

УДК 662.767.2

доцент **Олег Березюк**,
[berezukoleg@i.ua](mailto:berezyukoleg@i.ua), ORCID:0000-0002-2747-2978,
доцент **Михайло Лемешев**,
mlemeshev@i.ua, ORCID:0000-0002-6083-0378
Вінницький національний технічний університет

РЕГРЕСІЙНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ДИНАМІКИ ЗРОСТАННЯ КІЛЬКОСТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК В УКРАЇНІ

***Анотація.** Глобальна екологічна криза змушує країни світу для енергозабезпечення населення впроваджувати і застосовувати нові альтернативні засоби вироблення енергії, зокрема методи видобування і перероблення біогазу. Тому визначення регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок, є актуальною науково-технічною задачею. Метою дослідження є визначення регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища. Під час проведення дослідження використано метод регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором раціонального виду функції із шістнадцяти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального значення коефіцієнта кореляції. Регресія проводилася на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір. Отримано адекватну регресійну залежність, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок. Побудовано графічну залежність, що описує динаміку збільшення кількості біогазових установок та дозволяє наочно проілюструвати дану динаміку та показати достатню збіжність теоретичних результатів з фактичними даними. Встановлено, що збільшення кількості біогазових установок в Україні протягом*

2012-2019 рр. зростала за гіперболічною залежністю.

Ключові слова: відновлюване джерело енергії, біогаз, біогазова установка, динаміка, регресійний аналіз, регресійна залежність, математичне моделювання.

Вступ. Глобальна екологічна криза змушує країни світу для енергозабезпечення населення впроваджувати і застосовувати нові альтернативні засоби вироблення енергії, зокрема методи видобування і перероблення біогазу (БГ) [1]. Відповідно до даних, наведених у роботі [2], у світі експлуатується 481 система збирання БГ із загальним видобутком цих систем 5,15 млрд. м³ газу на рік. З них 175 установок припадає на країни ЄС, 264 – знаходяться в Америці (244 – в США), по 4 – в Австралії та Азії, 2 – в Африці. Але лише близько 25-50 % зібраного БГ знаходить комерційне використання, решта спалюється у факелах. Глобальна емісія БГ в атмосферу є важливим фактором зміни клімату Землі. Для отримання БГ найбільш ефективними є такі види сировини: відходи з ферм, сільськогосподарських підприємств, стічних вод, тверді побутові відходи (ТПВ) зі сміттєзвалищ і полігонів [1]. Головною складовою БГ є метан CH₄, емісія якого з територій захоронення ТПВ становить від 1,5 до 70 млн. т/рік [3, 4]. 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 [2]. 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 визначення регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок, 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. У статті [1] зазначено, що будівництво біогазових установок є кроком до економіки замкненого циклу, спрямованої на впровадження відновлюваних джерел енергії, скорочення викидів парникових газів тощо, а також проведено техніко-економічне

обґрунтування ефективності будівництва біогазових установок. У роботі [5] проведено аналіз європейського досвіду виробництва БГ з відходів агропромислового комплексу. Зазначено, що формування ефективних методів поводження з сільськогосподарськими відходами та перетворення їх на енергію біомаси, доступну для людей, може не тільки пом'якшити поточну глобальну енергетичну кризу, але й покращити середовище сільськогосподарського виробництва, ефективно захистити навколишнє середовище та водночас робить значний внесок у скорочення викидів вуглецю. Також визначено, що розвиток виробництва БГ в Україні має орієнтуватися на найбільш ефективні практики країн Європи, враховувати реалії військового часу та передбачати:

- розвиток державно-приватного партнерства в сфері виробництва БГ через систему компенсації вартості обладнання для біогазових установок що вироблено в Україні в обсязі 60% вартості;
- встановлення квот на використання біометану в обсязі 10% від споживання промисловими підприємствами;
- встановлення компенсації 40% вартості будівництва когенераційних установок, що працюватимуть на БГ;
- компенсація вартості купівлі малих біогазових установок для особистих селянських господарств за рахунок коштів, що спрямовувалися на субсидування;
- звільнення від податкового навантаження підприємств, що вироблятимуть БГ з відходів основного виробництва.

