

Т. В. Шелешей¹
А. Ю. Рачинський¹
В. А. Сиваченко¹

ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНОГО ВМІСТУ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ ПІД ЧАС СПАЛЮВАННЯ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сучасний світ усе більше стикається з проблемами забруднення довкілля та виснаження природних ресурсів. Використання традиційних енергоносіїв, таких як природний газ, супроводжується викидами шкідливих речовин, що спричиняють глобальне потепління та негативно впливають на здоров'я людини. У цьому контексті більше уваги приділяється альтернативним джерелам енергії, зокрема біогазу, що отримується шляхом анаеробного бродіння органічних відходів. Біогаз може не лише забезпечити екологічно чисту енергію, а й сприяти утилізації відходів, зменшенню залежності від викопних палив та зміцненню енергетичної безпеки.

Мета дослідження полягає у визначенні оптимального палива для котла ДКВР-10 з погляду екологічної активності, враховуючи рівень викидів шкідливих речовин та енергоефективність. Аналіз проводився шляхом оцінки валових викидів діоксиду сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x) та оксиду вуглецю (CO) під час спалювання різних видів палива.

За результатами дослідження встановлено, що використання біопалива забезпечує значно нижчі викиди SO_2 порівняно з традиційними джерелами енергії (0,00025 г/ГДж проти 0,0059...0,0071 г/ГДж для природного газу). Викиди NO_x залишаються сталими для всіх досліджуваних видів палива (54,16 г/ГДж). Проте біопаливо показало вищий рівень викидів CO_2 (91,99 г/ГДж), що пояснюється його високою енергетичною насиченістю.

Отримані результати дозволяють точніше оцінити вплив різних видів палива на довкілля та сприяти розробці заходів для зменшення шкідливих викидів. Використання біопалива є перспективним напрямом розвитку екологічно чистої енергетики, проте потребує подальшого вдосконалення технологій спалювання для мінімізації викидів парникових газів.

Ключові слова: біогаз, викиди, екологічна активність, енергоефективність, діоксид сірки, оксиди азоту, оксид вуглецю, парникові гази, котел ДКВР-10.

Вступ

Сучасний світ усе більше зіштовхується з проблемами забруднення довкілля та виснаження природних ресурсів. Використання традиційних енергоносіїв, зокрема природного газу, забезпечує значну частину світового енергопостачання, проте супроводжується викидами вуглекислого газу (CO_2), оксидів азоту (NO_x), чадного газу (CO) та інших шкідливих речовин. Це призводить до глобального потепління, забруднення атмосфери та негативного впливу на здоров'я людини.

Зменшення шкідливих викидів та пошук екологічних альтернатив традиційним видам палива є одним з головних викликів сучасної енергетики. У зв'язку з цим все більше уваги приділяється відновлюваним джерелам енергії, серед яких особливе місце займає біогаз. Його виробництво базується на процесах анаеробного бродіння органічних відходів, що не лише дозволяє отримувати екологічно чисту енергію, а й сприяє утилізації відходів сільського господарства, харчової проми-

словості та комунального господарства. До того ж, використання біогазу може знизити залежність від викопних видів палива, що особливо актуально у зв'язку з енергетичними кризами та необхідністю зміцнення енергетичної безпеки. [1]

Оцінка екологічної ефективності біогазу має ключове значення для його подальшого поширення. Одним з важливих аспектів є дослідження рівня викидів, що утворюються в процесі спалювання біогазу. У цій роботі проведено аналіз екологічних викидів під час спалювання біогазу та їх порівняння з викидами природного газу. Це дозволяє оцінити потенційні переваги біогазу як альтернативного джерела енергії, визначити перспективи його ширшого використання в енергетичному секторі та сформулювати наукове підґрунтя для розробки стратегій впровадження біогазових технологій у промислових і комунальних масштабах [2].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Визначення кількісного вмісту шкідливих викидів під час спалювання газоподібного палива залишається однією з ключових екологічних проблем сьогодення. Газоподібні енергоносії, зокрема природний газ, зріджений нафтовий газ (ЗНГ) та біогаз, набули широкого застосування у промисловості та житлово-комунальному господарстві завдяки своїй високій енергоефективності, доступності та порівняно низькому рівню емісій забруднювальних речовин у порівнянні з твердим і рідким паливом.

