
Комплексний розрахунковий аналіз використання біогазу як палива для парового котла "Invest"

Ольга Власенко

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ORCID 0000-0002-8975-0873

Олександр Недбайло

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, Україна

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ORCID 0000-0003-1416-9651

Ірина Ковальчук

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ORCID 0009-0008-1521-0154

Оскар Баланда

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ORCID 0009-0002-3159-6815

Анотація: У роботі проведено визначення зміни у тепловому балансі та розрахунку валових викидів основних забруднюючих речовин при переході з природного газу на біогаз. Методологія включає числовий аналіз теплового балансу та розрахунок викидів на основі складу палива та річного споживання. Встановлено, що перехід на біогаз (складом ~60% CH₄ та ~37% CO₂) призводить до зниження ККД котла на 4-5%. Це падіння пояснюється високим вмістом CO₂, який перешкоджає повноті згоряння та призводить до хімічного недопалу (q_3) на рівні ~5%. Розрахунок валових викидів при річному споживанні біогазу показав значні обсяги емісій. Біогаз є важливою відновлюваною альтернативою, однак його пряме використання в існуючому обладнанні пов'язане з суттєвими компромісами між екологічністю (зниженням парникового ефекту від метану) та операційною ефективністю і локальними викидами.

Основним компонентом біогазу є горючий газ, тобто метан, який вивільняє енергію під час спалювання. Біогаз має високий вміст метану, залежно від процесу ферментації та використаних матеріалів.

Сучасні енергетичні потреби задовольняються переважно трьома видами ресурсів: органічним паливом, водою та ядерною енергією. Енергія води та ядерної енергії використовується після перетворення на електричну енергію. Одночасно значна частина енергії, що міститься в органічному паливі, використовується як тепло; лише частина перетворюється на електрику. Однак в обох випадках виділення енергії з органічного палива пов'язане з його спалюванням і, таким чином, з викидами продуктів згоряння в навколишнє середовище.

Спалювання твердого палива та мазуту вивільняє в атмосферу компоненти золи, що містять незгорілі частинки палива, діоксид сірки та триоксид сірки, оксиди азоту, сполуки ванадію, солі натрію, певну кількість фторованих сполук та газоподібні продукти неповного згоряння. Зола іноді містить не тільки нетоксичні компоненти, але й більш шкідливі

забруднювачі. Теплові електростанції наразі відповідають приблизно за 20% загальних викидів небезпечних промислових відходів в атмосферу.

Головна перевага виробництва біогазу полягає у використанні відновлюваних джерел енергії. Постійна доступність широкого спектру органічних речовин забезпечує безперервне та стає виробництво біогазу, тим самим сприяючи збереженню викопного палива.

Біогазові установки переважно використовують гній тварин та відновлювану сировину. Однак біогенні відходи сільськогосподарської та харчової промисловості, а також побутові відходи відіграють дедалі важливішу роль у виробництві біогазу. Це дозволяє використовувати раніше невикористану первинну сировину, яка становила екологічне навантаження. Ці органічні речовини використовуються окремо або в поєднанні (як косубстрати) з іншими органічними речовинами. Це дозволяє розробляти програми, орієнтовані на конкретні місця, які сприяють ефективному виробництву та використанню біогазу.

Ключові слова: біогаз, паровий котел, тепловий баланс, коефіцієнт корисної дії, валові викиди, оксиди азоту, ефективність спалювання.

1. Вступ

Виснаження традиційних енергетичних ресурсів, зростаючий негативний вплив енергетичного сектору на навколишнє середовище та, як наслідок, посилення екологічних вимог, різкі коливання цін на енергоносії, прагнення зміцнити енергетичну та економічну безпеку, дефіцит постачання енергетичних ресурсів та інші фактори зробили нагальною потребу переглянути поточний стан енергетичного сектору та знайти рішення для його оновлення та відродження.

Залежність від імпорту дорогих енергоресурсів породжує значні соціально-економічні проблеми. Надзвичайний знос національної інфраструктури, зокрема енергетичної, та, як наслідок, низька ефективність використання енергетичних ресурсів частково пояснюють, чому Україна належить до числа енергоємних країн.

Водночас Україна, як і решта країн світу, стикається з проблемою зміни клімату, яка спостерігається з середини 20 століття та є наслідком діяльності людини. У 2015 році 195 країн, включаючи Україну, прийняли Паризьку угоду про зміну клімату. Ця угода спрямована на посилення глобальної відповіді на загрози зміни клімату в рамках сталого розвитку та боротьби з бідністю, зокрема шляхом обмеження глобального потепління до 1,5°C вище доіндустріального рівня. Однак, вже у 2015-2016 роках середня глобальна температура перевищила рівень 1850 року більш ніж на 1°C. Тому терміново необхідно вжити заходів для ефективного та належного реагування на проблему глобальних викидів парникових газів та досягнення цілей Паризької угоди.

Одним із найкомплексніших та найреалістичніших рішень для вирішення цих проблем та адаптації до зміни клімату є повний перехід енергетики від викопного палива до відновлюваних джерел енергії. Цей енергетичний перехід цілком здійснений, оскільки сучасний розвиток передових, наукоємних технологій вже відкрив конкретні перспективи для відновлюваних джерел енергії [1].

