

О. В. Березюк¹
 М. С. Лемешев¹
 С. В. Королевська¹

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСЯГІВ ПРОДУКУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ В РІЗНИХ КРАЇНАХ СВІТУ

¹Вінницький національний технічний університет

Будівельні відходи можуть широко використовуватись у будівництві: як наповнювач та в'язуче для виробництва бетонів, сухих будівельних сумішей та інших будівельних матеріалів, для виробництва будівельних матеріалів із захисними властивостями тощо. Проведено дослідження обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу, використовуючи планування експерименту другого порядку методом Бокса–Уїлсона за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування, застосовуючи розроблене програмне забезпечення, захищене свідоцтвом на твір. Метою дослідження є визначення за допомогою планування експерименту регресійної моделі прогнозування обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу. Отримано регресійну залежність прогнозування обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу: щільність населення країни, величина валового внутрішнього продукту на душу населення, індекс розвитку людського потенціалу, середня географічна широта країни. Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі можна вважати правильною з 95 %-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав 0,99475, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів. Отримана регресійна залежність може бути використана під час розробки стратегії поводження з будівельними відходами. Встановлено, що серед факторів впливу, які розглядалися, найбільше на обсяги продукування будівельних відходів впливає величина валового внутрішнього продукту на душу населення, а найменше — індекс розвитку людського потенціалу. Побудовано поверхні відгуків цільової функції — обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу та їхні двомірні перерізи в площинах параметрів впливу.

Ключові слова: математичне моделювання, планування експерименту, прогнозування обсягів, будівельні відходи.

Вступ

Разом з проблемою твердих побутових відходів [1]—[7] важливою є проблема будівельних відходів, щорічний обсяг яких в Україні за даними Міністерства охорони навколишнього середовища складає майже 1 млн т. Щорічний приріст площ, зайнятих відходами, складає 50 тис. га [8]. Будівельні відходи можуть бути широко застосовані у будівництві для одержання таких цінних матеріалів: як наповнювач [9] та в'язуче [10]—[12] для виробництва бетонів, сухих будівельних сумішей та інших будівельних матеріалів [13], [14], для виробництва будівельних матеріалів із захисними властивостями від електромагнітних випромінювань [15], [16] та статичної електрики [17], для виготовлення анодних заземлювачів [18]. Багато мінеральних та органічних відходів за своїм хімічним складом і технічними властивостями близькі до природної сировини. Перспективними також є використання дрібнодисперсних відходів металообробки для мінімізації об'ємів іммобілізованих рідких радіоактивних відходів [19]. У світовій практиці близько 90 % відходів будівництва підлягають переробці та повторному використанню. Тому прогнозування обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу з метою розробки стратегії поводження з будівельними відходами є актуальною науково-технічною задачею.

Шламосолокарбонатний прес-бетон, запропонований в роботі [9], складається з відходів камерізації карбонатних порід, золи-виносу Ладижинської ТЕС, червоного шламу Миколаївського

глиноземного заводу з додаванням портландцементу. В роботі [10] показано, що створення нових будівельних матеріалів поліфункціонального призначення дозволяє вирішити актуальну для України проблему енерго- та ресурсозбереження. Основним шляхом утилізації червоного шламу у виробництві будівельних матеріалів є його використання як модифікуючої домішки до золоцементного в'язучого [11]. В роботі [12] запропоновано металозолофосфатне в'язуче на основі відходів промисловості. Техніко-економічну доцільність ширшого використання відходів ТЕС у виробництві цементу та інших будівельних матеріалів показано в роботі [13]. В статті [14] показано, що отримання бетонного щебеню, дрібнозернистих відсівів та їх повторне використання є заключною стадією замкненого циклу переробки бетонних і залізобетонних відходів — «зношення—вивезення—переробка—реалізація». Застосування бетел-м (бетон електропровідний металонасичений, який використовується для спеціального покриття біологічного захисту від іонізуючих випромінювань всередині приміщень будівель і споруд) комірчастої, варіотропної і щільної структури дає можливість знизити рівень електромагнітних випромінювань і тим самим знизити небезпеку випромінювань [15]. Доцільність застосування дрібнодисперсних порошоків шламів сталі ШХ-15 для виготовлення спеціального захисного покриття від електромагнітних випромінювань обґрунтовано в статті [16]. В роботі [17] запропоновано використовувати для боротьби з зарядами статичної електрики покриття з електропровідного бетону, технологія виготовлення якого досить проста і не потребує дорогих матеріалів і спеціального устаткування. Бетел-м може використовуватись для виготовлення електропровідних елементів (анодних заземлювачів) систем антикорозійного катодного захисту підземних інженерних мереж [18]. Доцільність проведення робіт з розробки нового виду матричних матеріалів на основі бетелу-м для іммобілізації рідких токсичних відходів обґрунтовано в статті [19]. В роботі [20] наведено статистичні дані щодо обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу. В статті [21] визначено регресійну залежність, що описує динаміку утворення маси відходів будівництва і знесення у Вінницькій області та дозволяє прогнозувати обсяг утворення цих відходів. Однак конкретних математичних залежностей обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу, в результаті аналізу відомих публікацій, авторами не виявлено.