Проте навіть зі спалюванням газоподібного палива утворюються шкідливі викиди, зокрема оксиди азоту (NO_x), оксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO_2), а також інші леткі органічні сполуки. Згідно з сучасними науковими публікаціями [3], [4], обсяги цих викидів суттєво залежать від хімічного складу палива, умов горіння (температури, тиску), конструкції пальникового пристрою та ступеня ефективності згорання.

Під час спалювання природного газу та біогазу основним джерелом утворення NO_x є термічні процеси, що відбуваються за температур вищих 1300°C , а також реакції з азотом, присутнім у паливному газі та атмосферному повітрі. Зокрема, за використання біогазу, який може містити домішки аміаку, утворення оксидів азоту може бути інтенсифікованим [5].

Одним із пріоритетних напрямів екологічних досліджень є оптимізація процесів спалювання з метою мінімізації шкідливих викидів. Сучасні методи включають низькотемпературне горіння, рециркуляцію димових газів, використання каталітичних нейтралізаторів, а також впровадження автоматизованих систем контролю співвідношення «паливо–повітря». Згідно з результатами досліджень [6], такі технології дозволяють зменшити викиди NO_x на 30...60 % без значного зниження ефективності згорання.

Крім технічних рішень, важливе значення мають нормативні обмеження та екологічні стандарти. Наприклад, Директиви ЄС (2010/75/ЄС про промислові викиди) встановлюють жорсткі ліміти на емісію забруднювальних речовин від спалювання біогазу та природного газу, стимулюючи модернізацію установок [7].

В Україні також зростає інтерес до впровадження сучасних систем спалювання біометану. Зокрема, проєкт МХП «Біогаз 5.0» передбачає використання очищеного біогазу з підвищеним екологічним контролем та виробництвом до 150 млн m^3 біометану щороку [8].

Таким чином, подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані не лише на вдосконалення процесів згорання, а й на розвиток систем моніторингу викидів, цифрових технологій управління та екологічно чистих методів утилізації залишків спалювання.

Метою дослідження є визначення оптимального палива для котла ДКВР-10 з погляду екологічної активності, враховуючи рівень викидів шкідливих речовин та енергоефективність. У рамках цього дослідження особлива увага приділяється аналізу валових викидів діоксиду сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x) та оксиду вуглецю (CO), які є основними забруднювачами атмосфери під час спалювання палива.

Методика дослідження

У науковій літературі розглядаються різні підходи до визначення складу газових сумішей та їхніх фізико-хімічних властивостей. Дослідження у цій сфері мають велике значення, оскільки газові суміші широко використовуються в енергетичній промисловості, хімічному виробництві та екологічних дослідженнях. Особлива увага приділяється ролі основних компонентів, таких як метан (CH_4), діоксид вуглецю (CO_2), кисень (O_2) та сірководень (H_2S). Ці гази впливають на теплотворну

здатність палива, його енергетичну ефективність та екологічну безпеку.

Методи визначення складу газових сумішей базуються на експериментальних та аналітичних дослідженнях. Розроблено спеціальні методики розрахунку питомої маси сумішей з урахуванням внеску кожного компонента. Завдяки цим методам можливо не лише визначити оптимальний склад газової суміші для енергетичних потреб, а й спрогнозувати її вплив на довкілля під час спалювання.

Основою дослідження є визначення оптимального палива для котла ДКВР-10 з погляду екологічної активності, враховуючи рівень викидів шкідливих речовин та енергоефективність. У сучасних умовах екологічна безпека є пріоритетом, оскільки спалювання палива супроводжується утворенням шкідливих речовин, які впливають на атмосферу, водні ресурси та здоров'я людини. Тому важливо не лише оцінювати теплотворну здатність палива, а й аналізувати його вплив на довкілля.

Для проведення дослідження здійснено аналіз процентного складу газових компонентів та визначено питому масу суміші. Важливо враховувати такі фізико-хімічні характеристики, як густина, молярна маса та теплотворна здатність. Ці параметри визначають ефективність горіння газової суміші, а також ступінь утворення шкідливих речовин під час спалювання [9], [10].

