

УДК 662.767.2

## Удосконалення математичної моделі ефективності видобування звалищного газу

О. В. Березюк<sup>1</sup>, М. С. Лемешев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., доц., проф. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, berezyukoleg@i.ua, www.oberezuk.vk.vntu.edu.ua, ORCID:0000-0002-2747-2978

<sup>2</sup>к.т.н., доц. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, mlemeshev@i.ua, www.lemeshev.vk.vntu.edu.ua, ORCID:0000-0002-6083-0378

*Анотація.* В місцях захоронення твердих побутових відходів утворюється звалищний газ, основною складовою якого є метан. За ступенем завдання шкоди довкіллю метан вважається другим найшкідливішим парниковим газом, що викидається в атмосферу Землі. Тому удосконалення залежності ефективності видобування звалищного газу від основних параметрів впливу з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища є актуальною науково-технічною задачею. Метою дослідження є удосконалення математичної моделі прогнозування ефективності видобування звалищного газу з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища. Використано метод ротатабельного центрального композиційного планування другого порядку. Отримано удосконалену математичну модель прогнозування ефективності видобування звалищного газу в різних країнах, яка, на відміну від базової, забезпечує більшу збіжність з фактичними даними, містить суттєво меншу кількість коефіцієнтів. Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі можна вважати правильною з 95 %-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав 0,99992, що свідчить про високу достовірність одержаних результатів. Отримана удосконалена регресійна залежність може бути використана з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища.

*Ключові слова:* відновлюване джерело енергії, звалищний газ, ефективність видобування, математичне моделювання, планування експерименту, багатofакторна залежність, фактор впливу.

**Вступ.** Згідно даних, наведених в роботі [1] у світі експлуатується 481 система збирання звалищного газу (ЗГ), який утворюється в місцях захоронення твердих побутових відходів (ТПВ). Загальний видобуток цих систем становить 5,15 млрд. м<sup>3</sup> газу на рік. З них 175 установок містяться в країнах ЄС, 264 – в Америці (244 – в США), по 4 – в Австралії та Азії, 2 – в Африці. Але лише близько 25-50 % зібраного ЗГ знаходить комерційне використання, решта спалюється у факелах. Глобальна емісія ЗГ в атмосферу є важливим фактором зміни клімату Землі. Головною складовою ЗГ є метан, емісія якого з територій захоронення ТПВ складає від 1,5 до 70 млн. т/рік [2, 3]. При утилізації метану з усіх полігонів ТПВ в США його кількість становитиме 5 % від загального споживання природного газу в США або 1 % від загального споживання енергоносіїв [1]. За ступенем завдання шкоди довкіллю метан вважається другим після вуглекислого газу найшкідливішим парниковим газом і становить 18 % від загальної кількості парникових газів, що викидаються в атмосферу Землі.

Метан за величиною потенціалу глобального потепління приблизно у 21 раз небезпечніший за вуглекислий газ.

**Актуальність дослідження.** Необхідність обліку валової емісії метану на даний час визначається зокрема тим, що цей газ є складовою частиною національної квоти речовин, що впливають на парниковий ефект та зміну озонового шару планети. Тому удосконалення залежності ефективності видобування звалищного газу від основних параметрів впливу з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища є актуальною науково-технічною задачею.

**Останні дослідження та публікації.** В роботах [4-6] наведено склад та фізико-хімічні властивості біогазу, що утворюється в місцях захоронення ТПВ. В статті [7] опубліковано склад біогазу, отриманого при анаеробному розкладанні ТПВ для різних співвідношень композиційних сумішей ТПВ-компост та їхньої відносної вологості.