Біогаз відіграватиме ключову роль у досягненні довгострокових цілей Європи щодо енергетичної безпеки та захисту клімату як частина перспективного та збалансованого поєднання відновлюваних джерел енергії. Більше того, його переваги виходять далеко за рамки простого скорочення викидів парникових газів.

Біогаз – це найекономічніший та найпростіший у використанні відновлюваний газ, доступний сьогодні. Це енергоносіє, що залежить від попиту та може збалансувати коливання у виробництві відновлюваної енергії. Крім того, біометан (збагачений біогаз) може безпосередньо замінити природний газ і може зберігатися та розподілятися по всій

енергетичній системі з використанням існуючої газової інфраструктури та технологій кінцевого використання [2]. Біогаз та біометан виробляються з різних видів сировини. Існує дві основні технології виробництва біометану: анаеробне розкладання в поєднанні з очищенням та газифікацією біогазу. Газифікація включає термічну газифікацію (або пірогазифікацію), яка перетворює суху деревну або лігноцелюлозну біомасу та тверді відходи, та гідротермальну газифікацію, також відому як надкритична газифікація води, яка перетворює сиру, вологу рідку біомасу. У Європі майже весь біометан наразі виробляється шляхом анаеробного розкладання. Термічна газифікація шляхом синтезу біометану ще не є комерційно доступною та існує лише в пілотному масштабі, тоді як гідротермальна газифікація розвинена ще менше.

Загальний теоретичний потенціал виробництва біометану становить приблизно 26,5 млрд $\text{Нм}^3/\text{рік}$. Цей потенціал включає виробництво біометану з гною, а також потенціал парових земель для вирощування енергетичних культур (кукурудзи, трави, зернових, цукрових буряків тощо), деревної біомаси, соломи та побутових відходів (відходів звалищ, стічних вод).

Використання біогазу як палива для парових котлів є перспективним напрямком енергетичного переходу, що допомагає зменшити залежність від викопного палива та викиди парникових газів. Біогаз має високу теплотворну здатність, але його спалювання неефективне через високий вміст вуглекислого газу (CO_2), що знижує продуктивність котла. Спалювання біогазу призводить до значних викидів забруднюючих речовин, таких як оксиди азоту (NO_x), чадний газ (CO), вуглекислий газ (CO_2), метан (CH_4) та закис азоту (N_2O). Тому важливо вивчити вплив біогазу на викиди в атмосферу при його використанні на електростанціях, зокрема в парових котлах, та знайти шляхи зменшення цих викидів з метою покращення екологічної ситуації.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Теплотехнічні та екологічні процеси при спалюванні біогазу в паровому котлі "Invest". Тепловий баланс, коефіцієнт корисної дії (ККД) та валові викиди забруднюючих речовин (NO_x , CO , CO_2 , CH_4 , N_2O) при роботі котла на біогазі.

3. Мета та задачі дослідження

Метою цієї роботи є аналіз теплового балансу парового котла, що використовує біогаз як паливо, оцінка його продуктивності відносно природного газу, визначення основних факторів, що впливають на зниження продуктивності котла, та визначення валових викидів основних забруднюючих речовин під час спалювання біогазу.

4. Аналіз літератури

Наразі Україна забезпечує себе енергією лише на 50%, а ціни на імпортоване паливо продовжують зростати. Перспективним рішенням для використання біогазу є його спалювання в парових котлах для виробництва тепла. Використання парових котлів різної потужності, що працюють як на традиційному, так і на альтернативному паливі, забезпечує високу економічну ефективність та енергоефективність, забезпечуючи при цьому надійну роботу [3].

Біогаз – це відновлюване джерело енергії на основі легких вуглеводнів, що утворюється шляхом анаеробного розкладання органічної речовини. Його типовий склад змінюється залежно від складу сировини та умов в анаеробному реакторі [4].

Хімічний склад біогазу з біогазових установок складається переважно з метану та вуглекислого газу, а також невеликої кількості сірководню та аміаку. Біогаз також містить мікроелементи, такі як водень, азот та чадний газ. Газова суміш насичена водяною парою та

може містити частинки пилу. Питома теплота згоряння (Q) в основному визначається вмістом CH_4 , оскільки невелика кількість H_2 та H_2S мало впливає на це значення. Тому температура та температура спалаху також залежать від вмісту CH_4 [5].

Очищення біогазу відіграє важливу роль, оскільки склад визначає ефективність згоряння. Основними забруднювачами є волога, вуглекислий газ (CO_2) та сірководень (H_2S). Біогаз також може бути збагачений метаном, досягаючи концентрації до 90%. Це усуває основні проблеми, що виникають під час спалювання біогазу порівняно з природним газом [5]. 1000 м³ природного газу еквівалентно 1500 м³ біогазу [6].

Використання біогазу пропонує переваги не лише з точки зору економії коштів за рахунок заміни природного газу, але й як засіб покращення екологічної ситуації [6].

