

УДК 621.7.014.8; 616-003.6; 314.14; 616-005

**О. В. Березюк, д. т. н., доц.; Н. М. Гринчак, к. б. н., доц; О. В. Спрут;
В. О. Березюк**

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВПЛИВУ ВИКИДІВ ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ НА ЗАХВОРЮВАНІСТЬ ХВОРОБАМИ СИСТЕМИ КРОВООБІГУ

Об'єктом дослідження у роботі є захворюваність хворобами системи кровообігу в Україні. Всесвітня організація охорони здоров'я встановила, що дрібнодисперсні частинки впливають на більшу кількість людей у всьому світі, ніж будь-які інші забруднювачі. Забруднення повітря призводить до збільшення захворюваності та смертності у світі, а також є пріоритетним чинником ризику для здоров'я населення, при цьому понад 80 % захворювань тією чи іншою мірою залежать від якості повітря. Тому удосконалення математичної моделі впливу викидів дрібнодисперсного пилу на захворюваність хворобами системи кровообігу, яка може бути використана для прогнозування показників такої захворюваності є актуальною науково-технічною задачею.

Проведено дослідження впливу викидів дрібнодисперсного пилу на захворюваність хворобами системи кровообігу плануванням експерименту другого порядку методом Бокса-Уїлсона за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування застосовуючи розроблене програмне забезпечення, що захищене свідоцтвом на твір. Метою дослідження є удосконалення за допомогою планування багатофакторного експерименту математичної моделі впливу викидів дрібнодисперсного пилу на захворюваність хворобами системи кровообігу.

Отримано удосконалену регресійну залежність впливу викидів дрібнодисперсного пилу на захворюваність хворобами системи кровообігу. Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі можна вважати правильною з 95 %-ою достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав 0,99865, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів. Отримана регресійна залежність може бути використана під час прогнозування показників захворюваності хворобами системи кровообігу. Побудовано поверхні відгуків цільової функції – кількості випадків хвороб системи кровообігу та їхні двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наочно відобразити отриману залежність та характер одночасного впливу декількох факторів на цільову функцію.

Ключові слова: *математичне моделювання, планування експерименту, багатофакторна залежність, фактори впливу, поверхня відгуку, викиди, дрібнодисперсний пил, захворюваність, хвороби системи кровообігу.*

Вступ

В промислових регіонах забруднення атмосферного повітря становить серйозну небезпеку для навколишнього природного середовища і здоров'я населення, оскільки численні епідеміологічні дослідження виявили зв'язок між забрудненням повітря та широким спектром несприятливих впливів на здоров'я населення. Викиди пилових речовин також значно погіршують екологічний стан довкілля, викликають передчасну спрацьованість промислового обладнання та об'єктів житлово-комунального господарства [1]. З точки зору санітарно-епідеміологічного благополуччя населення особливий інтерес становлять ризики для здоров'я, пов'язані з дрібнодисперсними частинками діаметром менше 10 і 2,5 мкм, як здатні проникати глибоко в легені. Так частки діаметром менше 2,5 мкм можуть потрапляти навіть в кровотік, що в першу чергу призводить до захворювання серцево-судинної і дихальної систем [2 – 4], а також завдає шкоди іншим органам. Такі соціальні групи, як люди

похилого віку, вагітні жінки, діти та люди з захворюваннями на астму можуть мати більш серйозні наслідки для здоров'я від впливу забрудненого атмосферного повітря. Основним джерелом забруднення повітря дрібнодисперсними частинками є спалювання палива в різних секторах економіки, включаючи транспорт, енергетику, промисловість, будівництво [5 – 8], комунальне і сільське господарство, а також у побуті.

Постановка проблеми

Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) встановила, що дрібнодисперсні частинки впливають на більшу кількість людей у всьому світі, ніж будь-які інші забруднювачі, забруднення повітря призводить до збільшення захворюваності та смертності у світі, а також є пріоритетним чинником ризику для здоров'я населення, при цьому понад 80 % захворювань тією чи іншою мірою залежать від якості повітря. Тому удосконалення математичної моделі впливу викидів дрібнодисперсного пилу на захворюваність хворобами системи кровообігу, яка може бути використана для прогнозування показників такої захворюваності є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботах [9 – 11], зазначено, що одним з найнебезпечніших з усієї номенклатури забруднювальних речовин є дрібнодисперсний пил з діаметром частинок до 10 мкм. Такий пил являє собою тверді частинки, які можуть тривалий час знаходитися в завислому стані в повітрі, недостатньо ефективно вловлюється наявними апаратами очистки і поширюється в атмосфері на значні відстані [12].