Метою дослідження є визначення за допомогою планування експерименту регресійної моделі прогнозування обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу.

Результати досліджень

Серед параметрів, від яких залежать обсяги продукування будівельних відходів в різних країнах світу, розглядалися такі: щільність населення країни, величина валового внутрішнього продукту (ВВП) на душу населення, індекс розвитку людського потенціалу, середня географічна широта країни, значення яких наведено в таблиці. На відміну від абсолютних параметрів, відносні дозволяють порівнювати країни з різними рівнями розвитку економіки та людського потенціалу, кількістю населення, площами території та кліматичними умовами.

За даними таблиці, використовуючи планування експерименту за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування другого порядку, застосовуючи розроблене програмне забезпечення, захищене свідоцтвом на твір [22] і детально описане в роботі [23], отримано рівняння регресії, яке визначає залежність обсягу продукування будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу і виглядає так:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{БВ}} = & 437,8 \frac{\text{ВВП}}{n_n} - 37,85 \frac{n_n}{S_{\text{кр}}} - 2093 \text{ІРЛП} + 128,3 \text{Ш} - 0,02982 \frac{n_n}{S_{\text{кр}}} \frac{\text{ВВП}}{n_n} + \\
 & + 39,29 \frac{n_n}{S_{\text{кр}}} \text{ІРЛП} - 446,4 \frac{\text{ВВП}}{n_n} \text{ІРЛП} - 1,082 \frac{\text{ВВП}}{n_n} \text{Ш} + 151,8 \text{ІРЛП} \cdot \text{Ш} + \\
 & + 0,004265 \left(\frac{n_n}{S_{\text{кр}}} \right)^2 + 0,5797 \left(\frac{\text{ВВП}}{n_n} \right)^2 + 597,1 \text{ІРЛП}^2 - 2,283 \text{Ш}^2 - 5106,
 \end{aligned} \quad (1)$$

де $m_{\text{БВ}}$ — маса будівельних відходів на душу населення, кг/особу; $n_n/S_{\text{кр}}$ — щільність населення, осіб/км²; $\text{ВВП}/n_n$ — ВВП на душу населення, тис. \$/осіб; n_n — кількість населення країни, осіб; $S_{\text{кр}}$ — площа території країни, км²; ІРЛП — індекс розвитку людського потенціалу ($\text{ІРЛП} = 0 \dots 1$); Ш — середня географічна широта, ° пн. ш.

Обсяги продукування будівельних відходів в різних країнах світу [20]

Країна	Маса будівельних відходів на душу населення, кг/особу	Фактори впливу			
		Щільність населення, осіб/км ²	ВВП на душу населення, тис. \$/осіб	Індекс розвитку людського потенціалу	Середня широта, пн. ш.
США	374,771	31	46,954	0,95	36,94
Великобританія	450,113	247	46,432	0,942	55,38
Корея	311,688	480	20,582	0,928	38,06
Італія	331,345	199,4	39,565	0,945	41,28
Іспанія	276,949	79,7	35,557	0,949	39,5
Нідерланди	636,574	394	51,657	0,958	52,15
Канада	266,028	3,27	34,273	0,967	62,39
Бельгія	610,82	318	29,814	0,948	50,83
Португалія	291,829	114	22,232	0,795	39,69
Данія	516,707	126,4	34,7	0,952	56,18
Греція	186,567	85,3	30,661	0,947	39
Швеція	195,503	21,9	55,427	0,958	62,2
Норвегія	281,532	12	72,306	0,968	62
Фінляндія	181,225	16	36,217	0,954	64,8
Україна	22,3023	76	7,532	0,786	48,38

За критерієм Стьюдента виявлено: усі фактори, їхні парні ефекти взаємодії, крім $n_i/S_{крIII}$, та квадратичні ефекти виявились значимими, найбільше обсяги продукування будівельних відходів в різних країнах світу залежать від ВВП на душу населення, а найменше — від індексу розвитку людського потенціалу.

Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність регресійної моделі (1) можна вважати правильною з 95 %-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав 0,99475, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів.

Порівняння фактичних та теоретичних обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу, ранжованих в порядку спадання, показано на рис. 1.

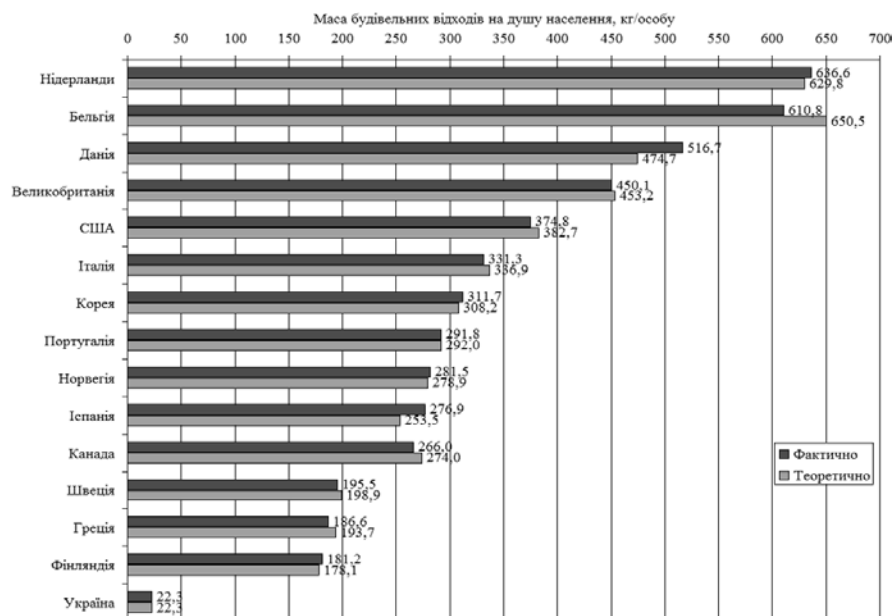


Рис. 1. Порівняння фактичних та теоретичних обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу

З рис. 1 випливає, що теоретичні обсяги продукування будівельних відходів в різних країнах світу, розраховані за допомогою регресійної моделі (1), несуттєво відрізняються від фактичних даних, що підтверджує визначену раніше достатню достовірність отриманої залежності, яка може бути використана під час розробки стратегії поводження з будівельними відходами.

На рис. 2 показано поверхні відгуків цільової функції — обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу та їх двовірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наочно відобразити залежність (1) та характер одночасного впливу декількох факторів на цільову функцію.