Розрахунки базуються на експериментальних даних про склад паливних газів, які містять основні компоненти: метан (CH_4), діоксид вуглецю (CO_2), водень (H_2), а також домішки — оксиди азоту (NO_x), оксид вуглецю (CO) та сірководень (H_2S). Співвідношення цих газів впливає на калорійність палива та його згорання. Наприклад, високий вміст метану забезпечує вищу теплотворну здатність, у той час як підвищений рівень CO_2 та NO_x свідчить про потенційну небезпеку з погляду викидів парникових газів.

Для визначення екологічної активності кожного виду палива проводилося порівняння їхнього впливу на довкілля, зокрема розрахунок обсягів викидів забруднювальних речовин під час спалювання. Оцінено валові викиди таких шкідливих речовин, як SO_2 , NO_x і CO , які є основними забруднювачами повітря. Високий рівень оксидів азоту та діоксиду сірки у вихлопних газах сприяє утворенню кислотних дощів, погіршенню якості повітря та негативному впливу на здоров'я людини.

Діоксид сірки (SO_2) утворюється в процесі спалювання палива, що містить сірку. Показник емісії діоксиду сірки визначається за формулою [11].

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{Q_i^r} \cdot \frac{2S^r}{100} (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II}\beta), \quad (1)$$

де S^r — вміст сірки в паливі, %; η_I — ефективність утримання сірки золою або сорбентами; η_{II} — ефективність очищення димових газів від SO_2 ; Q_i^r — нижча теплота згорання палива, МДж/кг.

Масовий вміст сірки у паливі визначається за допомогою технічного аналізу. За відсутності точних даних використовуються усереднені значення, характерні для відповідних видів палива. Ефективність утримання оксидів сірки золою або спеціальними сорбентами залежить від способу спалювання, складу палива та типу застосованого сорбенту. Під час спалювання твердого палива, що містить лужні та лужноземельні метали, можливе часткове зв'язування сірки у вигляді сульфатів і сульфідів.

Під час спалювання органічного палива утворюються оксиди азоту NO_x (NO і NO_2), які викидаються в атмосферу. Їхні викиди оцінюють у перерахунку на NO_2 за формулою [11]

$$k_{\text{NO}_x} = (k_{\text{NO}_x})_0 f_n (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II} \cdot \beta), \quad (2)$$

де $(k_{\text{NO}_x})_0$ — показник емісії оксидів азоту без урахування заходів скорочення викиду, г/ГДж; f_n — ступінь зменшення викиду NO_x під час роботи на низькому навантаженні; η_I — ефективність первинних скорочень викиду (режимно-технологічних заходів); η_{II} — ефективність вторинних заходів (азотоочисної установки); β — коефіцієнт роботи азотоочисної установки.

Оксиди азоту, що утворюються під час спалювання органічного палива різними технологіями, можуть бути знижені за використання відповідних заходів. Під час роботи енергетичної установки на низькому навантаженні температура горіння палива зменшується, що сприяє скороченню викидів NO_x . Ступінь такого зменшення визначається емпірично, залежно від теплової потужності установки, її номінальних параметрів та інших характеристик.

Діоксид вуглецю (вуглекислий газ CO_2) відноситься до парникових газів і є основним газоподібним продуктом окислення вуглецю органічного палива. Обсяг викиду CO_2 безпосередньо пов'язано з вмістом вуглецю в паливі та ступенем окислення вуглецю палива в енергетичній установці. Оксиди вуглецю (CO_x) утворюються через неповне згоряння палива. Показник емісії визначається за формулою [11]

$$k_{\text{CO}_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r} \varepsilon_C, \quad (3)$$

де C^r — масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу (%); ε_C — ступінь окислення вуглецю палива.

Кількість золи та горючих залишків у шлаку й твердих частин у димових газах встановлюється за результатами технічного аналізу палива, продуктів його згоряння та даних випробувань обладнання. Частка леткої золи, що викидається в атмосферу, залежить від технології спалювання й визначається за паспортними характеристиками енергетичної установки.