Згідно із рекомендаціями ВООЗ, в країнах ЄС встановлені межі порогового впливу для дрібнодисперсного пилу діаметром менше 10 мкм. Для середньодобової концентрації не допускається перевищення порогового рівня 50 мкг/м^3 більш ніж 35 разів протягом року, середньорічна концентрація не повинна перевищувати рівня в 40 мкг/м^3 [13]. Однак в країнах Східної Європи, Кавказу та Центральної Азії моніторинг зважених часток з діаметром менше 10 мкм дуже обмежений: лише невелика кількість станцій моніторингу наявна у Білорусі та Узбекистані (Ташкент, Нукус), а в Україні, взагалі – не існують [14].

В атмосферному повітрі населених пунктів знаходяться великі обсяги дрібнодисперсного пилу, що складається з сажі, цементної крихти та інших дрібнодисперсних частинок. Дрібнодисперсний пил чинить подразнюючу, фіброгенну, алергенну та токсичну дію на організм людини. Характер впливу залежить від фізико-хімічних властивостей часток пилу таких, як форма, розчинність, ступінь твердості, хімічний склад. Хімічну активність по відношенню до організму людини визначає питома поверхня пилу [15].

В статті [1] розглядаються основні джерела забруднення атмосферного повітря, вплив шкідливих викидів на здоров'я населення та результати експериментальних досліджень розроблених пиловловлювачів. Зазначено, що комплексне розв'язання еколого-гігієнічних проблем дозволить цілеспрямовано керувати оздоровленням довкілля та зміцненням здоров'я населення.

Негативний вплив пилу можуть посилювати переохолодження, важка фізична праця, деякі гази, тощо. Дрібнодисперсні частинки порівняно легко проходять крізь фізіологічні фільтри людини та потрапляють у легені, де вони всмоктуються у кров. Пил відкладається на стінках судин і в сполучних тканинах навколо них. Звуження судин та погіршення циркуляції крові в організмі призводить до порушення нормальної роботи системи кровообігу людини [16, 17].

Самі по собі токсичні дрібнодисперсні пилові викиди під дією сонячних променів і озону можуть утворювати в атмосфері нові, ще більш токсичні сполуки. При цьому атмосферна турбулентність і вітер не завжди встигають видаляти з повітряного басейну підприємств

зростаючі в зв'язку з інтенсифікацією виробництва пилові викиди [18].

В роботі [19] визначено регресійну гіперболічну залежність концентрації бенз[а]пірену в ґрунтах полігону твердих побутових відходів (ТПВ) від глибини вимірювання, за допомогою якої визначено, що небезпечна глибина хімічного забруднення бенз[а]піреном ґрунтів полігону твердих побутових відходів складає 152 мм. В матеріалах статті [20] запропоновано регресійну залежність концентрації нафтопродуктів в ґрунтах від відстані до полігону ТПВ, яка дала змогу визначити, що безпечна відстань розміщення полігонів ТПВ від земель сільськогосподарського призначення за показником рівня хімічного забруднення ґрунтів нафтопродуктами складає 66 м. В роботі [21] визначено регресійну залежність концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону ТПВ, за допомогою якої визначено, що відстань від полігона ТПВ, на якій забруднення ґрунту свинцем не перевищує фоновий рівень (межа зони слабкого забруднення), складає 526 м.

Матеріали статті [22] присвячені визначенню регресійних степеневих залежностей поширеності хвороб різних класів у дорослого населення населених пунктів, прилеглих до місця видалення ТПВ від відстані до полігона, які використані для визначення безпечної відстані розміщення полігонів ТПВ від населених пунктів за показниками поширеності патології органів дихання та хвороб системи кровообігу.

В роботі [23] математично доведено негативний вплив дрібнодисперсного пилу в атмосферному повітрі на стан здоров'я людини, а також встановлено, що серед видів пилу який надходить в атмосферне повітря від антропогенних джерел викидів, найбільш небезпечним видом пилу для людини є пил, що містить тверді частинки розміром від 2,5 до 10 мкм. Запропоновано такі двофакторні лінійні математичні моделі захворюваності хворобами системи кровообігу, кожна з яких враховує вплив викидів дрібнодисперсного пилу лише загального обсягу або лише певної дисперсності:

$$Y = -47,4665 + 0,02318N + 104,6041X_1; \quad (1)$$

$$Y = 1864,977 - 0,01372N + 364,5516X_2; \quad (2)$$

$$Y = -3477,74 + 0,1188N + 394,5634X_3, \quad (3)$$

де Y – кількість випадків захворювань, осіб; N – загальна чисельність населення в країні, осіб; X_1 – загальні обсяги викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферне повітря, кг/особу; X_2 – обсяги викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферне повітря розміром 2,5...10 мкм, кг/особу; X_3 – обсяги викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферне повітря розміром менше 2,5 мкм, кг/особу.

