

О. В. Березюк, д. т. н., доц.; І. В. Фіник

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОШИРНОСТІ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ

Об'єктом дослідження у роботі є будівельні відходи, щорічний обсяг яких в Україні складає майже 1 млн. т., а приріст зайнятих земельних площ – 50 тис. га. У світовій практиці близько 90 % відходів будівництва підлягають переробці та повторному використанню. Тому прогнозування поширеності повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу з метою розробки стратегії поводження з будівельними відходами є актуальною науково-технічною задачею. Проведено дослідження поширеності повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу плануванням експерименту другого порядку методом Бокса-Уілсона за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування застосовуючи розроблене програмне забезпечення, що захищене свідоцтвом на твір.

Метою дослідження є визначення регресійної моделі прогнозування поширеності повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу. Отримано регресійну залежність прогнозування поширеності повторного використання будівельних відходів 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 0,99934, 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 поширеність повторного використання будівельних відходів впливає величина валового внутрішнього продукту на душу населення, а найменше – середня географічна широта країни. Побудовано поверхні відгуків цільової функції – поширеності повторного використання будівельних відходів та їхні двомірні перерізи в площинах параметрів впливу.

Ключові слова: математичне моделювання, планування експерименту, багатofакторна залежність, фактори впливу, поверхня відгуку, прогнозування поширеності, повторне використання, будівництво, будівельні відходи, матеріалознавство.

Вступ

На сьогодні 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 [1]. Будівельні відходи можуть бути широко застосовані у будівництві для одержання таких цінних матеріалів: як наповнювач [2] та в'язуче [3 – 5] для виробництва бетонів, сухих будівельних сумішей та інших будівельних матеріалів [6, 7], для виробництва будівельних матеріалів із захисними властивостями від електромагнітних випромінювань [8, 9] та статичної електрики [10], для виготовлення анодних заземлювачів [11]. Багато мінеральних та органічних відходів за своїм хімічним складом і технічними властивостями близькі до природної сировини.

Постановка проблеми

У світовій практиці близько 90 % відходів будівництва підлягають переробці та повторному використанню. Тому прогнозування поширеності повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу з метою

розробки стратегії поводження з будівельними відходами є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [2] запропонований шламозолокарбонатний прес-бетон, який складається з відходів каменерізання карбонатних порід, золи-виносу Ладижинської ТЕС, червоного шламу Миколаївського глиноземного заводу з добавкою портландцементу. В роботі [3] показано, що створення нових будівельних матеріалів поліфункціонального призначення дозволяє вирішити актуальну для України проблему енерго- та ресурсозбереження. Основним шляхом утилізації червоного шламу при виробництві будівельних матеріалів є його використання у якості модифікуючої добавки до золоцементного в'язучого [4]. В роботі [5] запропоновано металозолофосфатне в'язуче на основі відходів промисловості. Техніко-економічну доцільність більш широкого використання відходів ТЕС при виробництві цементу та інших будівельних матеріалів показано в роботі [6]. В статті [7] 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 в якості 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 [8]. Доцільність застосування дрібнодисперсних порошоків шламів сталі ШХ-15 для виготовлення спеціального захисного покриття від електромагнітних випромінювань обґрунтовано в статті [9]. В роботі [10] запропоновано використовувати для боротьби з зарядами статичної електрики покриття із 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 [11].

В роботі [12] наведено статистичні дані щодо обсягів продукування, поширеності повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу. В статті [13] визначено регресійну залежність, що описує динаміку утворення маси відходів будівництва і знесення у Вінницькій області та дозволяє прогнозувати масу утворення цих відходів. В роботі [14] побудовано регресійну модель прогнозування обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу. Однак конкретних математичних залежностей поширеності повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу, в результаті аналізу відомих публікацій, авторами не виявлено.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є визначення за допомогою планування багатофакторного експерименту регресійної моделі прогнозування поширеності повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу.