Специфічний показник емісії вуглецю розраховується як співвідношення масової частки вуглецю в паливі до його теплоти згоряння. Під час спалювання біогазу утворюється CO , який в ході цього процесу окислюється до CO_2 , тому для оцінювання загальних викидів парникових газів саме CO_2 є основним показником впливу на парниковий ефект.

Результати дослідження

В результаті проведених розрахунків визначено питомі викиди діоксиду сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x) та діоксиду вуглецю (CO_2) для різних видів палива, отримані значення подано у таблиці.

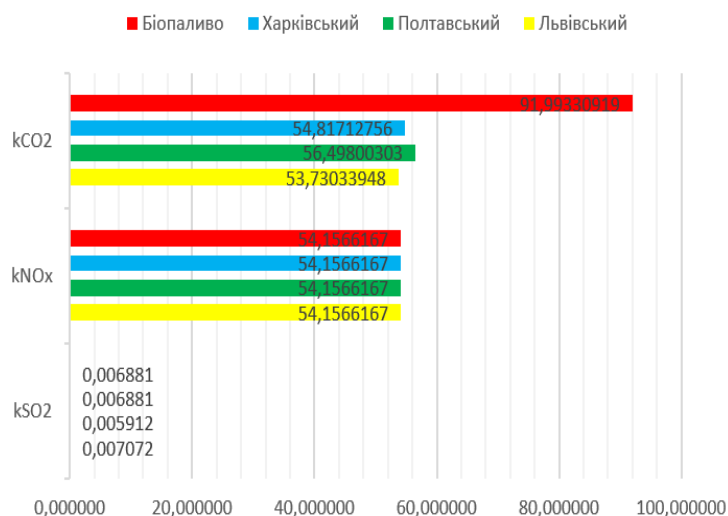
Результати проведених досліджень

Регіон	k_{SO_2} , г/ГДж	k_{NO_x} , г/ГДж	k_{CO_2} , г/ГДж
Львівський	0,007072038	54,16	53,73
Полтавський	0,005911915	54,16	56,50
Харківський	0,006881086	54,16	54,82
Біопаливо	0,000248317	54,16	91,99

У порівнянні з характеристиками видобутку Львівського, Полтавського та Харківського регіонів, біопаливо має значно менший рівень викидів діоксиду сірки (SO_2). Так, для видобутку Львівського, Полтавського та Харківського регіонів питомі викиди SO_2 становлять 0,0071, 0,0059 та 0,0069 г/ГДж відповідно, в той час як для біопалива цей показник лише 0,00025 г/ГДж. Щодо викидів оксидів азоту (NO_x) та діоксиду вуглецю (CO_2), то їх рівень залишається сталим для всіх регіонів (54,16 г/ГДж), але біопаливо показує значно вищі викиди CO_2 (91,99 г/ГДж), що зумовлено його високою енергетичною насиченістю. Загалом, використання біопалива дозволяє значно знизити викиди SO_2 порівняно з традиційними регіональними джерелами енергії, хоча супроводжується підвищеними викидами CO_2 .

Таким чином, отримані результати дозволяють точніше оцінити вплив паливного балансу на рівень забруднення та розробити заходи для зменшення шкідливих викидів.

Показник k_{SO_2} є одним з ключових параметрів, що характеризує рівень забруднення атмосфери діоксидом сірки. Аналіз отриманих даних свідчить, що найнижчий рівень цього показника зафіксовано у Полтавській області, де він становить 0,005912. Це свідчить про порівняно низький рівень викидів цієї сполуки в атмосферу. Львівський регіон



Результати досліджень кількісних показників шкідливих викидів під час спалювання газоподібного палива

демонструє дещо вищий рівень 0,007072, що може бути пов'язано з особливостями складу використаного палива або ефективністю очисних систем. У Харківському регіоні цей показник становить 0,006881, що наближене до середніх значень серед проаналізованих регіонів. Біопаливо, зокрема має аналогічний показник 0,006881, що свідчить про порівнянню з традиційними енергоносіями екологічну ефективність у цьому аспекті.