У матеріалах робіт [6-8] наведено склад і фізико-хімічні властивості БГ, що утворюється в місцях захоронення ТПВ [9-15]. Виробництво БГ на кожному з полігонів може досягати 350...2400 м³/год [8], що дозволить значно покращити екологічну ситуацію в Україні, запобігши виділенню парникових газів в обсязі 16 млн. т у СО₂-еквіваленті, а також токсичних речовин. У статті [16] опубліковано склад біогазу, отриманого при анаеробному розкладанні ТПВ для різних співвідношень композиційних сумішей ТПВ-компост та їхньої відносної вологості.

Перспективи та досвід видобування БГ в місцях захоронення ТПВ детально описано в роботах [17-19], зокрема в статті [19] описано досвід впровадження біогазових установок в Литві, а в статтях [20, 21] розглянуті особливості утворення БГ, що дозволяють оптимізувати цей процес, що, своєю чергою, відкриває широкі можливості його використання у створенні екологічно чистих, відновлюваних джерел енергії. Вироблений БГ збирається за допомогою відповідного технічного обладнання і використовується такими способами:

- спалюється безпосередньо на блоковій теплоелектроцентралі (ТЕЦ) для

електро- і теплопостачання

- збагачується до біометану (очищеного БГ) і подається в наявну газотранспортну мережу
- спалюється як пальне в автомобілях на природному газі.

Застосування БГ у децентралізованому енергопостачанні сприяє скороченню імпорту енергоносіїв та підвищенню надійності енергопостачання, зокрема, у сільській місцевості. Суттєвою перевагою виробництва БГ є використання поновлюваних джерел енергії, в тому числі ТПВ, вихід БГ з органічної фракції яких в середньому складає 123 Нм³/т субстрату. Широкий і постійно доступний спектр органічних речовин уможливорює постійне й безперервне виробництво БГ та сприяє економії викопних енергоносіїв [22]. Нижня теплотворна здатність звалищного БГ становить 16...18 Дж/Нм³ [23], а верхня – 20...25 МДж/Нм³ [8]. Авторами роботи [24] розглянуто методи використання біомаси для виробництва теплової енергії, перспективні конструкції газогенераторних установок, а також способи очищення генераторного газу від домішок. У роботі [25] описано фази розкладання ТПВ, 80% яких є анаеробними, а також визначено фактори, що впливають на процес біодеструкції відходів.

Автори статті [26] наводять огляд технологій видобутку і використання БГ на звалищах і полігонах ТПВ, економічних та екологічних аспектів технологій, а також статистичні дані щодо потенціалу БГ у різних країнах світу. У роботі [27] наведено математичну модель прогнозування питомого об'єму видобування БГ у вигляді квадратичної регресії із ефектами взаємодій 1-го порядку. У статті [28] опублікована математична модель прогнозування питомого потенціалу БГ, на основі якої отримано залежність ефективності видобування БГ від основних параметрів впливу [29], удосконалення якої відображено в статті [30].

У роботі [31] досліджено вплив характеристик ТПВ на обсяги, динаміку утворення, склад та потенціал енергетичного використання БГ з полігонів ТПВ. Авторами статті [32] проведено аналіз способів утилізації видобутого БГ, а в роботі [33] наведено математичну модель поширеності цих способів. У роботі [34] визначено регресійні залежності, які описують динаміку збільшення кількості біогазових установок лише на полігонах ТПВ в Німеччині та в Україні.

Таким чином, аналіз літературних джерел е виявив конкретних математичних залежностей для збільшення загальної кількості біогазових установок в Україні.

Формулювання цілей статті. Ціль статті – визначення регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок з

метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища.

Основна частина. У табл. 1 показана динаміка збільшення кількості біогазових установок в Україні [1]. На основі даних табл. 1 планувалось отримати парну регресійну залежність, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок в Україні. Оскільки аргументом регресійних залежностей є рік, порядок значень якого на три порядки перевищує порядок ширини діапазону його зміни, то з метою підвищення точності регресійної залежності пропонується за початок координат прийняти рік, який передує початку досліджуваного діапазону ($x = t - 2011$).