Традиційно біогаз використовується як паливо для котлів у виробництві тепла або для когенерації на теплоелектростанції (ТЕЦ) [7].

Будівництво установок для зберігання енергії для кращого задоволення попиту залишається критичним завданням. Зараз важливо забезпечити співпрацю між різними енергетичними секторами, щоб гарантувати стабільність та ефективність систем. Біогаз та біометан можна виробляти стабільним способом, використовуючи потужності мережевого зберігання, та виробляти електроенергію відповідно до поточного попиту, забезпечуючи таким чином стабільність мережі та балансування системи.

Важливо зазначити, що біогаз та біометан можна використовувати для виробництва електроенергії, тепла та палива. Тому можливі три стратегії:

- когенерація (або виробництво електроенергії з біогазу), яка дозволяє одночасно виробляти електроенергію та тепло (гарячу воду або пару) та може сприяти балансуванню мережі завдяки своїй гнучкості;
- біометанізація. Надлишок електроенергії перетворюється на воду, яка в поєднанні з біогенним CO_2 утворює біометан. Цей біометан потім можна перекачувати та зберігати в газотранспортних мережах;
- збагачення біогазу до біометану. Біометан може повністю замінити природний газ, використовуючи існуючу інфраструктуру, обладнання та технології кінцевого використання [8].

Житлові будівлі є найбільшими споживачами енергії в ЄС, на них припадає 42% від загального споживання енергії та 36% викидів CO_2 . Понад 23% первинної енергії надходить з відновлюваних джерел. У контексті енергетичного переходу до кліматично нейтрального будівельного сектору, біогаз та біометан пропонують прості у впровадженні та економічно ефективні рішення. Тепло, що утворюється під час спалювання цих газів, може використовуватися для опалення як житлових, так і нежитлових будівель. Котли можна встановлювати на місці або підключати до мережі централізованого теплопостачання.

Відповідні системи для локального виробництва тепла включають міні-ТЕЦ, паливні елементи або складні системи, такі як біометановий котел у поєднанні з електричним тепловим насосом.

Біогаз та біометан – це конкурентоспроможні відновлювані джерела тепла, які можна використовувати для опалення різними способами:

1. Впорскування біометану (біогазу, збагаченого до якості природного газу) у газорозподільну мережу та його використання як палива для високоефективних газових котлів та гібридних теплових насосів в одно- та багатоквартирних будинках.
2. Впорскування тепла в мережу централізованого теплопостачання когенераційними установками (ТЕЦ), що працюють на біометані.
3. У сільській місцевості без підключення до газової мережі біогаз можна спалювати безпосередньо, без попереднього перетворення на біометан, для постачання мережі централізованого теплопостачання.

4. Використання зрідженого біометану та диметилового ефіру, виробленого з відновлюваних джерел, мешканцями одноквартирних будинків без підключення до газової мережі (як заміник мазуту або зрідженого нафтового газу) [9].

Незважаючи на покращення енергоефективності та заходи щодо захисту клімату, транспортний сектор наразі відповідає майже за всі викиди парникових газів у ЄС. Майже три чверті викидів від транспорту в ЄС припадає на автомобільний транспорт. Біометан є стійкою, конкурентоспроможною та легкодоступною альтернативою викопному паливу, особливо для сегментів транспорту на великі відстані та енергоємних перевезень. Як паливо, біометан відіграє ключову роль у переході до кліматично нейтральної економіки [10].

Виробництво біогазу та біометану сприяє вирішенню двох глобальних проблем сучасного життя: зростання кількості органічних відходів у сучасних суспільствах та економіках, а також негативний вплив викидів парникових газів на клімат. Найбільші біогазові проекти в Україні потужністю 10–20 МВт коштують 2000–2500 євро/кВт. Основними факторами вартості інвестицій у біогазові проекти, зокрема ті, що зосереджені на комбінованому виробництві тепла та електроенергії (ТЕЦ), є вартість блоку електростанції (30–40%), будівництво реакторів та інших технічних споруд (35–45%) та технічне обладнання (15–25%). Термін окупності біогазових проектів в Україні може сягати чотирьох років, навіть за умови продажу лише електроенергії за «зеленим» тарифом. Однак потенціал для будівництва таких масштабних проектів обмежений, а ефективність біогазових установок в Україні часто нижча за 50–60%. Термін окупності більшості біогазових проектів в Україні оцінюється в кращому випадку у п'ять-шість років, але щонайменше у сім-вісім років з урахуванням ефективності.

Виробництво біометану з біогазу пов'язане з додатковими витратами на розділення метану та вуглекислого газу. Тому одиниця енергії в біометані дорожча, ніж у біогазі. Біогаз зазвичай використовується лише для виробництва електроенергії та, в деяких випадках, частково для виробництва тепла. Водночас для біометану з'являються нові можливості, зокрема:

- Виробництво електроенергії та тепла з біометану через газотранспортну мережу;
- Зберігання біометану в мережі природного газу для виробництва електроенергії на балансуєчому ринку енергії;
- Використання біометану як палива для міського транспорту та сільського господарства;
- Заміна природного газу біометаном;
- Експорт біометану до ЄС через Національний реєстр виробництва та споживання біометану.