При цьому коефіцієнт детермінації R^2 для залежностей (1 – 3) склав 0,9248; 0,9365; 0,8022, відповідно, що при використанні їх для прогнозування захворюваності хворобами системи кровообігу призводить до значних похибок, а тому ці математичні моделі, на наш погляд, потребують удосконалення.

Нелінійних математичних моделей одночасного впливу викидів дрібнодисперсного пилу різних груп дисперсності з ефектами взаємодії на захворюваність хворобами системи кровообігу, в результаті аналізу відомих публікацій, авторами не виявлено.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є удосконалення за допомогою планування багатofакторного експерименту математичної моделі впливу викидів дрібнодисперсного пилу на захворюваність хворобами системи кровообігу.

Методи і матеріали

Удосконалення математичної моделі впливу викидів дрібнодисперсного пилу на

захворюваність хворобами системи кровообігу проводилось за допомогою ротатабельного центрального композиційного планування експерименту другого порядку методом Бокса-Уілсона [24, 25]. Визначення коефіцієнтів рівняння регресії здійснювалась за допомогою розробленої комп'ютерної програми "PlanExp", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [26] і детально описана в роботі [27].

Результати досліджень

Серед параметрів, від яких залежить захворюваність хворобами системи кровообігу, розглядалися такі: загальна чисельність населення в країні, обсяги викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферне повітря, значення яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Захворюваність хворобами системи кровообігу в залежності від загальної чисельності населення в країні та обсягів викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферне повітря [23]

Рік	Зареєстровано випадків хвороб системи кровообігу, тис. випадків	Фактори впливу		
		Чисельність населення, тис. осіб	Обсяги викидів твердих частинок, кг/особу	
			2,5...10 мкм	менше 2,5 мкм
2012	2390	45633,6	2,910	0,889
2013	2346	45553	3,118	0,927
2014	2318	45426,2	2,966	0,757
2015	2256	42929,3	2,767	0,597
2016	1880	42760,5	1,971	0,559
2017	1844	42584,5	1,588	0,461
2018	1826	42386,4	1,717	0,801
2019	1781	42153,2	1,104	0,319

За даними табл. 1 отримано рівняння регресії, яке описує захворюваність хворобами системи кровообігу від основних параметрів впливу і виглядає так:

$$B_{x_6} = 1,088N + 14491m_2 - 280m_3 - 0,3801Nm_2 - 237,1m_2m_3 + 494m_2^2 + 753,9m_3^2 - 42900, \quad (4)$$

де B_{x_6} – кількість випадків хвороб системи кровообігу, осіб; N – загальна чисельність населення в країні, осіб; m_2 – обсяги викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферне повітря розміром 2,5...10 мкм, кг/особу; m_3 – обсяги викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферне повітря розміром менше 2,5 мкм, кг/особу.

За критерієм Стьюдента виявлено: усі фактори, їхні парні ефекти взаємодії, крім Nm_3 , та квадратичні ефекти, крім N^2 , виявились значимими; кількість випадків хвороб системи кровообігу більше залежить від обсягів викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферне повітря розміром 2,5...10 мкм ніж від викидів – розміром менше 2,5 мкм, що співпадає з висновками авторів роботи [23].

Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність регресійної моделі (4) можна вважати правильною з 95 %-ою достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав 0,99865, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів.

Порівняння фактичної та теоретичної кількості випадків хвороб системи кровообігу, змодельованої за допомогою математичних моделей (1 – 4), наведено на рис. 1.

З рис. 1 видно, що теоретична поширеність кількості випадків хвороб системи кровообігу, розрахована за допомогою регресійної моделі (4), несуттєво відрізняються від фактичних даних [23], що підтверджує визначену раніше достатню достовірність отриманої залежності, яка може бути використана для прогнозування показників такої захворюваності. Крім того, удосконалена математична модель (4) з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9973$ дозволяє більш

точно прогнозувати кількість випадків хвороб системи кровообігу порівняно з відомими моделями (1 – 3), отриманими авторами роботи [23], для яких R^2 складає 0,9248; 0,9365; 0,8022, відповідно.