Таблиця 1. Кількість біогазових установок в Україні в різні роки [1]

Рік	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Кількість біогазових установок в Україні, од.	7	9	10	12	13	21	33	45

Регресія проводилася на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [35].

Програма "RegAnaliz" дозволяє проводити регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором кращого виду функції із 16 найпоширеніших варіантів за критерієм максимального коефіцієнту кореляції зі збереженням результатів в форматі MS Excel та Bitmap.

За результатами регресійного аналізу на основі даних табл. 1, як найбільш, адекватні остаточно прийнято таку регресійну залежність для кількості біогазових установок в Україні

$$n_{BGU} = \frac{1}{0,1524 - 0,01681(t - 2011)}, \quad (1)$$

де t – рік.

Формула (1) добре описує (рис. 1) дані табл. 1, які описують динаміку збільшення кількості біогазових установок в Україні.

Таблиця 2. Результати регресійного аналізу динаміки збільшення кількості біогазових установок в Україні

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R	№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R
1	$y = a + b \cdot x$	0,90377	9	$y = a \cdot x^b$	0,88064
2	$y = 1 / (a + b \cdot x)$	0,98980	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,76978
3	$y = a + b / x$	0,59883	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,76978
4	$y = x / (a + b \cdot x)$	0,07178	12	$y = a / (b + x)$	0,98979
5	$y = a \cdot b^x$	0,96997	13	$y = a \cdot x / (b + x)$	0,86840
6	$y = a \cdot e^{b \cdot x}$	0,96997	14	$y = a \cdot e^{b/x}$	0,73502
7	$y = a \cdot 10^{b \cdot x}$	0,96997	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,73502
8	$y = 1 / (a + b \cdot e^{-x})$	0,80895	16	$y = a + b \cdot x^n$	0,97001