Наразі виробництво біометану в Україні не є конкурентоспроможним за ціною природного газу та потребує підтримки [11]. Донедавна анаеробне бродіння невеликої кількості органічних та харчових відходів вважалося неминучим, але значне збільшення кількості малих біогазових установок заслуговує на увагу. Невеликі, недорогі, прості в експлуатації та автономні, ці виробничі потужності приваблюють як окремих осіб, так і фермерів та інвесторів, які прагнуть впровадити та широко використовувати чисті джерела енергії, особливо враховуючи те, що сировина легкодоступна. Незважаючи на широке впровадження промислових біогазових технологій та переробку великої кількості органічних відходів та залишків, процес утилізації можна оптимізувати. Одним із рішень є використання малих біогазових установок. Сучасні тенденції сприяють модульному проекту — контейнерним біогазовим установкам — а також мобільним установкам — біогазовим установкам, що працюють за принципом «виробництво газу там, де потрібно». Малі біогазові установки, або установки малої потужності, призначені для переробки невеликих обсягів відходів та органічних залишків. Вони особливо добре підходять для невеликих ферм, домогосподарств, дачних кооперативів та подібних підприємств. В Україні до малих біогазових установок належать ті, що мають виробничу потужність до 300-500 кВт, тоді як у більшості європейських країн установки потужністю менше 80 кВт (зазвичай до 75 кВт) вважаються малими. Ці установки працюють з потужністю 10 кВт·год на добу, виробляючи від 100 до 200 ккал та переробляючи від 200 до 5000 тонн органічних відходів на рік. Тому

мінливість доступних потужностей біогазових установок та обсягів залишків дозволяє пропонувати аналогічні рішення домогосподарствам, малому бізнесу та малим та середнім підприємствам.

Наразі виробництво біометану в Україні не є конкурентоспроможним з цінами на природний газ і потребує підтримки [11].

Донедавна анаеробне розкладання невеликих обсягів органічних та харчових відходів вважалося нерентабельним. Однак спостерігається значне збільшення кількості малих біогазових установок. Менші, дешевші, прості в експлуатації та автономні, ці установки приваблюють окремих осіб, фермерів та інвесторів — усіх, хто бажає впровадити та широко використовувати чисті джерела енергії, особливо враховуючи, що сировина знаходиться буквально поруч.

Незважаючи на широке використання промислових біогазових технологій та переробку великих обсягів органічних відходів та залишків, їхню цінність все ще можна оптимізувати. Одним із рішень є використання біогазових установок малої потужності. Сучасні тенденції сприяють модульному проекту (концентровані біогазові установки) та мобільним установкам (біогазові установки, що працюють за принципом виробництва газу на вимогу). Малі біогазові установки, або установки малої потужності, призначені для переробки невеликої кількості органічних відходів та залишків. Вони особливо добре підходять для невеликих фермерських господарств, кооперативів дачних будинків та подібних підприємств.

В Україні до малих біогазових установок належать ті, що мають виробничу потужність до 300-500 кВт, тоді як у більшості європейських країн установки потужністю менше 80 кВт (зазвичай до 75 кВт) вважаються малими.

Біогазова установка малої потужності може переробляти органічні відходи обсягом від 10 кг на день, що еквівалентно гною від 100 до 200 корів, та від 200 до 5000 тонн органічних відходів на рік. Тому виробнича потужність залежить від наявних обсягів відходів та залишків. Таким чином, ці рішення цікаві для приватних осіб, малих фермерських господарств, малих та середніх підприємств.

5. Методи досліджень

Ефективність використання палива в котлі визначається двома факторами: повним згорянням та охолодженням продуктів згоряння.

Більша частина тепла, що підводиться до котла, поглинається поверхнями нагріву та передається теплоносію. Це тепло нагріває мережеву воду в котлах гарячого водопостачання, а в парогенераторах живильна вода кипить, випаровується, а пара перегрівається. Це тепло використовується з користю.

Решта тепла, приблизно від 6 до 20%, не використовується для виробництва та перегріву пари. Це пов'язано з різними видами втрат тепла, властивих роботі котла.

Розподіл корисного тепла та тепла, що підводиться до котла, визначається шляхом розрахунку теплового балансу котла [12].

У цій роботі представлено числове моделювання роботи парового котла Invest, що працює на біогазі та природному газі, виконане за розрахунковим методом [13]. Також були досліджені характеристики валових викидів в атмосферу під час роботи парового котла Invest на біогазі.

Розрахунок проведено для двох видів палива:

- природного газу складом: CH_4 – 98,3%; C_2H_6 – 0,28%; C_3H_8 – 0,11%; C_4H_{10} – 0,14%; C_5H_{12} – 0,03%; C_6H_{14} – 0,02%; N_2 – 1%; CO_2 – 0,1%; H_2S – 0%; CO – 0%; O_2 – 0,02%; Q_p^u – 35716 КДж/м³, при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1$;

- біогазу складом: CH_4 – 60%; H_2 – 0,02%; H_2S – 0,96%; CO – 0,02%; N_2 – 2%; CO_2 – 37%; і теплота згоряння Q_p^u – 24000 КДж/м³, надлишок повітря $\alpha = 1,15$.