Перспективи та досвід видобування біогазу в

місцях захоронення ТПВ детально описано в роботах [8-10], а в статтях [11, 12] розглянуті особливості його утворення. Вироблений біогаз збирається за допомогою відповідного технічного обладнання і або спалюється безпосередньо на блочній теплоелектроцентралі (ТЕЦ) для електро- і теплопостачання або збагачується до біометану (очищеного біогазу) і подається в існуючу газотранспортну мережу або може використовуватися як паливо в автомобілях на природному газі. Застосування біогазу у децентралізованому енергопостачанні сприяє скороченню імпорту енергоносіїв та підвищенню надійності енергопостачання, зокрема, у сільській місцевості. Суттєвою перевагою виробництва біогазу є використання поновлюваних джерел енергії, в тому числі ТПВ, вихід біогазу з органічної фракції яких в середньому складає 123 Нм<sup>3</sup>/т субстрату. Широкий і постійно доступний спектр органічних речовин уможливує постійне і безперервне виробництво біогазу і сприяє економії викопних енергоносіїв [13]. Нижня теплотворна здатність звалищного біогазу становить 16-18 МДж/Нм<sup>3</sup> [14]. Авторами роботи [15] розглянуто методи використання біомаси для виробництва теплової енергії. В роботі [16] описано фази розкладання ТПВ, 80 % яких є анаеробними, а також визначено фактори, що впливають на процес біодеструкції відходів.

Автори статті [17] наводять статистичні дані щодо потенціалу ЗГ у різних країнах світу. В роботі [18] наведено математичну модель прогнозування питомого об'єму видобування ЗГ, а в статті [19] опублікована математична модель прогнозування питомого потенціалу ЗГ, на основі яких отримано залежність ефективності видобування ЗГ від основних параметрів впливу [20]:

$$\varepsilon_{ЗГ} = \frac{\left[ 25,357 + 7,399 \frac{n_n}{S_{кр}} - 461,2 - 319,3 \left( \frac{n_n}{S_{кр}} \right)^{0,2007} - 0,1275 \left( \frac{ВВП}{n_n} \right)^{1,964} - 30,95 \frac{ВВП}{n_n} + 0,00127 \frac{n_n}{S_{кр}} \frac{ВВП}{n_n} - 2284 IP_{ЛП}^{50,07} + 0,03603 \left( \frac{n_n}{S_{кр}} \right)^{0,2007} \left( \frac{ВВП}{n_n} \right)^{1,964} - 7,95 \frac{n_n}{S_{кр}} IP_{ЛП} + 32,1 \frac{ВВП}{n_n} IP_{ЛП} + 749,1 \left( \frac{n_n}{S_{кр}} \right)^{0,2007} IP_{ЛП}^{50,07} - 0,5987 \left( \frac{ВВП}{n_n} \right)^{1,964} IP_{ЛП}^{50,07} + 3,089 \cdot 10^{-4} \left( \frac{n_n}{S_{кр}} \right)^2 \right] \cdot 100\%}{+ 58,39 \left( \frac{n_n}{S_{кр}} \right)^{0,4014} + 2,706 \cdot 10^{-5} \left( \frac{ВВП}{n_n} \right)^{3,928} + 3525 IP_{ЛП}^{100,14}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де  $n_n/S_{кр}$  – густина населення, осіб/км<sup>2</sup>;  $ВВП/n_n$  – ВВП на душу населення, тис. \$/осіб;  $IP_{ЛП}$  – індекс розвитку людського потенціалу ( $IP_{ЛП} = 0 \dots 1$ );  $n_n$  – кількість населення країни, осіб;  $S_{кр}$  – площа території країни, км<sup>2</sup>.

На нашу думку, залежність (1) є занадто громіздкою і, крім того, вона не може коректно прогнозувати ефективність видобування ЗГ для таких країн, як Україна, оскільки отримана за даними лише для високорозвинутих країн, а тому вимагає удосконалення.

**Формулювання цілей статті.** Ціль статті – удосконалення математичної моделі прогнозування ефективності видобування звалищного газу з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища.

**Основна частина.** Серед параметрів, які впливають на ефективність видобування ЗГ у різних країнах, розглядалися такі: густина населення країни, величина валового внутрішнього продукту (ВВП) на душу населення, індекс розвитку людського потенціалу, 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 та площами території.