Примітка. Сірим кольором виділено найкращу збіжність

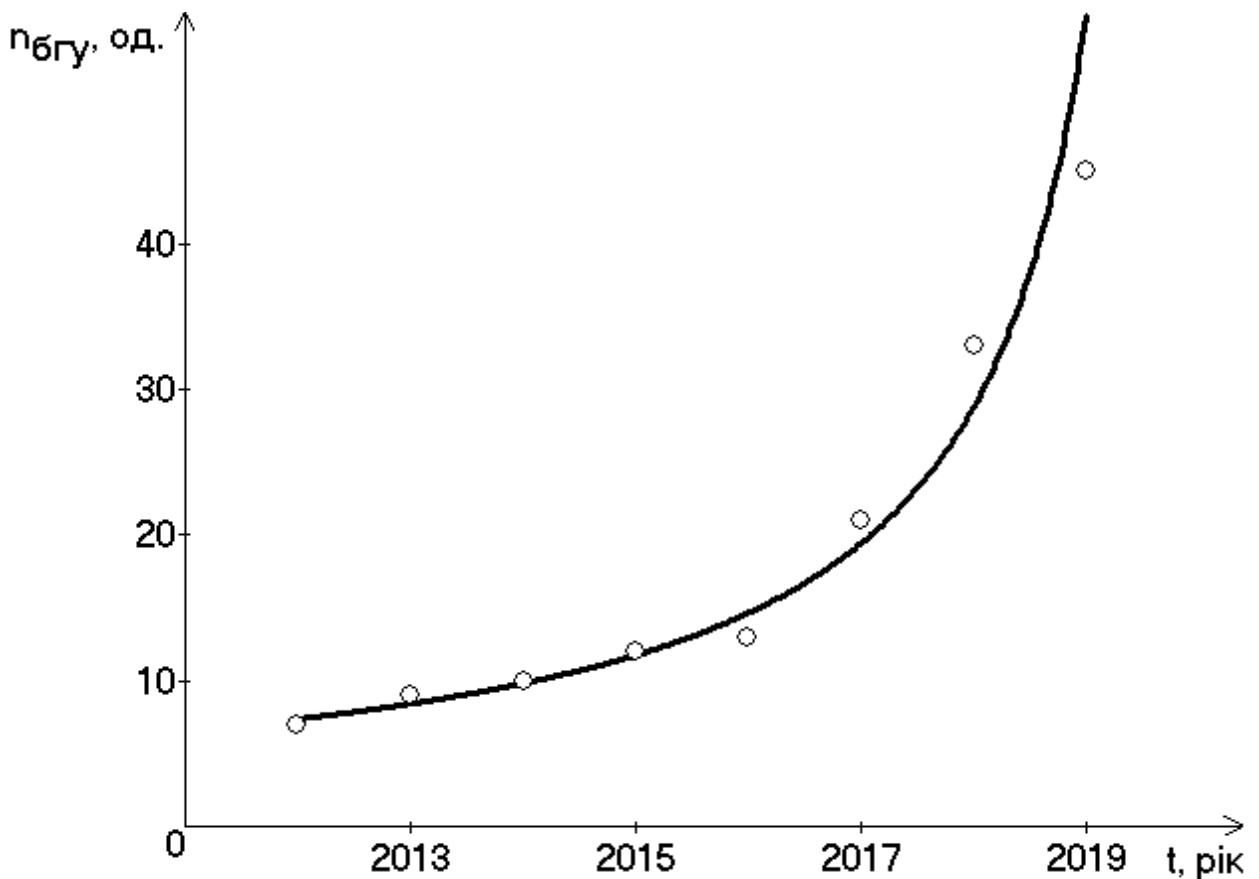


Рис. 1. Залежності, які описують динаміку збільшення кількості біогазових установок в Україні протягом 2012-2019 рр.:

○ – фактична, — – апроксимаційна

Порівняння фактичних та апроксимаційних даних показало, що теоретична динаміка збільшення кількості біогазових установок в Україні, розрахована за допомогою рівняння регресії (1), несуттєво відрізняється від даних, наведених в роботі [1]. Це підтверджує визначену раніше достатню точність отриманої залежності.

Висновки. Визначено регресійну залежність, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок в Україні і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок. Побудовано графічні залежності, що описують динаміку збільшення кількості біогазових установок в Україні та дозволяють наочно проілюструвати дану динаміку та показати достатню збіжність теоретичних результатів з фактичними. Коефіцієнт кореляції R досягає 0,98980. Встановлено, що збільшення кількості біогазових установок в Україні протягом 2012-2019 рр. зростала за гіперболічною залежністю.

Перспективи подальших досліджень. Визначення залежності теплотворної здатності біогазу від основних факторів впливу вимагає проведення додаткових досліджень.

References

1. Sakun L. M., Riznichenko L. V., Vielkin B. O. "Perspektyvy rozvytku rynku biohazu v Ukraini ta za kordonom." *Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia*, 2020, no. 1 (37), pp. 160-170. (in Ukrainian)
2. Isidorov V. A. *Organichna khimiia atmosfery*. Khimiia, 1992. (in Ukrainian)
3. *Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia "Prohramy utylizatsii zvalyshchnoho metanu v Luhanskii oblasti za dopomohoiu mekhanizmiv Kitskoho protokolu"*. Luhansk, 2008. (in Ukrainian)
4. Minko O. I., Lifshits A. B. "Ekologicheskii i geokhimicheskii kharakteristiki svalok tverdykh bytovykh otkhodov." *Ekologicheskaiia khimiia*, no. 2, 1992, pp. 37-47. (in Russian)
5. Kolomiets T. V. "Analiz yevropeiskoho dosvidu vyrobnytstva biohazu z vidkhodiv APK." *Ekonomika ta suspilstvo*, 2024, no. 60, 9 p. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-60-46> (in Ukrainian)
6. Krasnianskii M. E., Belgasem E. "Ekologicheskii ugrozy svalok TBO." *Tverdye bytove otkhody*, no. 5, 2005, 12 p. (in Russian)
7. Ratushniak H. S., Dzhedzhula V. V. *Enerhozberezhennia v systemakh biokonversii*. Navchalnyi posibnyk. VNTU, 2006. (in Ukrainian)
8. Piatnichko A. I., Zhuk G. V., Bannov V. E. "Rezultaty obsledovaniia poligonov TBO Ukrainy dlia ustanovleniia obiomov dobychi i sostava biogaza." *Tekhnicheskie gazy*, no. 2, 2010, pp. 63-66. (in Russian)
9. Kazachiner O., Boychuk Y., Halii A. *Theoretical foundations of pedagogy and*