Експлуатаційні дані для роботи котла на біогазі:

- Річне споживання: $V = 13\,306\,809 \text{ м}^3/\text{рік}$.
- Густина сухого біогазу: $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.
- Масова витрата: $m = 15\,916,9 \text{ т/рік}$.

Під час оцінки валових викидів враховується хімічний склад біогазу. Масовий елементний склад сухого біогазу та питомий об'єм сухих димових газів визначаються згідно із залежностями розрахункового методу [13].

Показники викидів (y г/ГДж) розраховуються за допомогою стандартизованих методів, що базуються на фундаментальних характеристиках палива.

Наприклад, показник емісії діоксиду вуглецю k_{CO_2} визначається розрахунковим методом на основі масового вмісту вуглецю, що згорає (C), нижчої теплоти згорання ($Q_{\text{нну}}^p$) та ступеня окислення вуглецю (e_c) (1):

$$k_{\text{CO}_2} = 36667 \cdot C' / Q_{\text{нну}}^p \cdot e_c = 36667 \cdot 43,53 / 21,53 \cdot 0,995 = 73767,9 \text{ г/ГДж} \quad (1)$$

Аналогічним чином, на основі властивостей палива та умов горіння, визначаються показники емісії для інших забруднюючих речовин:

- $k_{\text{NO}_x} = 67,41 \text{ г/ГДж}$;
- $k_{\text{CO}} = 20,94 \text{ г/ГДж}$;
- $k_{\text{N}_2\text{O}} = 0,1 \text{ г/ГДж}$;
- $k_{\text{CH}_4} = 1,0 \text{ г/ГДж}$.

Валові викиди (E , т/рік) розраховуються як сумарна маса забруднюючої речовини, що залежить від показника емісії (k), загальної кількості енергії, виробленої котлом (Q) та масової витрати палива (m).

6. Результати досліджень

У числовому дослідженні для розрахунку спалювання біогазу використовувалися різні значення відсотка незгорілого палива, це вказує на те, що заміна природного газу біогазом має як очевидні переваги – нижчу ціну – так і недоліки – зниження ККД котла [14].

Порівняння значень ККД, отриманих з біогазом та природним газом (рис. 1) для різних значень незгорілого палива, показує, що ККД парового котла знижується на 4–5%. Розрахунки встановили, що для відсотка незгорілого палива q_3 , що дорівнює 5%, різниця в ККД становить 5%.

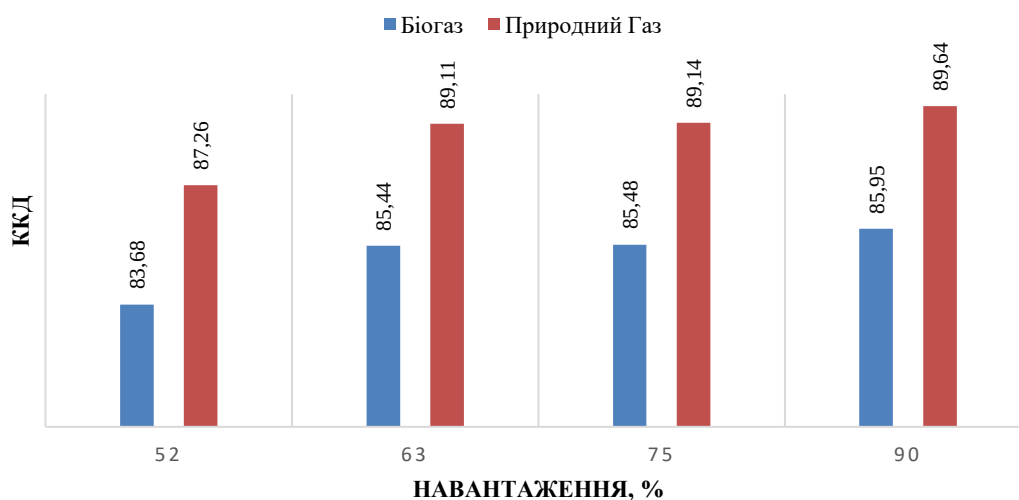


Рис. 1. Вплив навантаження котла на його ККД при використанні різних типів палива.

Зниження ефективності котла при переході з природного газу на біогаз зумовлене високою концентрацією вуглекислого газу (CO_2) в останньому. Під час горіння CO_2 запобігає потраплянню молекул кисню (O_2) до молекул метану (CH_4), що впливає на ефективність

горіння біогазу. Таким чином, висока концентрація вуглекислого газу (CO_2) у біогазі має подвійний негативний вплив:

1. Тепловий: Він знижує температуру адіабатичного горіння та погіршує теплообмін, що призводить до прямих втрат тепла через незгорілі частинки (q_3) приблизно на 5% і, як наслідок, до зниження загального ККД котла.