Показник k_{NO_x} , що характеризує рівень утворення оксидів азоту в процесі спалювання, є однаковим у всіх трьох регіонах та для біопалива. У Львівському, Полтавському та Харківському регіонах цей показник становить 54,1566, що може свідчити про схожі умови згоряння палива та рівень контролю за викидами. Біопаливо також має такий самий рівень 54,1566, що вказує на те, що у контексті утворення оксидів азоту воно не має суттєвих переваг або недоліків порівняно з традиційними видами палива.

Показник k_{CO_2} демонструє найбільшу варіативність між регіонами та типами палива. Найвищий рівень 91,9933 спостерігається у біопалива, що суттєво перевищує показники для всіх інших досліджуваних варіантів. Це може бути наслідком специфіки біопалива, зокрема його хімічного складу та процесів горіння. Полтавський регіон має середній рівень цього показника 56,498, що може свідчити про оптимальніший склад використовуваного палива. Харківський регіон демонструє дещо нижчий рівень 54,8171, через що його він екологічно є одним з найефективніших серед аналізованих варіантів. Найнижчий рівень 53,7303 зафіксовано у Львівському регіоні, що може вказувати на ефективніші технології спалювання або кращу якість використовуваного палива.

Загалом, аналіз отриманих даних свідчить про значні відмінності у рівнях забруднення залежно від типу палива та регіону. Найсуттєвіші відмінності спостерігаються у показника k_{CO_2} , де біопаливо демонструє суттєво вищий рівень викидів, ніж традиційні види палива. Це може бути результатом специфічних хімічних процесів, що відбуваються під час спалювання біопалива, або відмінностей у методології розрахунків. Водночас показники k_{SO_2} та k_{NO_x} мають відносно близькі значення для всіх аналізованих варіантів, що свідчить про схожі процеси утворення цих сполук в процесі згоряння різних видів палива.

Отримані результати можуть бути використані для подальшого аналізу ефективності різних видів палива з погляду їх екологічної безпеки. Вони також можуть стати основою для розробки рекомендацій щодо вдосконалення технологій спалювання та зменшення рівня шкідливих викидів у промисловості та комунальному секторі.

Висновки

У ході дослідження проведено аналіз складу газових сумішей та визначено їхні основні фізико-хімічні характеристики. Отримані результати свідчать, що використання біогазу може суттєво зменшити негативний вплив на довкілля за рахунок скорочення викидів CO_2 та інших шкідливих газів.

Аналіз викидів забруднювальних речовин у різних регіонах показав, що рівень викидів SO_2 (діоксида сірки) є найнижчим у Полтавському регіоні (0,00591 г/ГДж), тоді як у Львівському та Харківському регіонах він становить 0,00707 г/ГДж та 0,00688 г/ГДж відповідно. Викиди NO_x (оксидів азоту) залишаються на однаковому рівні (54,16 г/ГДж) для всіх трьох регіонів. Викиди CO_2 мають незначні коливання: найвищий рівень зафіксовано у Полтавському регіоні (56,50 г/ГДж), тоді як у Харківському він становить 54,82 г/ГДж, а у Львівському — 53,73 г/ГДж.

Хоча теплотворна здатність біогазу нижча порівняно з природним газом через високий вміст CO_2 , його використання сприяє заміщенню викопного палива та утилізації органічних відходів. Це відкриває широкі перспективи для впровадження біогазових технологій у сфері енергетики та комунального господарства.

Таким чином, біогаз є ефективною альтернативою традиційним видам палива, яка дозволяє не лише отримувати енергію, а й вирішувати екологічні проблеми, пов'язані з утилізацією відходів та зниженням викидів парникових газів. Отримані результати свідчать, що впровадження біогазових установок може бути стратегічно вигідним рішенням для регіонів з високою кількістю органічних відходів та сприяти розвитку екологічно чистої енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. І. Ткаченко, і О. М. Бондаренко, «Екологічні аспекти спалювання природного газу», *Екологічний вісник України*, № 2, с. 25-30, 2021.
- [2] М. П. Іванченко, «Оцінка впливу викидів від спалювання газоподібного палива на атмосферне повітря», *Наукові праці Національного університету біоресурсів і природокористування України*, т. 310, № 5, с. 112-118, 2020.