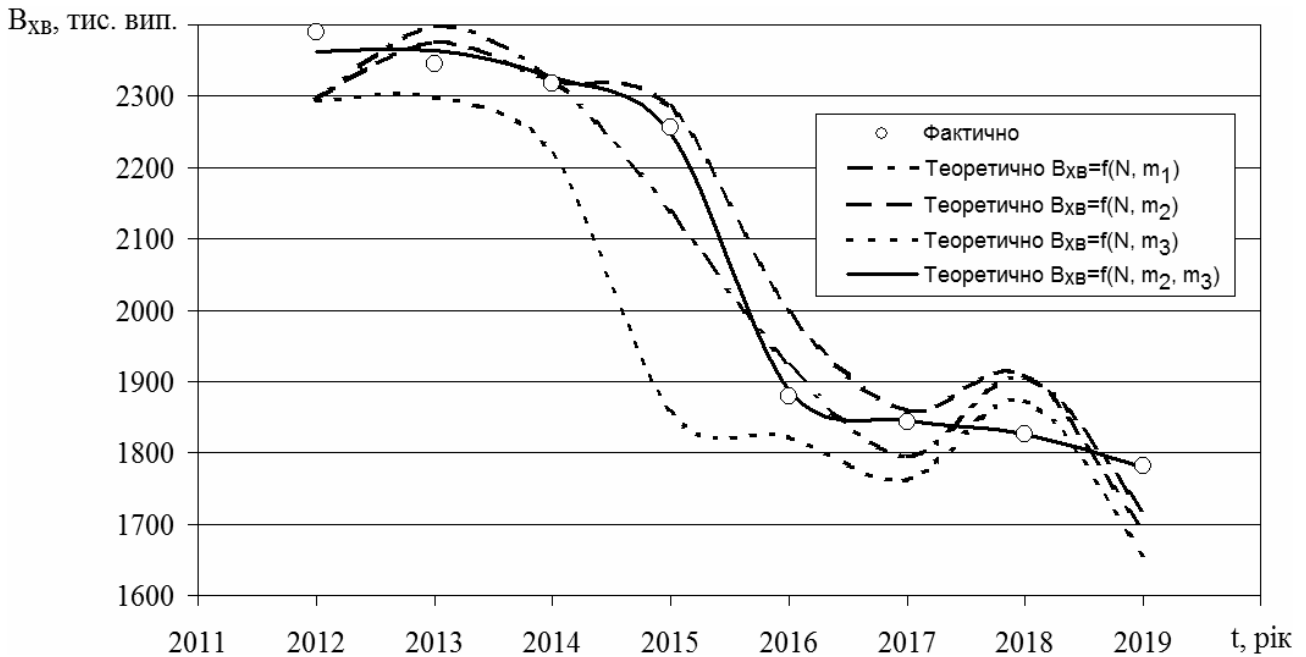


Рис. 1. Порівняння фактичної та теоретичної кількості випадків хвороб системи кровообігу, змодельованої за допомогою відомих (1 – 3) та удосконаленої (4) математичних моделей

На рис. 2 показано поверхні відгуків цільової функції – кількості випадків хвороб системи кровообігу та їхні двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наочно відобразити залежність (4) та характер одночасного впливу декількох факторів на цільову функцію.