2. Екологічний: Цей самий механізм втрат тепла, пов'язаний з незгорілими частинками (q_3), також є прямим джерелом утворення забруднюючої речовини: чадного газу (CO). Крім того, коефіцієнт надлишку повітря ($\alpha = 1,15$), обраний для забезпечення стабільного горіння цього низькокалорійного палива, стає визначальним фактором в утворенні іншої небезпечної сполуки: оксидів азоту (NO_x).

Таблиця 1. Приведені викиди при спалюванні біогазу ($\alpha=1,15$)

№п/п	Показник		Од. вим.	Навантаження, %			
				52	63	75	90
1	Масова концентрація						
	- оксида вуглецю	C_{CO}	мг/м ³	29	48	83	98
	- оксида азоту	C_{NO_x}	мг/м ³	236	245	306	316
2	Умовний викид на 1Гкал:						
	- оксида вуглецю	B_{CO}	г/Гкал	31,2	52,5	90,7	107,0
	- оксида азоту	B_{NO_x}	г/Гкал	256	266	333	344
3	Умовний викид на 1000 м ³ палива:						
	- оксида вуглецю	B_{CO}	кг/т.м ³	0,16	0,28	0,48	0,56
	- оксида азоту	B_{NO_x}	кг/т.м ³	1,35	1,40	1,76	1,81
4	Секундний викид:						
	- оксида вуглецю	M_{CO}	г/сек	0,080	0,165	0,338	0,474
	- оксида азоту	M_{NO_x}	г/сек	0,657	0,836	1,243	1,525

Таблиця 2. Приведені викиди при спалюванні природного газу ($\alpha=1$)

№п/п	Показник		Од. вим.	Навантаження, %			
				52	63	75	90
1	Масова концентрація при						
	- оксида вуглецю	C_{CO}	мг/м ³	25	42	72	85
	- оксида азоту	C_{NO_x}	мг/м ³	205	213	266	275
2	Умовний викид на 1Гкал:						
	- оксида вуглецю	B_{CO}	г/Гкал	27,1	45,6	78,8	93,0
	- оксида азоту	B_{NO_x}	г/Гкал	222	231	290	300
3	Умовний викид на 1000 м ³ палива:						
	- оксида вуглецю	B_{CO}	кг/т.м ³	0,21	0,35	0,60	0,70
	- оксида азоту	B_{NO_x}	кг/т.м ³	1,69	1,75	2,20	2,26
4	Секундний викид:						
	- оксида вуглецю	M_{CO}	г/сек	0,067	0,138	0,282	0,395
	- оксида азоту	M_{NO_x}	г/сек	0,548	0,697	1,037	1,272

Для кількісної оцінки впливу на навколишнє середовище було проведено детальний розрахунок масових концентрацій та питомих викидів CO та NO_x. Результати для різних режимів роботи представлені в таблицях 1 (біогаз) та 2 (природний газ).

При аналізі даних в таб.1 і таб. 2 виявлено наступне:

1. Димові гази від біогазу (Таблиця 1) справді містять більше забруднюючих речовин (наприклад, NO_x до 316 мг/м³), ніж димові гази від природного газу (NO_x до 275 мг/м³). Однак умовні викиди на 1000 м³ палива нижчі при використанні біогазу (1,81 кг NO_x), ніж при використанні природного газу (2,26 кг NO_x). Це пояснюється тим, що 1 м³ біогазу, з його низькою теплотворною здатністю, виробляє значно менший об'єм димових газів через стехіометричні відмінності.

2. Для котла важлива не кількість спаленого палива, а кількість отриманого тепла. У цьому випадку вирішальне значення мають показники (г/Гкал). Для отримання 1 Гкал тепла біогаз забруднює атмосферу більше (NO_x до 314 г/Гкал), ніж природний газ (NO_x до 300 г/Гкал). Це пов'язано з низькою калорійністю біогазу: для підтримки тієї ж вихідної потужності необхідно спалювати більшу кількість, що призводить до вищих фактичних вторинних викидів (NO_x до 1,525 г/с у біогазі проти 1,272 г/с у природному газі). Проведений аналіз питомих показників (табл. 1,2) дозволяє перейти до оцінки сумарного річного навантаження на атмосферу. Для цього використовуються показники емісії (к, в г/ГДж) та річна масова витрата біогазу ($m = 15916,9$ т/рік).

Річні валові викиди для парового котла "Invest" при роботі на біогазі складають:

- валовий викид оксиду азоту (у перерахунку на діоксид азоту) $E_{NO_x} = 23,1$ т;
- валовий викид оксиду вуглецю $E_{CO} = 7,176$ т;
- валовий викид діоксиду вуглецю $E_{CO_2} = 25278,6$ т;
- валовий викид метану $E_{CH_4} = 0,3427$ т;
- валовий викид азоту оксиду $E_{N_2O} = 0,0343$ т.