- [3] H. B. Møller, et al., "Agricultural Biogas Production — Climate and Environmental Impacts," *Sustainability*, no. 4 (3), pp. 1849, 2022.
- [4] B. Yang, et al., "Sustainability Assessment of Agricultural Waste Biogas Production System in China." *Agriculture*, no. 14 (11), pp. 1912, 2024.
- [5] A. Alamia, et al., "Optimizing hydrogen and e-methanol production through Power-to-X integration in biogas plants," *ArXiv*: 2406.00442, 2024.
- [6] F. Wu, and S. Pfenninger, "Challenges and Opportunities for Bioenergy in Europe," *ArXiv*:2212.08513, 2022.
- [7] О. Ішук, «Вплив галузі біометану на реструктуризацію ринку газу України та ЄС», *Економіка та суспільство*, № 70, 2024.
- [8] SAF Україна. *Біогаз 5.0 для вуглецевонеїтрального виробництва*, 2024. <https://saf.org.ua/news/2196/>.
- [9] Environmental Protection Agency, "Standards for Air Pollutants from Gas Combustion," *EPA Report 456-78*, Washington, DC, USA, 2017.
- [10] Д. В. Риндюк, Т. В. Шелешей, І. С. Беднарська, і Я. С. Беднарська, «Оцінка впливу марки мазуту на викиди сірчистого ангідриду на енергетичних об'єктах», *Вчені записки Таврійського національного університету імені ВІ Вернадського. Серія: Технічні науки*, № 31(70), с. 231-236, 2020.
- [11] ГКД 34.02.305-2002. *Викиди забруднювальних речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення*. [Чинний від 2002-07-01]. Київ: ОЕП «ГРІФРЕ», 2002.

Рекомендована кафедрою системного аналізу та інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 14.04.2025

Шелешей Тетяна Вікторівна — канд техн. наук, старший викладач кафедри теплової та альтернативної енергетики, e-mail: sheleshey_tanya@ukr.net ;

Рачинський Артур Юрійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики, e-mail: arturrachinskiy@gmail.com ;

Сиваченко Вікторія Анатоліївна — студентка Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

T. V. Sheleshei¹
A. Yu. Rachinskiy¹
V. A. Syvachenko¹

Determination of the Quantitative Content of Harmful Emissions during the Combustion of Gaseous Fuels

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Modern world is increasingly facing problems of environmental pollution and depletion of natural resources. The use of traditional energy sources, such as natural gas, is accompanied by the emission of harmful substances that contribute to global warming and negatively affect human health. In this context, more attention is being paid to the alternative energy sources, particularly biogas, which is produced through anaerobic digestion of organic waste. Biogas can not only provide environmentally clean energy but also contribute to waste disposal, reduce dependence on fossil fuels, and strengthen energy security.

The aim of the research was to determine the optimal fuel for the DKVR-10 boiler in terms of ecological activity, taking into account the levels of harmful emissions and energy efficiency. The analysis was carried out by evaluating the gross emissions of sulfur dioxide (SO₂), nitrogen oxides (NO_x), and carbon monoxide (CO) during the combustion of different types of fuel.

The results of the study showed that biofuel demonstrates significantly lower SO₂ emissions compared to traditional energy sources (0.00025 g/GJ versus 0.0059...0.0071 g/GJ for natural gas). NO_x emissions remain constant for all the fuel types studied (54.16 g/GJ). However, biofuel showed higher levels of CO₂ emissions (91.99 g/GJ), which is explained by its high energy density.

The obtained results allow for a more accurate assessment of the impact of different types of fuel on the environment and contribute to the development of measures to reduce harmful emissions. The use of biofuel is a promising direction for the development of environmentally clean energy, but it requires further improvement of combustion technologies to minimize greenhouse gas emissions.

Keywords: biogas, emissions, ecological activity, energy efficiency, sulfur dioxide, nitrogen oxides, carbon monoxide, greenhouse gases, DKVR-10 boiler.

Sheleshey Tetyana V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Thermal and Alternative Energy, e-mail: sheleshey_tanya@ukr.net ;

Rachynskyi Artur Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Thermal and Alternative Energy, e-mail: arturrachinskiy@gmail.com ;

Syvachenko Victoria A. — Student of the Educational and Scientific Institute of Nuclear and Thermal Energy