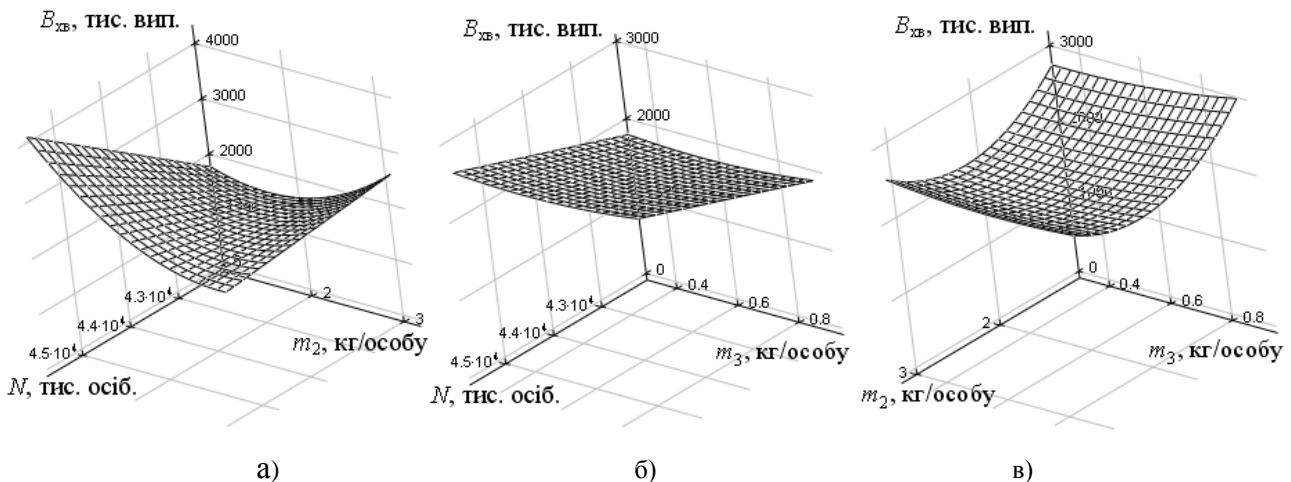


Рис. 2. Поверхні відгуків цільової функції – кількості випадків хвороб системи кровообігу та їхні двомірні перерізи в площинах параметрів впливу: а) – $B_{xв} = f(N, m_2)$; б) – $B_{xв} = f(N, m_3)$; в) – $B_{xв} = f(m_2, m_3)$

Висновки

Отримано удосконалену адекватну математичну модель другого порядку з ефектами взаємодії першого порядку впливу викидів дрібнодисперсного пилу на захворюваність хворобами системи кровообігу, яка дозволяє більш точно прогнозувати кількість випадків хвороб системи кровообігу порівняно з відомими моделями та може бути використана для

прогнозування показників такої захворюваності.

Побудовано поверхні відгуків цільової функції – кількості випадків хвороб системи кровообігу, які дозволяють наочно проілюструвати залежність цієї цільової функції від окремих параметрів впливу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Батлук В. А. Рівень забруднення атмосферного повітря та його вплив на стан здоров'я населення України / В. А. Батлук, К. І. Азарський // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування : збірник наукових праць. – 2010. – № 52. – С. 205 – 210.
2. Шевчук Т. І. Антропогенна зміна довкілля як фактор поширення паразитарних захворювань людини / Т. І. Шевчук, В. М. Шкарупа, С. С. Хлестова // Довкілля і здоров'я : Матеріали наук.-практ. конф., Тернопіль, 27-28 квіт. 2017 р. – Тернопіль, 2017. – С. 220 – 222.
3. Чорна В. В. Показники захворюваності і поширеності та сучасні погляди на профілактику хвороб / В. В. Чорна, С. С. Хлестова, Н. І. Гуменюк // Вісник Вінницького національного медичного університету. – 2020. – Т. 24, № 1. – С. 158 – 164.
4. Піскун Р. П. Функціональна морфологія головного мозку при атеросклерозі в експерименті та під впливом вінпоцетину / Р. П. Піскун, С. М. Горбатюк // Таврический медико-биологический вестник. – 2006. – Т. 9. – № 3. – С. 100 – 113.
5. Лемешев М. С. Теоретичні передумови підвищення довговічності електропровідних бетонів / М. С. Лемешев // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – Рівне : УДАВГ, 1996. – С. 35.
6. Очеретний В. П. Вплив мінеральних мікронаповнювачів на властивості поризованих сухих будівельних сумішей / В. П. Очеретний, В. П. Ковальський, А. В. Бондар // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: «Будівництво». – 2014. – Випуск 10 (18). – С. 44 – 47.
7. Лемешев М. С. Формування структури електропровідного бетону під впливом електричного струму / М. С. Лемешев // Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві : Науково-технічний збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця. – 2006. – С. 36 – 41.
8. Очеретний В. П. Нове в технології виробництва цементно-карбонатних будівельних виробів з використанням промислових відходів / В. П. Очеретний, В. П. Ковальський, М. П. Машницький // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2008. – № 5. – С. 33 – 36.
9. A new classification of aerosol sources and types as measured over Jaipur, India / S. Verma, D. Prakash, P. Ricaud [et al.] // Aerosol and Air Quality Research. – 2015. – Vol. 15. – P. 985 - 993.
10. Аэрозоли – дисперсные системы : монография / [И. С. Чекман, А. О. Сыровая, С. В. Андреева, В. А. Макаров]. – X : Цифрова друкарня №1. – 2013. – 100 с.
11. Chemical characteristics of aerosols in coastal and urban ambient atmospheres / K. Lee, J. Park, M. Kang [et al.] // Aerosol and Air Quality Research. – 2017. – Vol. 17. – P. 908 - 919.
12. Cheng M.-D. Classification of Volatile Engine Particles / M.-D. Cheng // Aerosol and Air Quality Research. – 2013. – Vol. 13. – P. 1411 – 1422.
13. Молодець Ю. А. Дослідження питання щодо нормування дрібнодисперсного пилу в гірничовидобувній промисловості / Ю. А. Молодець // Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки. – 2017. – С. 154 – 157.
14. Давиденко Г. М. Гігієнічна оцінка небезпеки здоров'ю населення від забруднення атмосферного повітря зваженими частками пилу : дис. канд. біол. наук : 14.02.01 / Давиденко Ганна Миколаївна. – Київ, 2017. – 147 с.
15. Influence of sea breeze circulation and road traffic emissions on the relationship between particle number, black carbon, PM1, PM2.5 and PM2.5–10 concentrations in a coastal city // S. Rodriguez, E. Cuevas, Y. Gonzalez [et al.] // Atmospheric Environment. – 2008. – Vol. 42. – P. 6523 – 6534.
16. Urban pollution in the Danube and Western Balkans regions: the impact of major PM2.5 sources / C. A. Belis, E. Pisoni, B. Degraeuwe [et al.] // Environment International. – 2019. – Vol. 133. – P. 105 – 158.
17. Evolution of air pollution source contributions over one decade, derived by PM10 and PM2.5 source apportionment in two metropolitan urban areas in Greece / E. Diapouli, M. Manousakas, S. Vratolis [et al.] // Atmospheric Environment. – 2017. – Vol. 164. – P. 416-430.
18. Investigating the contribution of shipping emissions to atmospheric PM2.5 using a combined source apportionment approach / J. L. Lang, Y. Zhou, D. S. Chen [et al.] // Environmental Pollution. – 2017. – Vol. 229. – P. 557 – 566.
19. Використання методу регресійного аналізу при визначенні концентрації бенз[а]пірену в ґрунтах полігонів твердих побутових відходів / О. В. Березюк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2022. – № 1. – Режим доступу до журналу : <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/649/609>.

