL: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/3_nauka/vibuhi_boiepriipasiv_.pdf.
7. Gvozdyakov D., Gubin V., Gromov A., Tanishev A., Shvab S. (2022) Numerical Estimation of the Formation Process of Anthropogenic Precipitation in the Atmosphere. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179101005>.
8. Методичні вказівки щодо прогнозування метеорологічних умов формування рівнів забруднення повітря в містах України. URL: https://meteo.gov.ua/files/content/docs/meteo_kerdoc/%D0%9A%D0%9452.9.4.01-09.pdf
9. Selegay T., Filonenko N., Shlychkov V., Lezhenin A., Lenkovskaya T. (2013) Formaldehyde pollution of the urban atmosphere and its dependence on meteorological factors. *Optics of the Atmosphere and the Ocean*, № 25 (5), 422-426.
10. Aloyan A.E. (2000) Numerical modeling of the interaction of gas species and aerosol in the atmospheric dispersive system. *Russ. J Num. Analysis Math. Modelling*, Vol. 15 (3-4), 211-224.
11. Sipakov R., Voloshkina O. (2021) Improving management of environmental risk from urbanized areas highways' air pollution (on an example of Kyiv city). Zenodo May, 4, 2021, URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4735836>.
12. Характеристики снаряду БУК-М1. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%83%D0%BA-%D0%9C1-2>.

13. Калібр (крилаті ракети). URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B1%D1%80_\(%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%96_%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%B8\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B1%D1%80_(%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%96_%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%B8)).

14. Методика розрахунку неорганізованих викидів забруднюючих речовин або суміші таких речовин внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій та/або під час дії воєнного стану та визначення розмірів завданої шкоди. Затверджено Наказом Міністерства довкілля та природних ресурсів України 13 квітня 2022 року, № 175. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-22#Text15/>.

15. Метеорологічний архів. URL: https://www.meteoblue.com/ru/%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/historyclimate/weatherarchive/%D0%9A%D0%B8%D0%B5%D0%B2_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%B8%D0%BD%D0%B0_703448?fcstlength=1m&year=2022&month=2.

16. Калькулятор індексу якості повітря. URL: https://web.archive.org/web/20120813235124/http://www.airnow.gov/index.cfm?action=resources.conc_aqi_calc.

Стаття надійшла до редакції 07.12.2022 і прийнята до друку після рецензування 07.03.2023

REFERENCES

1. Belcher, O., Bigger, P., Neimark, B., & Kennelly, C. (2020). Hidden carbon costs of the “everywhere war”: Logistics, geopolitical ecology, and the carbon boot-print of the US military 2020. *Journal Citation Reports (Clarivate Analytics)*, 14/85 (Geography), 65–80.
2. Bondar, O. I., Ulytskyi, O. A., & Ermakov, V. M. (2018). Report on the results of studying the ecological situation in Donetsk and Luhansk regions. Kyiv. Retrieved from: <http://dea.edu.ua/img/source/Doc/LugDon%20Obl.pdf>.
3. Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., & Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*, 837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>.
4. Honcharenko, A., Voloshkina, O., Kupinskyi, I., & Zhukova, O. (2021). Modern comprehensive information system for environmental quality monitoring. *Environmental Problems*, 6(4), 251-258.
5. Sydorenko, V. L., & Azarov, S. I. (2010). Assessing the risk of public exposure to the products of an ammunition depot accident. *Environmental safety and nature management*, 5, 67-74.
6. Assessment of the consequences of explosions of various ammunition at military warehouses. Retrieved from: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/3_nauka/vibuhi_boieprispasiv_.pdf.
7. Gvozdyakov, D., Gubin, V., Gromov, A., Tanishev, A., & Shvab, S. (2022). Numerical Estimation of the Formation Process of Anthropogenic Precipitation in the Atmosphere. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179101005>.
8. Methodological guidelines for forecasting meteorological conditions for the formation of air pollution levels in Ukrainian cities. Retrieved from: https://meteo.gov.ua/files/content/docs/meteo_kerdoc/%D0%9A%D0%9452.9.4.01-09.pdf.
9. Selegay, T., Filonenko, N., Shlychkov, V., Lezhenin, A., & Lenkovskaya, T. (2013). Formaldehyde pollution of the urban atmosphere and its dependence on meteorological factors. *Optics of the Atmosphere and the Ocean*, 25(5), 422-426.
10. Aloyan, A.E. (2000). Numerical modeling of the interaction of gas species and aerosol in the atmospheric dispersive system. *Russ. J Num. Analysis Math. Modelling*, 15(3-4), 211-224.
11. Sipakov, R., & Voloshkina, O. (2021). Improving management of environmental risk from urbanized areas highways' air pollution (on an example of Kyiv city). Zenodo May, 4, 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4735836>.

12. Characteristics of the BUK-M1 projectile. Retrieved from: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%83%D0%BA-%D0%9C1-2>.
13. Caliber (cruise missiles). Retrieved from: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B1%D1%80_\(%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%96_%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%B8\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B1%D1%80_(%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%96_%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%B8)).
14. Methodology for calculating unorganized emissions of polluting substances or a mixture of such substances as a result of emergency situations and/or during martial law and determining the amount of damage caused. Approved by Order of the Ministry of Environment and Natural Resources of Ukraine on April 13, 2022, No. 175. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-22#Text15/>.
15. Meteorological archive. Retrieved from: https://www.meteoblue.com/ru/%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/historyclimate/weatherarchive/%D0%9A%D0%B8%D0%B5%D0%B2_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%B8%D0%B%D0%B0_703448?fcstlength=1m&year=2022&month=2.
16. Air quality index calculator. Retrieved from: https://web.archive.org/web/20120813235124/http://www.airnow.gov/index.cfm?action=resources.conc_aqi_calc.

The article was received 07.12.2022 and was accepted after revision 07.03.2023

Гончаренко Артем Вадимович

аспірант 3-го року навчання, спеціальності 101 «Екологія», Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: Повітрофлотський проспект, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: 0000-0001-5647-1360 **e-mail:** hosting.pat@gmail.com

Сіпаков Ростислав Васильович

кандидат технічних наук, Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: Повітрофлотський проспект, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: 0000-0002-0862-5043 **e-mail:** sipakov.rv@knuba.edu.ua