Згідно даних табл. 1 методом планування експерименту [21] використовуючи ротатабельне центральне композиційне планування другого порядку виду  $2^3$  за допомогою розробленої комп'ютерної програми "PlanExp", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [22] і детально описана в роботі [23] отримано квадратичне рівняння регресії з ефектами взаємодії 1-го порядку, яке описує удосконалену залежність ефективності видобування ЗГ в різних країнах від основних параметрів впливу і після відкидання незначимих факторів та ефектів взаємодії виглядає таким чином

$$\varepsilon_{ЗГ} = 2,461 \frac{n_n}{S_{кр}} + 682,4 IP_{ЛП} - 2,577 \frac{n_n}{S_{кр}} IP_{ЛП} - 5,936 \frac{ВВП}{n_n} IP_{ЛП} + 0,06965 \left( \frac{ВВП}{n_n} \right)^2 - 533,55\% \quad (2)$$

Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі (2) можна вважати правильною з 95 %-ю достовірністю. При цьому коефіцієнт кореляції склав  $R = 0,99992$ , що свідчить про високу достовірність одержаних результатів.

Виявлено, що за критерієм Стюдента найбільше на ефективність видобування ЗГ в різних країнах, серед досліджених факторів впливу, впливає індекс розвитку людського потенціалу, найменше – ВВП на душу населення.

На рис. 1 показано поверхні відгуків цільо-

вої функції – ефективності видобування ЗГ в різних країнах та їх двовірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наглядно відобразити отриману залежність (2) та характер одночасного впливу декількох факторів на цільову функцію.

Таблиця 1

Об'єми річного видобування, річні потенціали, ефективність видобування ЗГ та фактори впливу на них [2, 17]

Країна	Об'єм видобування ЗГ, млн. м <sup>3</sup> /рік	Потенціал ЗГ, млн. м <sup>3</sup> /рік	Ефективність видобування ЗГ, %	Фактори впливу		
				Густина населення, осіб/км <sup>2</sup>	ВВП на душу населення, \$ тис.	Індекс розвитку людського потенціалу
США	500	13000	3,85	31	46,954	0,95
Великобританія	200	2520	7,94	247	46,432	0,942
Нідерланди	50	560	8,93	394	51,657	0,958
Франція	40	874	4,58	114	45,858	0,955
Італія	35	1040	3,37	199,4	39,565	0,945
Данія	5	105	4,76	126,4	34,7	0,952
Україна	18,65	400	4,66	76	7,532	0,786

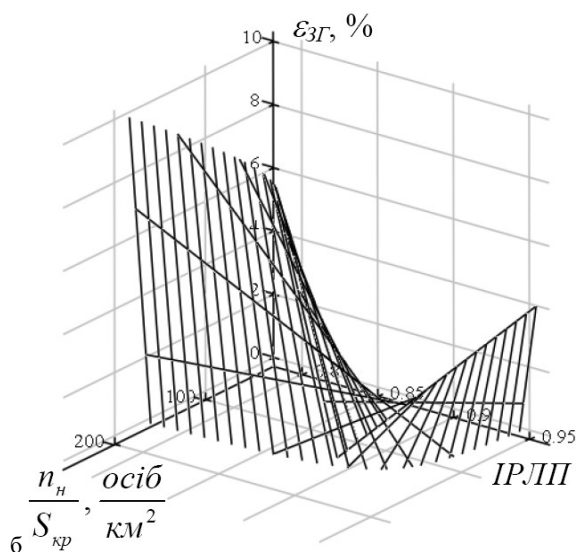
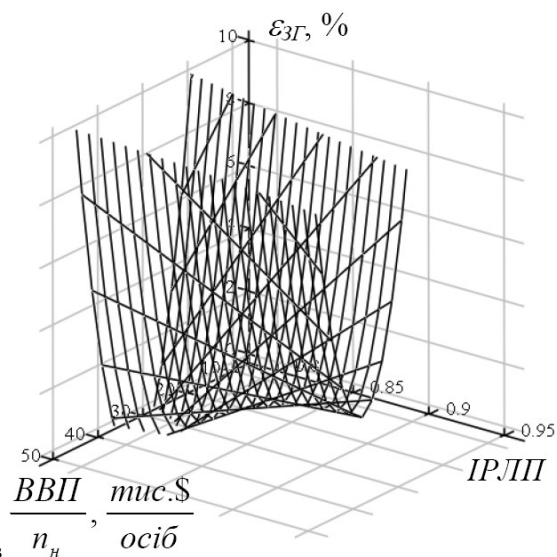
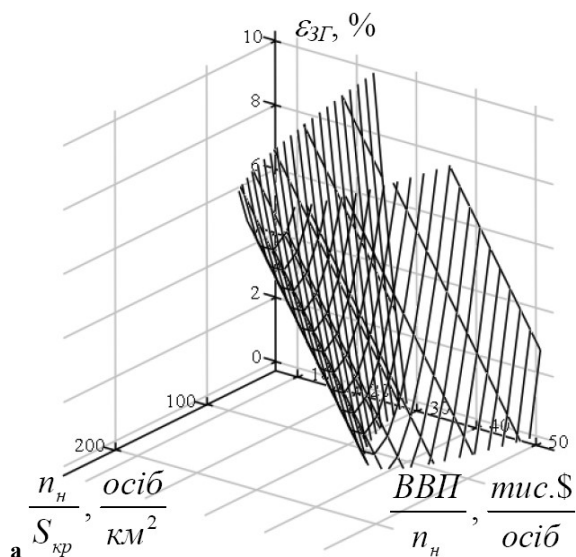