Методи і матеріали

Визначення регресійної моделі прогнозування поширеності повторного використання будівельних відходів від основних параметрів впливу проводилось за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування експерименту другого порядку методом Бокса-Уілсона [15]. Визначення коефіцієнтів рівняння регресії здійснювалось за допомогою розробленої комп'ютерної програми "PlanExp", яка захищена свідоцтвом про

реєстрацію авторського права на твір [16] і детально описана в роботах [17, 18].

Результати експериментальних досліджень

Серед параметрів, від яких залежить поширеність повторного використання 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 табл. 1. На відміну від абсолютних параметрів, відносні дозволяють порівнювати країни з різними рівнями розвитку економіки та людського потенціалу, кількістю населення, площами території та кліматичними умовами.

Таблиця 1

Поширеність повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу [12]

Країна	Поширеність повторного використання будівельних відходів, %	Фактори впливу			
		Щільність населення, осіб/км ²	ВВП на душу населення, тис. \$/осіб	Індекс розвитку людського потенціалу	Середня широта, ° пн. ш.
Японія	45	337	38,095	0,956	34,89
Німеччина	17	230	40,415	0,94	51,17
Франція	15	114	45,858	0,955	46,7
Корея	40	480	20,582	0,928	38,06
Італія	9	199,4	39,565	0,945	41,28
Іспанія	5	79,7	35,557	0,949	39,5
Нідерланди	90	394	51,657	0,958	52,15
Бельгія	87	318	29,814	0,948	50,83
Португалія	5	114	22,232	0,795	39,69
Греція	5	85,3	30,661	0,947	39
Швеція	21	21,9	55,427	0,958	62,2
Норвегія	50	12	72,306	0,968	62
Фінляндія	45	16	36,217	0,954	64,8
Ірландія	5	60,3	43,6	0,96	53
Україна	4	76	7,532	0,786	48,38

За даними табл. 1 отримано рівняння регресії, яке описує поширеність повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу від основних параметрів впливу і виглядає так

$$\begin{aligned}
 P_{ПВБВ} = & 100,7 \frac{ВВП}{n_n} - 19,1 \frac{n_n}{S_{кр}} - 133,3 IP_{ЛП} + 0,7784 Ш - 0,01055 \frac{n_n}{S_{кр}} \frac{ВВП}{n_n} + \\
 & + 20,16 \frac{n_n}{S_{кр}} IP_{ЛП} - 108,4 \frac{ВВП}{n_n} IP_{ЛП} - 0,1961 \frac{ВВП}{n_n} Ш + 14,59 IP_{ЛП} \cdot Ш + \\
 & + 0,001134 \left(\frac{n_n}{S_{кр}} \right)^2 + 0,165 \left(\frac{ВВП}{n_n} \right)^2 - 122 IP_{ЛП}^2 - 0,05764 Ш^2 - 81,49
 \end{aligned} \tag{1}$$

де $P_{ПВБВ}$ – поширеність повторного використання будівельних відходів, %; $n_n/S_{кр}$ – щільність населення, осіб/км²; $ВВП/n_n$ – ВВП на душу населення, тис. \$/осіб; n_n – кількість населення

країни, осіб; $S_{кр}$ – площа території країни, км²; $IP_{ЛП}$ – індекс розвитку людського потенціалу ($IP_{ЛП} = 0 \dots 1$); $Ш$ – середня географічна широта, ° пн. ш.

За критерієм Стьюдента виявлено: усі фактори, їхні парні ефекти взаємодії, крім $n_n/S_{кр}Ш$, та квадратичні ефекти виявились значимими, найбільше поширеність повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу залежить від ВВП на душу населення, а найменше – від середньої географічної широти.

Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність регресійної моделі (1) можна вважати правильною з 95%-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав 0,99934, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів.

Порівняння фактичної та теоретичної поширеності повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу, ранжованих в порядку спадання, наведено на рис. 1.

З рис. 1 видно, що теоретична поширеність повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу, розрахована за допомогою регресійної моделі (1), несуттєво відрізняється від фактичних даних [12]. Це 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 – поширеності повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наочно відобразити залежність (1) та характер одночасного впливу декількох факторів на цільову функцію.