education. International Science Group, 2022.

10. Korniylo I., Gnyp O. Scientific foundations in research in Engineering. Primedia eLaunch, 2022.

11. Hladyshch D., Hnat H. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture. International Science Group, 2023.

12. Azarenkov V. Modern teaching methods in pedagogy and philology. Primedia eLaunch, 2023.

13. Kazachiner O., Boychuk Y. Theoretical and scientific foundations of pedagogy and education. International Science Group, 2022.

14. Khrebtii H. Innovative ways of improving medicine, psychology and biology. Primedia eLaunch, 2023.

15. Alieva M. Conceptual options for the development and improvement of medical science and psychology. International Science Group, 2023.

16. Dzhamalova G. A. "Intensifikatsiia anaerobnogo razlozheniia modelnykh obraztsov tverdykh bytovykh otkhodov v bioreaktorakh." *Izvestiia SPbGTI(TU)*, no. 23, 2014, pp. 84-86. (in Russian)

17. Geletukha G. G., Kucheruk P. P., Matveev Yu. B. "Perspektivy proizvodstva i ispolzovaniia biometana v Ukraine." *Analiticheskaia zapiska BAU. Bioenergeticheskaia asociatsiia Ukrainy*, no. 11, 2014, 43 p. (in Russian)

18. Masleeva O. V., Pachurin G. V. "Ekologicheskaia i ekonomicheskaia tselesoobraznost ispolzovaniia biotopliva." *Fundamentalnye issledovaniia*, no. 6, 2012, pp. 139-144. (in Russian)

19. Savickas Yu. Yu. "Opyt ekspluatatsii biogazovykh ustanovok pri anaerobnoi obrabotke organicheskikh otkhodov." *Promyshlennaia teplotehnika*, vol. 23. no. 4-5. 2001. pp. 128-131. (in Russian)

20. Bespalov V. I., Adamian R. G. "Analiz uslovii obrazovaniia biogaza na poligone po zakhoroneniuu tverdykh otkhodov potrebleniia." *Inzhenernyi vestnik Dona*, no. 25.2 (25), 2013. (in Russian)

21. Sheina O. A., Sysoev V. A. "Biokhimiia protsessa proizvodstva biogaza kak alternativnogo istochnika energii." *Vestnik TGU*, vol. 14, no. 1, 2009, pp. 73-76. (in Russian)

22. Shults R. *Vyrobnytstvo i vykorystannia biohazu v Ukraini*. Biznes-tsentr «Ievraziia», 2012. (in Ukrainian)

23. Shmarin S. L. *Prohnozuvannia vykydiv parnykovykh haziv z mist zakhoronennia tverdykh pobutovykh vidkhodiv v Ukraini*. Diss. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy "Kyivskyi politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho", 2018. (in Ukrainian)

24. 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. (in Ukrainian)

25. Hodovska T. B., Feshchenko V. P. "Kryterii indykatoriv vplyvu na

ahroekosystemy polihonu tverdykh pobutovykh vidkhodiv m. Zhytomyr.” Visnyk ZhNAEU: naukovo-teoretychnyi zbirnyk, vol. 1, no. 1 (28), 2011, pp. 400-407. (in Ukrainian)

26. 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 resursoberezenie, no. 4, 1999, pp. 6-14. (in Russian)

27. Bereziuk O. V. “Vyiavlennia parametriv vplyvu na pytomyi obiem vydobuvannia zvalyshchnoho hazu.” Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, no. 3, 2012, pp. 20-23. (in Ukrainian)