Рис. 1. Поверхні відгуків цільової функції – ефективності видобування  $\epsilon_{зг}$  та їх двовірні перерізи в площинах параметрів впливу:

а –  $n_{н}/S_{кр}$ -ВВП/ $n_{н}$ , б –  $n_{н}/S_{кр}$ -ІРЛП, в – ВВП/ $n_{н}$ -ІРЛП

Порівняння фактичних та теоретичних даних, отриманих за допомогою базової (1) та удосконаленої (2) математичних моделей, ефективності видобування ЗГ в різних країнах, ранжованих в порядку спадання, наведено на рис. 2, з якого видно, що теоретичні ефективності видобування ЗГ в різних країнах, розраховані за допомогою регресійної моделі (2), несуттєво відрізняються від фактичних даних (табл. 1), що підтверджує визначену раніше високу достовірність отриманої залежності. Крім того, на відміну від базової математичної моделі (1), удосконалена математична модель (2) забезпечує більшу збіжність з фактичними даними, містить

суттєво меншу кількість коефіцієнтів, дозволяє поширити результати прогнозування на такі країни, як Україна.

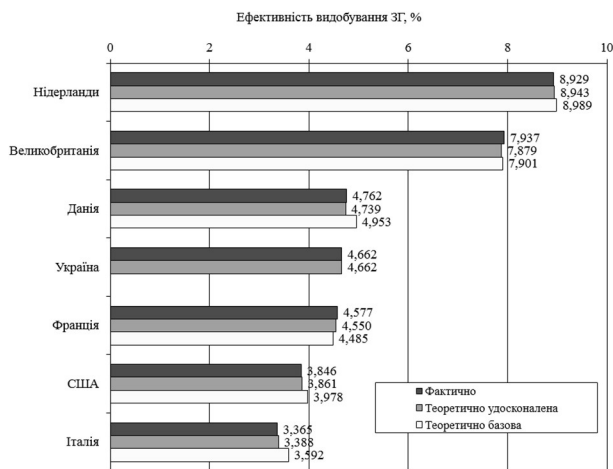


Рис. 2. Порівняння фактичних та теоретичних даних ефективності видобування звалищного газу в різних країнах, отриманих за допомогою базової (1) та удосконаленої (2) математичних моделей

Отже, отримана удосконалена регресійна модель прогнозування ефективності видобування ЗГ в різних країнах (2) може бути використана з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища.

**Висновки.** Встановлено, що на ефективність видобування звалищного газу в різних країнах

впливають такі фактори: густота населення країни, величина валового внутрішнього продукту на душу населення, індекс розвитку людського потенціалу. При цьому, найбільше на ефективність видобування звалищного газу в різних країнах, серед досліджених факторів впливу, впливає індекс розвитку людського потенціалу, найменше – ВВП на душу населення.