20. Регресійний аналіз концентрації нафтопродуктів в ґрунтах полігонів твердих побутових відходів / О. В. Березюк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2022. – № 3. – Режим доступу до журналу : <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/658/622>.
21. Регресійний аналіз концентрації свинцю в ґрунтах на відстані від полігонів твердих побутових відходів / О. В. Березюк, М. С. Лемешев, І. Н. Дудар // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2022. – № 4. – Режим доступу до журналу : <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/665/627>.
22. Залежність поширеності хвороб від відстані між населеним пунктом і полігоном твердих побутових відходів / О. В. Березюк, С. М. Горбатюк, Л. Л. Березюк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2020. – № 4. – Режим доступу до журналу : <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/618/580>.
23. Математично-статистичне дослідження впливу дрібнодисперсних твердих забруднюючих речовин на здоров'я людини / І. С. Козій, І. О. Рой, О. М. Яхненко [та ін.] // Техногенно-екологічна безпека. – 2021. – № 10 (2). – С. 23 – 27.
24. Andersson O. Experiment!: planning, implementing and interpreting / O. Andersson. – John Wiley & Sons, 2012. – 288 p.
25. Березюк О. В. Планування багатофакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів / О. В. Березюк // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 3 (55). – С. 92 – 97.
26. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Планування експерименту" ("PlanExp") / О. В. Березюк // Свідчення про реєстрацію авторського права на твір № 46876. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 21.12.2012.
27. Березюк О. В. Моделювання компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттєвозі на основі комп'ютерної програми "PlanExp" / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 6. – С. 23 – 28.

Стаття надійшла до редакції 06.03.2023.

Стаття пройшла рецензування 20.03.2023.

Березюк Олег Володимирович – д. т. н., доцент, професор кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки.

Вінницький національний технічний університет.

Гринчак Наталія Миколаївна – к. б. н., доцент, доцент кафедри медичної біології.

Спрут Ольга Володимирівна – старший викладач кафедри медичної біології.

Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова.

Березюк Віолетта Олегівна – студентка групи БП-22б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

Вінницький національний технічний університет.