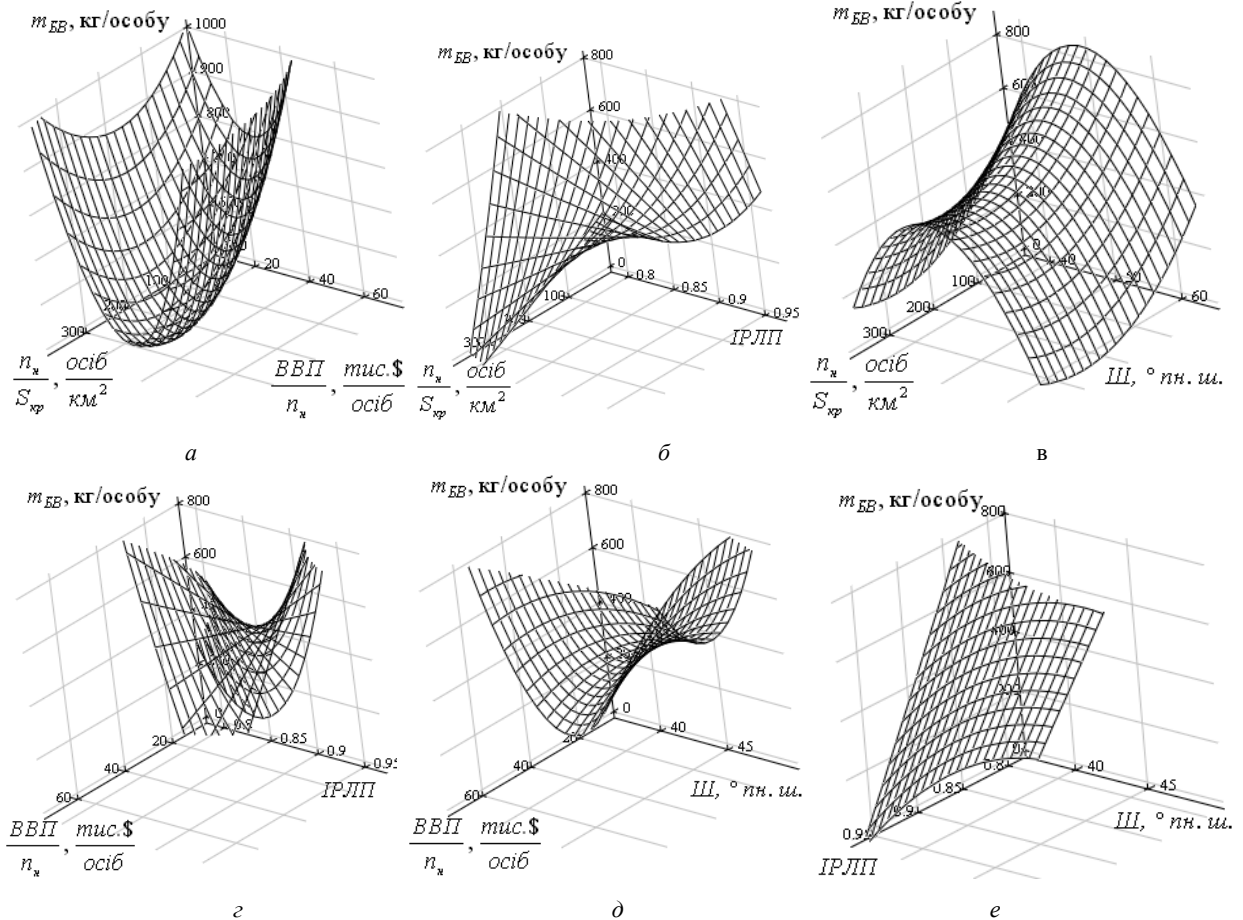


Рис. 2. Поверхні відгуків цільової функції — обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу та їх двовірні перерізи в площинах параметрів впливу: а — $m_{\text{БВ}} = f(n_n/S_{\text{кр}}, \text{ВВП}/n_n)$; б — $m_{\text{БВ}} = f(n_n/S_{\text{кр}}, \text{ІРЛП})$; в — $m_{\text{БВ}} = f(n_n/S_{\text{кр}}, \text{Ш})$; г — $m_{\text{БВ}} = f(\text{ВВП}/n_n, \text{ІРЛП})$; д — $m_{\text{БВ}} = f(\text{ВВП}/n_n, \text{Ш})$; е — $m_{\text{БВ}} = f(\text{ІРЛП}, \text{Ш})$.

Висновки

1. Встановлено, що на обсяги продукування будівельних відходів в різних країнах світу впливають такі фактори: щільність населення країни, середня географічна широта країни, величина валового внутрішнього продукту на душу населення, індекс розвитку людського потенціалу. При цьому, найбільше на обсяги продукування будівельних відходів впливає величина валового внутрішнього продукту на душу населення, а найменше — індекс розвитку людського потенціалу.

2. Отримано адекватну математичну модель прогнозування обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу, яка може бути використана під час розробки стратегії поводження з будівельними відходами.

3. Побудовано поверхні відгуків цільової функції — обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу, які дозволяють наочно проілюструвати залежність цієї цільової функції від окремих параметрів впливу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] O. V. Bereziuk, M. S. Lemeshev, V. V. Bohachuk, and M. Duk, «Means for measuring relative humidity of municipal solid wastes based on the microcontroller Arduino UNO R3», *Proc. SPIE, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2018*, vol. 10808, no. 108083G, 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2501557>.

[2] В. В. Попович, О. В. Придатко, М. І. Сичевський, Н. П. Попович, і М. А. Панасюк, «Ефективність експлуатації сміттєвозів у середовищі "місто–сміттєзвалище"», *Науковий вісник НЛТУ України*, т. 27, № 10, с. 111-116, 2017.