Розрахунок валових (річних) викидів є ключовим і завершальним кроком в оцінці впливу на навколишнє середовище. Він перетворює теоретичні характеристики палива та процесу горіння на конкретну та кількісно вимірювану міру впливу на навколишнє середовище протягом тривалого періоду експлуатації. Це демонструє, що заміна природного газу неочищеним біогазом, хоча й вирішує проблему утилізації відходів, не є автоматичним рішенням екологічних проблем. Це призводить до значних щорічних викидів NO_x та CO₂, що є прямим наслідком низької теплотворної здатності палива та, отже, вищих питомих викидів на одиницю виробленої енергії.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Подальший розвиток та впровадження біогазових технологій в енергетику України є актуальним. Дане дослідження доводить, що такий перехід вимагає глибокого, кількісного розуміння реальних експлуатаційних викликів та інженерних компромісів.

У роботі закладено основу для такого аналізу: було кількісно визначено, що пряма заміна природного газу на неочищений біогаз в існуючому котельному обладнанні призводить до суттєвого падіння ККД (4-5%) та значних валових викидів забруднюючих речовин, зокрема NO_x (23,1 т/рік). Встановлено прямий зв'язок між першопричиною – високим вмістом баластного газу CO₂ (37%) – та наслідками: зростанням втрат від хімічного недопалу ($q_3 \sim 5\%$) та погіршенням екологічних показників на одиницю виробленої енергії (г/Гкал).

Виходячи з отриманих результатів, перспективи подальших досліджень розвиваються у трьох основних напрямках:

1. Техніко-економічний аналіз систем збагачення біогазу.

Оскільки головною причиною зниження ККД та погіршення процесу горіння є баластний CO₂, першочерговим завданням є дослідження доцільності його видалення перед спалюванням. Подальша робота має бути зосереджена на техніко-економічній оцінці різних

технологій очищення (наприклад, мембранних, адсорбційних, хімічних) у контексті даного об'єкта. Необхідно порівняти капітальні та операційні витрати на систему очищення біогазу до стану біометану з сумарною економічною вигодою від підвищення ККД котла до рівня природного газу, зниження річної потреби в паливі та зменшення викидів.

2. Моделювання та оптимізація конструкції котлоагрегату.

Альтернативою до зміни палива є адаптація обладнання. Поточне дослідження базувалося на номінальному коефіцієнті надлишку повітря ($\alpha=1,15$) для низькокалорійного палива. Перспективним є проведення серії числових експериментів для дослідження чутливості системи — моделювання утворення NO_x та CO при зміні α . Крім того, необхідний поглиблений аналіз конструктивних рішень, зокрема модернізації пальникових пристроїв (наприклад, впровадження ступінчастого спалювання, рециркуляції димових газів або вихрові пальники), з метою їх адаптації до стабільного та ефективного спалювання низькокалорійних газів для мінімізації хімічного недопалу (q_3) та викидів CO .

3. Експериментальна верифікація розрахункових даних.

Дана робота є числовим розрахунковим дослідженням. Критично важливим наступним етапом є проведення натурних вимірювань на реальному паровому котлі "Invest" з використанням каліброваних газоаналізаторів. Це дозволить верифікувати отримані розрахункові моделі, підтвердити фактичні масові концентрації (мг/м^3) та валові викиди (т/рік) NO_x і CO , а також уточнити реальний відсоток хімічного недопалу (q_3) в умовах реальної експлуатації. Це поглибить знання про механізми теплообміну та горіння і підвищить точність оцінки інтенсивності емісій.

8. Висновки

На основі проведеного комплексного розрахункового аналізу встановлено:

1. Переведення парового котла "Invest" з природного газу на біогаз (складом 60% CH_4 та 37% CO_2) призводить до зниження теплової ефективності (ККД) котла на 4-5%.

2. Основною причиною падіння ККД є високий вміст баластного CO_2 , який погіршує умови горіння та призводить до зростання втрат від хімічного недопалу (q_3) до 5%, що, в свою чергу, є прямим джерелом утворення оксиду вуглецю (CO).

3. Через низьку теплотворну здатність та вищий коефіцієнт надлишку повітря ($\alpha=1,15$), спалювання біогазу генерує вищі питомі викиди на одиницю виробленої енергії (г/Гкал) порівняно з природним газом.

4. Розрахунок валових викидів при річному споживанні 13,3 млн м^3 біогазу показав значне сумарне навантаження на атмосферу, зокрема 23,1 т/рік оксидів азоту (NO_x) та 7,176 т/рік оксиду вуглецю (CO).

5. Дослідження доводить, що пряме використання неочищеного біогазу в існуючому обладнанні є компромісом, який, вирішуючи питання ВДЕ, створює суттєві локальні екологічні викиди та знижує операційну ефективність.

Список літератури:

- 1) Energy Transition in Ukraine [Online]. Access mode: https://energytransition.in.ua/wp-content/uploads/2018/11/Perehid-Ukrainy-na-vidnovlyuvanu-energetiky-do-2050_zvit.pdf
- 2) European Biogas Association [Online]. Access mode: <https://www.europeanbiogas.eu/eba-campaign-2023/>
- 3) Stepanov, D., Tkachenko, S., Bodnar, L., Lysyuk, I. and Gorobets, K. (2010) "Development of low-power water heating boilers using traditional and alternative fuels", Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies, 1(1), pp. 13–16. [Online]. Access mode: <https://chiffa.org/JournalEngine/engine/index.php/msj/article/view/12> (Accessed: 27 February 2025).