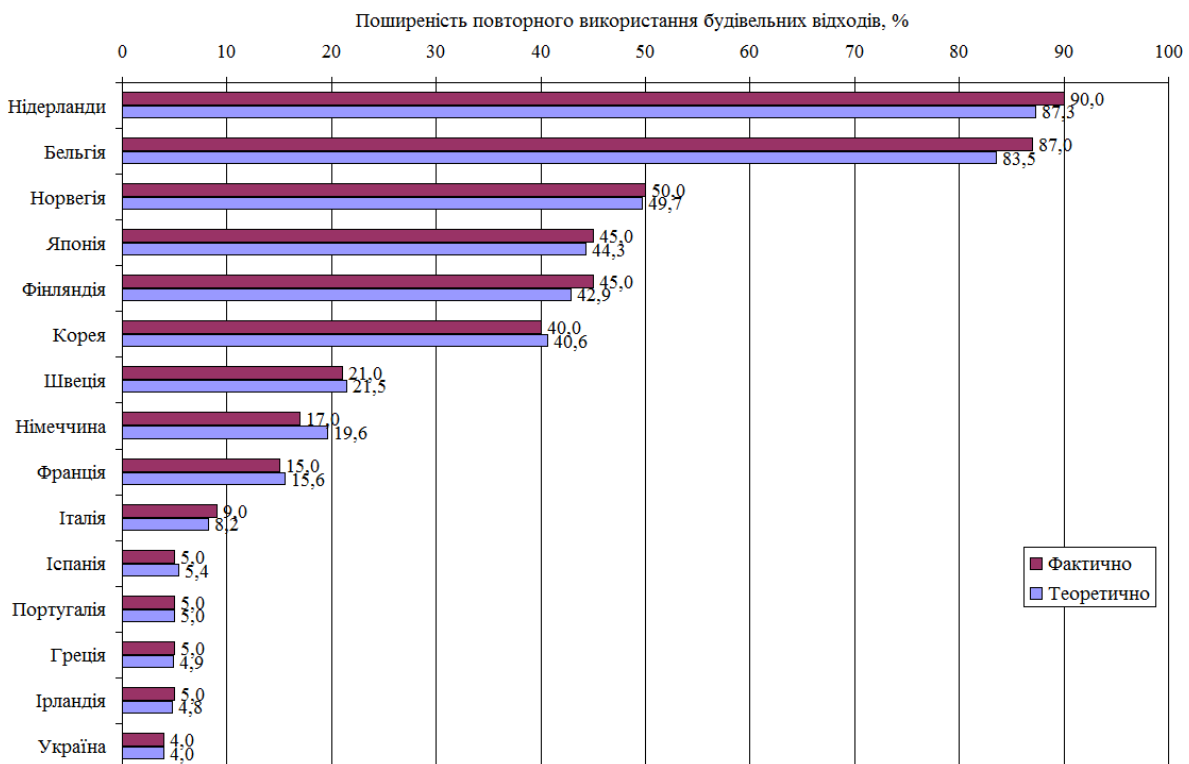


Рис. 1. Порівняння фактичної та теоретичної поширеності повторного використання

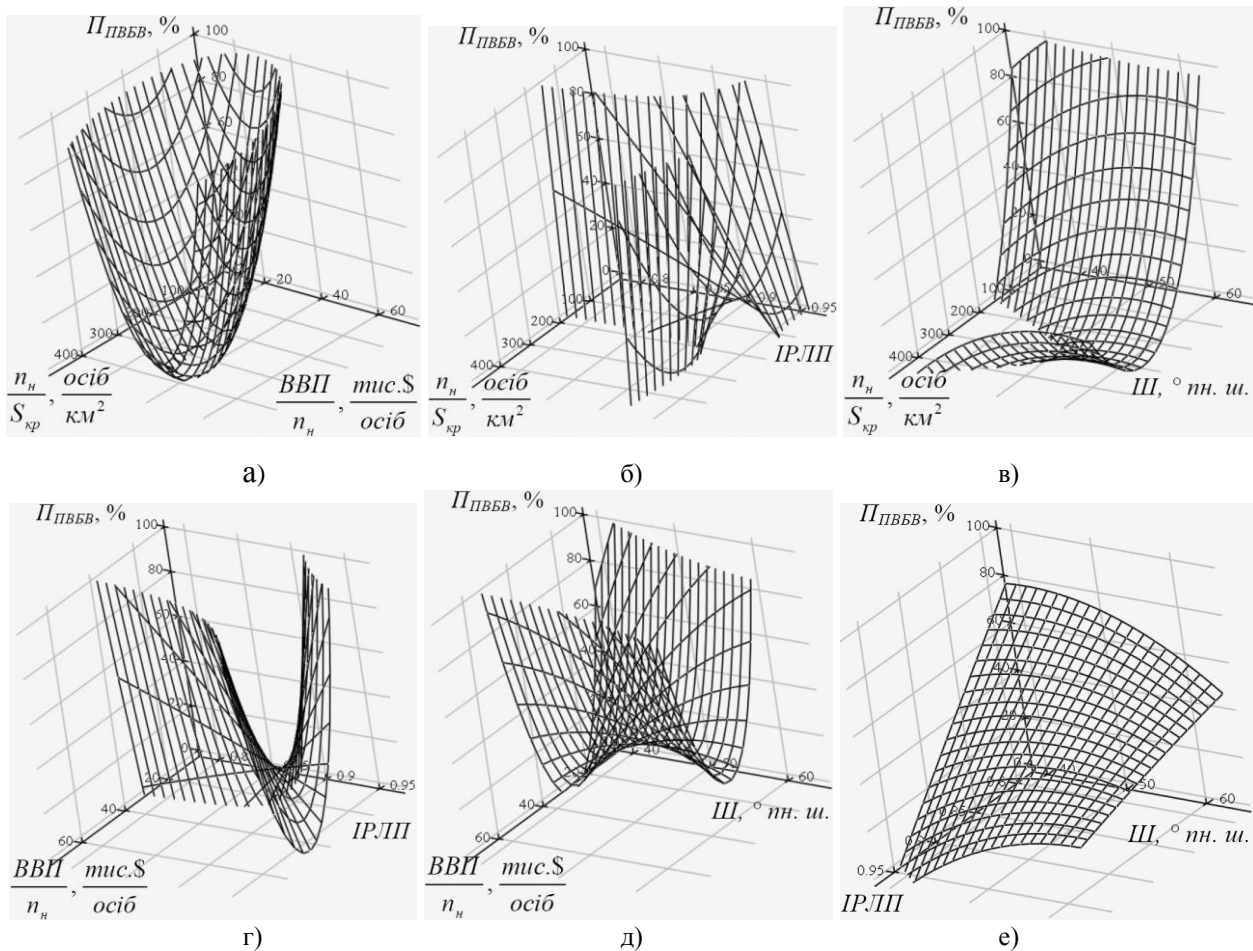


Рис. 2. Поверхні відгуків цільової функції – поширеності повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу:

- а) – $P_{ПВБВ} = f(n_n/S_{кр}, BBП/n_n)$; б) – $P_{ПВБВ} = f(n_n/S_{кр}, IPЛП)$; в) – $P_{ПВБВ} = f(n_n/S_{кр}, Ш)$;
 г) – $P_{ПВБВ} = f(BBП/n_n, IPЛП)$; д) – $P_{ПВБВ} = f(BBП/n_n, Ш)$; е) – $P_{ПВБВ} = f(IPЛП, Ш)$

Висновки

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

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

Побудовано поверхні відгуків цільової функції – поширеності повторного використання будівельних відходів в різних країнах світу, які дозволяють наочно проілюструвати залежність цієї цільової функції від окремих параметрів впливу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коц І. В. Вібраційний гідропривод для пресування промислових відходів / І. В. Коц, О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 5. – С. 146 – 149.
2. Ковальський В. П. Шламосолокарбонатий прес-бетон на основі відходів промисловості / В. П. Ковальський, А. В. Бондарь // Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Харків, Наукові праці ВНТУ, 2022, № 2

18-20 травня 2015 р. – Харків, НТУ «ХПІ», 2015. – С. 209.