- [3] O. Berezyuk, and V. Savulyak, «Approximated mathematical model of hydraulic drive of container upturning during loading of solid domestic wastes into a dustcart.» *Technical Sciences*, no. 20 (3), pp. 259-273, 2017.
- [4] В. І. Савуляк, та О. В. Березюк, *Технічне забезпечення збирання, перевезення та підготовки до переробки твердих побутових відходів*, моногр., Вінниця: ВНТУ, 2006, 217 с.
- [5] О. А. Сагдєєва, Г. В. Крусір, і А. Л. Цикало, «Оцінка рівня екологічної небезпеки звалищ твердих муніципальних відходів.» *Екологічна безпека*, № 1, с. 75-83, 2018.
- [6] O. Bereziuk, M. Lemeshev, V. Bogachuk, W. Wójcik, K. Nurseitova, and A. Bugubayeva, «Ultrasonic microcontroller device for distance measuring between dustcart and container of municipal solid wastes.» *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 4, pp. 146-150, 2019, <http://dx.doi.org/10.15199/48.2019.04.26>.
- [7] O. V. Berezyuk, and V. I. Savulyak, «Dynamics of hydraulic drive of hanging sweeping equipment of dust-cart with extended functional possibilities.» *TEHNOMUS – New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*, no. 22, pp. 345-351, 2015.
- [8] І. В. Коц, і О. В. Березюк, «Вібраційний гідропривод для пресування промислових відходів.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 146-149, 2006.
- [9] В. П. Ковальський, і А. В. Бондарь, «Шламозолокарбонатий прес-бетон на основі відходів промисловості.» на *XXIV Міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*, Харків, 2015, с. 209.
- [10] М. С. Лемешев, «В'яжучі з використанням промислових відходів Вінниччини.» на *XXIV Міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*, Харків, 2016, с. 381.
- [11] В. П. Ковальський, В. П. Очеретний, М. С. Лемешев, і А. В. Бондар, «Обґрунтування доцільності використання золошламового в'яжучого для приготування сухих будівельних сумішей.» *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, вип. 26, с. 186-193, 2013.
- [12] М. С. Лемешев, «В'яжуче на основі промислових відходів.» на *Международ. науч.-практ. Интернет-конф. Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2017*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/18481/statya_doclad_oct%20.doc.
- [13] В. П. Ковальський, і О. С. Сідлак, «Використання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах.» *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві*, № 1 (16), с. 35-40, 2014.
- [14] О. Р. Попович, Я. М. Захарко, і М. С. Мальований, «Проблеми утилізації та переробки будівельних відходів.» *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, вип. 755, с. 321-324, 2013.
- [15] М. С. Лемешев, і А. В. Христин, «Электротехнические материалы для защиты от электромагнитного загрязнения окружающей среды.» на *4-й Международ. науч.-практ. конф. Инновационное развитие территорий*, Череповец, 2016, с. 78-83.
- [16] М. С. Лемешев, «Металлонасыщенные бетоны для защиты от электромагнитного излучения.» *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, № 33, с. 253-256, 2013.
- [17] М. С. Лемешев, «Электропроводні бетоны для захисту від статичної електрики.» на *наук. симпоз. Перспективні досягнення сучасних вчених*, Одеса, 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.sworld.education/index.php/ru/c217-14/29403-%D1%81217-032>.
- [18] М. С. Лемешев, і О. В. Березюк, «Электротехнічний бетон для виготовлення анодних заземлювачів.» на *Міжнар. наук.-практ. Интернет-конф. Интеллектуальный потенциал XXI столетия '2017*, Одеса, 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.sworld.education/index.php/ru/arts-architecture-and-construction-u7-317/modern-construction-technologies-u7-317/29688>.
- [19] В. Р. Сердюк, і О. В. Христин, «Використання бетелу-М для іммобілізації рідких радіоактивних відходів.» *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, № 1 (5), с. 50-54, 2008.
- [20] Г. Я. Якимечко, і О. Р. Попович, «Аспекти рециклінгу будівельних відходів.» *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, № 700, с. 279-282, 2011.
- [21] О. В. Березюк, і М. С. Лемешев, «Динаміка утворення відходів будівництва і знесення у Вінницькій області.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 37-41, 2021.
- [22] О. В. Березюк, «Комп'ютерна програма "Планування експерименту" ("PlanExp"),» *Свідчення про реєстрацію авторського права на твір № 46876*, Київ: Державна служба інтелектуальної власності України, дата реєстрації: 21.12.2012.
- [23] О. В. Березюк, «Моделювання компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттєвозі на основі комп'ютерної програми "PlanExp",» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 23-28, 2016.