Отримано удосконалену математичну модель прогнозування ефективності видобування звалищного газу в різних країнах, яка, на відміну від базової, забезпечує більшу збіжність з фактичними даними, містить суттєво меншу кількість коефіцієнтів, дозволяє поширити результати прогнозування на такі країни, як Україна, і може бути використана науковцями та органами управління комунального господарства з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища. Побудовано поверхні відгуків цільової функції – ефективності видобування звалищного газу в різних країнах та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наглядно відобразити отриману залежність та характер одночасного впливу декількох факторів на цільову функцію.

**Перспективи подальших досліджень.** Визначення залежності теплотворної здатності звалищного газу від факторів впливу вимагає проведення подальших досліджень.

## References

1. Isidorov V. A. *Organicheskaia khimiia atmosfery*. Khimiia, 1992.
2. *Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia "Prohramy utylizatsii zvalyshchnoho metanu v Luhanskii oblasti za dopomohoiu mekhanizmiv Kitskoho protokolu"*. Luhansk, 2008.
3. Minko O. I., Lifshits A. B. "Ekologicheskie i geokhimicheskie kharakteristiki svalok tverdykh bytovykh otkhodov." *Ekologicheskaia khimiia*, no. 2, 1992, pp. 37-47.
4. Ratushniak H. S., Dzhedzhula V. V. *Enerhozberezhennia v systemakh biokonversii. Navchalnyi posibnyk*. VNTU, 2006.
5. Krasnianskii M. E., Belgasem E. "Ekologicheskie ugrozy svalok TBO." *Tverdye bytovye otkhody*, no. 5, 2005, 12 p.
6. Piatnichko A. I., Zhuk G. V., Bannov V. E. "Rezultaty obsledovannia poligonov TBO Ukrainy dlia ustanovleniia obiomov dobychi i sostava biogaza." *Tekhnicheskie gazy*, no. 2, 2010, pp. 63-66.
7. Dzhamalova G. A. "Intensifikaciia anaerobnogo razlozheniia modelnykh obraztsov tverdykh bytovykh otkhodov v bioreaktorakh." *Izvestiia SPbGTI(TU)*, no. 23, 2014, pp. 84-86.
8. Geletukha G. G., Kucheruk P. P., Matveev Yu. B. "Perspektivy proizvodstva i ispolzovaniia biometana v Ukraine." *Analiticheskaia zapiska BAAU. – Bioenergeticheskaia asociaciya Ukrainy*, no. 11, 2014, 43 p.
9. Masleeva O. V., Pachurin G. V. "Ekologicheskaia i ekonomicheskaia tselesoobraznost ispolzovaniia biotopliva." *Fundamentalnye issledovaniia*, no. 6, 2012, pp. 139-144.
10. Savickas Yu. Yu. "Opyt ekspluatatsii biogazovykh ustanovok pri anaerobnoi obrabotke organicheskikh otkhodov." *Promyshlennaia teplotehnika*, vol. 23. no. 4-5. 2001. pp. 128-131.
11. Bespalov V. I., Adamian R. G. "Analiz uslovii obrazovaniia biogaza na poligone po zakhoroneniui tverdykh otkhodov potrebleniia." *Inzhenernyi vestnik Dona*, no. 25.2 (25), 2013.
12. Sheina O. A., Sysoev V. A. "Biokhimiia protsessa proizvodstva biogaza kak alternativnogo istochnika energii." *Vestnik TGU*, vol. 14, no. 1, 2009, pp. 73-76.