3. Лемешев М. С. В'язучі з використанням промислових відходів Вінниччини / М. С. Лемешев // Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я", Харків, 18-20 травня 2016 р. – Харків : НТУ "ХПІ". – С. 381.

4. Ковальський В. П. Обґрунтування доцільності використання золошламового в'язучого для приготування сухих будівельних сумішей / В. П. Ковальський, В. П. Очеретний, М. С. Лемешев, А. В. Бондар // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне : Видавництво НУВГІП, 2013. – Випуск 26. – С. 186 – 193.

5. В'язуче на основі промислових відходів [Електронний ресурс] / М. С. Лемешев // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2017 : материалы международной научно-практической Интернет-конференции, 10-17 октября 2017 г. – SWorld, 2017. – Режим доступа : http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/18481/statya_doclad_oct%20.doc.

6. Ковальський В. П. Використання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах / В. П. Ковальський, О. С. Сідлак // Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві. – 2014. – № 1 (16). – С. 35 – 40.

7. Попович О. Р. Проблеми утилізації та переробки будівельних відходів / О. Р. Попович, Я. М. Захарко, М. С. Мальований // Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. – 2013. – № 755. – С. 321 – 324.

8. Лемешев М. С. Электротехнические материалы для защиты от электромагнитного загрязнения окружающей среды / М. С. Лемешев, А. В. Христинич // Инновационное развитие территорий : Материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф. (26 февраля 2016 г.) – Череповец : ЧГУ, 2016. – С. 78 – 83.

9. Лемешев М. С. Металлонасыщенные бетоны для защиты от электромагнитного излучения / М. С. Лемешев // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса : Зовнішрекламсервіс, 2013. – № 33. – С. 253 – 256.

10. Електропровідні бетоны для захисту від статичної електрики [Електронний ресурс] / М. С. Лемешев // Перспективні досягнення сучасних вчених : матеріали наукового симпозиуму, 19-20 вересня 2017 р. – Одеса : SWorld, 2017. – Режим доступа : <http://www.sworld.education/index.php/ru/c217-14/29403-%D1%81217-032>.

11. Електротехнічний бетон для виготовлення анодних заземлювачів [Електронний ресурс] / М. С. Лемешев, О. В. Березюк // Інтелектуальний потенціал XXI століття '2017 : матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції, 14-21 листопада 2017 р. – Одеса : SWorld, 2017. – Режим доступа : <http://www.sworld.education/index.php/ru/arts-architecture-and-construction-u7-317/modern-construction-technologies-u7-317/29688>.

12. Якимечко Г. Я. Аспекти рециклінгу будівельних відходів / Г. Я. Якимечко, О. Р. Попович // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 700. – С. 279 – 282.

13. Березюк О. В. Динаміка утворення відходів будівництва і знесення у Вінницькій області / О. В. Березюк, М. С. Лемешев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2021. – № 1. – С. 37 – 41.

14. Березюк О. В. Математичне моделювання прогнозування обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу / О. В. Березюк, М. С. Лемешев, С. В. Королевська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2021. – № 3. – С. 41 – 46.

15. Andersson O. Experiment!: planning, implementing and interpreting / O. Andersson. – John Wiley & Sons, 2012. – 288 p.

16. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Регресійний аналіз" ("RegAnaliz") / О. В. Березюк // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 49486. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 03.06.2013.

17. 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.

18. Березюк О. В. Встановлення регресій параметрів захоронення відходів та потреби в ущільнювальних машинах на основі комп'ютерної програми "RegAnaliz" / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 1. – С. 40 – 45.

Стаття надійшла до редакції 22.06.2022.

Стаття пройшла рецензування 26.06.2022.

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

Фінік Ірина Валеріївна – магістр теплоенергетики.

Вінницький національний технічний університет.