28. Bereziuk O. V. “Rozrobka matematychnoi modeli prohnozuvannia pytomoho potentsialu zvalyshchnoho hazu.” Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, no. 2, 2013, pp. 39-42. (in Ukrainian)

29. 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. (in Ukrainian)

30. Bereziuk O. V., Lemeshev M. S. "Udoskonalennia matematychnoi modeli efektyvnosti vydobuvannia zvalyshchnoho hazu." Ventyliatsiia, osvittennia ta teplohazopostachannia, no. 44, 2023, pp. 10-16. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.44.12-16> (in Ukrainian)

31. Pukhniuk O. Yu. Utvorennia biohazu na polihonakh tverdykh pobutovykh vidkhodiv Ukrainy ta otsinka potentsialu yoho enerhetychnoho vykorystannia: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: 05.14.08. Kyiv, 2013, 26 p. (in Ukrainian)

32. Kuris Yu. V., Tkachenko S. Y., Semenenko N. V. "Sposoby utylizatsii biohazu." Enerhosberezenie. Enerhetyka. Enerhoaudyt, no. 7 (77), 2010, pp. 20-30. (in Ukrainian)

33. Bereziuk O. V. "Modeliuvannia poshyrenosti sposobiv utylizatsii zvalyshchnoho hazu dlia rozrobky obladnannia ta stratehii povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy." Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, no. 5, 2014, pp. 65-68. (in Ukrainian)

34. Bereziuk O. V., Kraievskyi V. O., Bereziuk L. L. "Svitovi tendentsii zmenshennia kilkosti smittiezvalyshch na prykladi SShA." Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, 2020, no. 1, 6 p. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2020-1-8-13> (in Ukrainian)

35. Bereziuk O. V. "Kompiuterna prohrama "Rehresiinyi analiz" ("RegAnaliz")." Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir no 49486, K.: Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy, Data reiestratsii: 03.06.2013. (in Ukrainian)

UDC 662.767.2

Associate Professor **Oleh Bereziuk**,
berezyukoleg@i.ua, ORCID:0000-0002-2747-2978,
Associate Professor **Mykhailo Lemeshev**,
mlemeshev@i.ua, ORCID:0000-0002-6083-0378
Vinnytsia National Technical University

REGRESSION DEPENDENCE OF THE NUMBER GROWTH DYNAMICS OF THE BIOGAS PLANTS IN UKRAINE

Abstract. *The global environmental crisis forces the countries of the world to introduce and use new alternative means of energy production, in particular methods of extraction and processing of biogas to provide energy to the population. Therefore, the determination of the regression dependence, which describes the dynamics of the increase in the number of biogas plants and can be used when forecasting the number of such plants, is an urgent scientific and technical task. The purpose of the research is to determine the regression dependence, which describes the dynamics of the increase in the number of biogas plants and can be used when forecasting the number of such plants, with the aim of increasing the prevalence of the use of renewable energy sources, saving fossil energy sources and simultaneously reducing the intensity of environmental pollution. During the research, the method of regression analysis of the results of one-factor experiments and other paired dependencies was used with the selection of a rational type of function from the sixteen most common options according to the criterion of the maximum value of the correlation coefficient. Regression was carried out on the basis of linearizing transformations, which allow reducing the non-linear dependence to a linear one. The coefficients of the regression equations were determined by the method of least squares using the developed computer program "RegAnalyz", which is protected by a certificate of copyright registration for the work. An adequate regression relationship was obtained, which describes the dynamics of the increase in the number of biogas plants and can be used when forecasting the number of such plants. A graphical dependence was built that describes the dynamics of the increase in the number of biogas plants and allows to visually illustrate this dynamic and show sufficient convergence of theoretical results with actual data. It was established that the increase in the number of biogas plants in Ukraine during 2012-2019 grew according to a hyperbolic dependence.*

Keywords: *renewable energy source, biogas, biogas plant, dynamics, regression analysis, regression dependence, mathematical modelling.*