- 4) Simulation of biogas co-combustion in CFB boiler: Combustion analysis using the CPFD method [Online]. Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X24006415>
- 5) Methods for increasing the energy and environmental efficiency of an industrial biogas boiler [Online]. Access mode: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2018/03/1-%D0%91%D1%96%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7.pdf>
- 6) Methods for increasing the energy and environmental efficiency of an industrial biogas boiler [Online]. Access mode: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2018/03/1-%D0%91%D1%96%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7.pdf>
- 7) Chernousenko, O., Vlasenko, O. (2024). Use of biogas in gas turbines for the production of heat and electricity. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment, (1), 30–37. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.01.04>
- 8) SAF Platform: How Biogas Impairs Energy System Integration? [Online]. Access mode: <https://saf-org-ua.translate.goog/news/1635/? x tr sl=en& x tr tl=uk& x tr hl=uk& x tr pto=wapp>
- 9) EBA Newsletter "Heating", UABIO [Online]. Access mode: <https://uabio-org.translate.goog/materials/15227/? x tr sl=en& x tr tl=uk& x tr hl=uk& x tr pto=wapp>
- 10) EBA Newsletter "Transport", UABIO [Online]. Access mode: <https://uabio-org.translate.goog/materials/14890/? x tr sl=en& x tr tl=uk& x tr hl=uk& x tr pto=wapp>
- 11) Bioenergy Association of Ukraine [Online]. Access mode: <https://uabio.org/biogas-and-biomethane/>
- 12) Boiler installations: a textbook / S. Y. Tkachenko, D. V. Stepanov, L. A. Bodnar. – Vinnytsia: VNTU, 2016. – 185 p.
- 13) Calculation of the theoretical composition of combustion products and combustion temperature of organic fuels: Methodological instructions for performing calculation work in the courses "Fuel combustion and equipment for its combustion". Compiled by: O.A. Siry, L.S. Butovsky, O.O. Granovskaia – Kyiv: "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2017.- 39 p.
- 14) Kuris Yu.V. Increasing the heat-technical and environmental indicators of biogas combustion in heat-generating equipment / Kuris Yu.V. //Kyiv. – 2007.

Comprehensive calculation analysis of the use of biogas as fuel for the "Invest" steam boiler

Olha Vlasenko

Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-8975-0873

Oleksandr Nedbailo

Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0003-1416-9651

Iryna Kovalchuk

Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID 0009-0008-1521-0154

Oscar Balanda

Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID 0009-0002-3159-6815

Abstract: The work determines the change in the heat balance and calculates the gross emissions of major pollutants when switching from natural gas to biogas. The methodology includes a numerical analysis of the heat balance and the calculation of emissions based on the fuel composition and annual consumption. It is established that the transition to biogas (composed of ~60% CH₄ and ~37% CO₂) leads to a decrease in boiler efficiency by 4-5%. This decrease is explained by the high CO₂ content, which prevents complete combustion and leads to chemical underburning (q₃) at the level of ~5%. The calculation of gross emissions with annual biogas consumption showed significant emissions. Biogas is an important renewable alternative, however, its direct use in existing equipment is associated with significant trade-offs between environmental friendliness (reduction of the greenhouse effect from methane) and operational efficiency and local emissions.

The main component of biogas is a combustible gas, i.e. methane, which releases energy during combustion. Biogas has a high methane content, depending on the fermentation process and the materials used.

Modern energy needs are met mainly by three types of resources: organic fuels, water and nuclear energy. The energy of water and nuclear energy is used after conversion into electrical energy. At the same time, a significant part of the energy contained in organic fuels is used as heat; only a part is converted into electricity. However, in both cases, the release of energy from organic fuels is associated with its combustion and, thus, with the emission of combustion products into the environment.

The combustion of solid fuels and fuel oil releases into the atmosphere ash components containing unburned fuel particles, sulfur dioxide and sulfur trioxide, nitrogen oxides, vanadium compounds, sodium salts, a certain amount of fluorinated compounds and gaseous products of incomplete combustion. Ash sometimes contains not only non-toxic components, but also more harmful pollutants. Thermal power plants are currently responsible for approximately 20% of the total emissions of hazardous industrial waste into the atmosphere.

The main advantage of biogas production is the use of renewable energy sources. The constant availability of a wide range of organic substances ensures continuous and sustainable biogas production, thereby contributing to the conservation of fossil fuels.

Biogas plants mainly use animal manure and renewable raw materials. However, biogenic waste from the agricultural and food industries, as well as household waste, is playing an increasingly important role in biogas production. This allows the use of previously unused primary raw materials that have been an environmental burden. These organic substances are used alone or in combination (as co-substrates) with other organic substances. This allows the development of site-specific programs that promote the efficient production and use of biogas.

Keywords: biogas, steam boiler, heat balance, efficiency, gross emissions, nitrogen oxides, combustion efficiency.