Рекомендована кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 08.06.2021

Березюк Олег Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: berezyukoleg@i.ua ;

Лемешев Михайло Степанович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури;

Королєвська Світлана В'ячеславівна — завідувач лабораторіями кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Bereziuk¹
M. S. Lemeshev¹
S. V. Korolevska¹

Mathematical Modeling of Volumes Forecasting of Construction Waste Production in Different Countries of the World

¹Vinnitsia National Technical University

Construction waste can be widely used in construction: as a filler and binder for the production of concrete, dry mixtures and other building materials, for the production of building materials with protective properties, etc. Tstudy of the volume of construction waste in different countries around the world by planning a second-order experiment by the Box-Wilson method using rotatable central compositional planning using the developed software, which is protected by a certificate of the work. The aim of the study is to determine by planning a regression model to predict the production of construction waste in different countries from the main parameters of influence. The regression dependence of forecasting the volume of construction waste production in different countries of the world on the main parameters of influence: population density, gross domestic product per capita, human development index, average latitude of the country. It is established that according to Fisher's criterion the hypothesis about the adequacy of the obtained regression model can be considered correct with 95 % reliability. The correlation coefficient was 0,99475, which indicates sufficient reliability of the obtained results. The obtained regression dependence can be used when developing a strategy for construction waste management. It was established that among the factors of influence that were considered, the volume of gross domestic product per capita has the greatest impact on the volume of construction waste production, and the index of human development has the least. The response surfaces of the target function are constructed - the volumes of construction waste production in different countries of the world and their two-dimensional cross-sections in the planes of impact parameters.

Keywords: mathematical modeling, experiment planning, volume forecasting, construction waste.

Bereziuk Oleh V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Security of Life and Pedagogic of Security, e-mail: berezyukoleg@i.ua ;

Lemeshev Mykhailo S. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Construction, Urban Economy and Architecture;

Korolevska Svitlana V. — Head of Laboratories of the Chair Security of Life and Pedagogic of Security

O. V. Березюк¹
M. C. Лемешев¹
С. В. Королевская¹

Математическое моделирование прогнозирования объемов продуцирования строительных отходов в разных странах мира

¹Винницкий национальный технический университет

Строительные отходы могут быть широко использованы в строительстве: как наполнитель и связующее для производства бетонов, сухих строительных смесей и других строительных материалов, для производства строительных материалов с защитными свойствами и тому подобное. Проведено исследование объемов продуцирования строительных отходов в разных странах мира посредством планирования эксперимента второго порядка методом Бокса–Уилсона с помощью ротатбельного центрального композиционного планирования, применяя разработанное программное обеспечение, защищенное свидетельством на произведение. Целью исследования является определение с помощью планирования эксперимента регрессионной модели прогнозирования объемов продуцирования строительных отходов в разных странах мира от основных параметров воздействия. Получена регрессионная зависимость прогнозирования объемов продуцирования строительных отходов в разных странах мира от основных параметров воздействия: плотность населения страны, величина валового внутреннего продукта на душу населения, индекс развития человеческого потенциала, средняя географическая широта страны. Установлено, что по критерию Фишера гипотезу об адекватности полученной регрессионной модели можно считать правильной с 95 %-й достоверностью. Коэффициент корреляции составил 0,99475, что свидетельствует о достаточной достоверности полученных результатов. Полученная регрессионная зависимость может быть использована при разработке стратегии поведения со строительными отходами. Установлено, что среди рассматриваемых факторов влияния на объемы продуцирования строительных отходов наиболее влияет величина валового внутреннего продукта на душу населения, а наименьшее — индекс развития человеческого потенциала. Построены поверхности отзывает целевой функции — объемов продуцирования строительных отходов в разных странах мира и их двумерные сечения в плоскостях параметров воздействия.

Ключевые слова: математическое моделирование, планирование эксперимента, прогнозирование объемов, строительные отходы.

Березюк Олег Владимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и педагогики безопасности, e-mail: berezyukoleg@i.ua ;

Лемешев Михаил Степанович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры;

Королевская Светлана Вячеславовна — заведующая лабораториями кафедры безопасности жизнедеятельности и педагогики безопасности