13. Shults R. *Виробnytstvo i vykorystannia biohazu v Ukraini*. Biznes-tsentr «Ievraziia», 2012.
14. Shmarin S. L. Prohnozuvannia vykydiv parnykovykh haziv z mistv zakhoronennia tverdykh pobutovykh vidkhodiv v Ukraini. Diss. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho", 2018.
15. Tkachenko S. Y., Bodnar L. A., Yuziuk A. O. "Perspektyvni napriamky vykorystannia biomasy yak dzherela enerhii. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no. 2, 2011, pp. 68-73.
16. Hodovska T. B., Feshchenko V. P. "Kryterii indyikatoriv vplyvu na ahroekosystemy polihonu tverdykh pobutovykh vidkhodiv m. Zhytomyr." *Visnyk ZhNAEU: naukovy-teoretychnyi zbirnyk*, vol. 1, no. 1 (28), 2011, pp. 400-407.
17. Geletukha G. G., Marceniuk Z. A. "Obzor tekhnologii dobychi i ispolzovaniia biogaza na svalkakh i poligonakh tverdykh bytovykh otkhodov i perspektivy ikh razvitiia v Ukraine." *Ekotekhnologii i resursoberezhenie*, no. 4, 1999, pp. 6-14.
18. Bereziuk O. V. "Vyivlennia parametriv vplyvu na pytomyi obiem vydobuvannia zvalyshchnoho hazu." *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no. 3, 2012, pp. 20-23.
19. Bereziuk O. V. "Rozrobka matematychnoi modeli prohnozuvannia pytomoho potentsialu zvalyshchnoho hazu." *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no. 2, 2013, pp. 39-42.
20. Bereziuk O. V. "Modeliuvannia efektyvnosti vydobuvannia zvalyshchnoho hazu dlia rozrobky obladnannia ta stratehii povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy." *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no. 6, 2013, pp. 21-24.
21. Bereziuk O. V. "Planuvannia bahatofaktornoho eksperymentu dlia doslidzhennia vibratsiinoho hidropryvodu ushchilnennia tverdykh pobutovykh vidkhodiv." *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiiakh*, no. 3 (55), 2009, pp. 92-97.
22. Bereziuk O. V. "Kompiuterna prohrama "Planuvannia eksperymentu" ("PlanExp")." Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir 46876. 21 December 2012.
23. Bereziuk O. V. "Modeliuvannia kompresiinoi kharakterystyky tverdykh pobutovykh vidkhodiv u smittievozi na osnovi kompiuternoi prohramy "PlanExp". *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. no. 6, 2016, pp. 23-28.

## UDC 662.767.2

### Improvement of the mathematical model of the extraction efficiency of landfill gas

O. Bereziuk<sup>1</sup>, M. Lemeshev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sc.D, associate professor, professor. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, berezyukoleg@i.ua, www.oberezuk.vk.vntu.edu.ua, ORCID:0000-0002-2747-2978

<sup>2</sup>PhD, associate professor. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, mlemeshev@i.ua, www.lemeshev.vk.vntu.edu.ua, ORCID:0000-0002-6083-0378

*Abstract. Landfill gas, the main component of which is methane, is formed in places where municipal solid waste is buried. According to the degree of damage to the environment, methane is considered the second most harmful greenhouse gas emitted into the Earth's atmosphere. Therefore, improving the dependence of the efficiency of landfill gas extraction on the main impact parameters in order to increase the prevalence of the use of renewable energy sources, save fossil energy sources and simultaneously reduce the intensity of environmental pollution is an urgent scientific and technical task. The purpose of the study is to improve the mathematical model of predicting the efficiency of landfill gas extraction with the aim of increasing the use of renewable energy sources, saving fossil energy sources and simultaneously reducing the intensity of environmental pollution. The research was carried out by second-order experimental design using the Box-Wilson method using a rotatable central composite design using the developed software, which is protected by a copyright certificate. An improved mathematical model for forecasting the efficiency of landfill gas extraction in different countries was obtained, which, unlike the basic model, provides greater convergence with actual data, contains a significantly smaller number of coefficients. It was established that, according to Fisher's test, the hypothesis about the adequacy of the obtained regression model can be considered correct with 95 % confidence. The correlation coefficient was 0.99992, which indicates the high reliability of the obtained results. The resulting improved regression dependence can be used to increase the prevalence of renewable energy sources, save fossil energy sources, and simultaneously reduce the intensity of environmental pollution. The response surfaces of the target function - the efficiency of landfill gas extraction in different countries and their two-dimensional cross-sections in the planes of influence parameters are constructed, which allow you to visually display the obtained dependence and the nature of the simultaneous influence of several factors on the target function.*

*Keywords: renewable energy source, landfill gas, extraction efficiency, mathematical modelling, experiment planning, multifactor dependence, influence factor.*

Надійшла до редакції / Received 27.12.2022