

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 678:617:615.4(076.5)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/26>**Єфіменко О.В.**<https://orcid.org/0009-0009-9273-539X>

Публічне акціонерне товариство «Національна акціонерна компанія «Нафтогаз України»

ВИЗНАЧЕННЯ КОМПОНЕНТНОГО СКЛАДУ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БІОМЕТАНУ ХРОМАТОГРАФІЧНИМ МЕТОДОМ

Стаття присвячена перспективам розвитку виробництва біометану в Україні та методам оцінки його якісних характеристик. Розглянуто вимоги нормативних документів щодо складу, фізико-хімічних та енергетичних показників біометану. Наголошено, що для безпечної інтеграції в газотранспортну систему та ефективного використання в енергетичних установках необхідне точне визначення цих показників, що забезпечує надійну експлуатацію обладнання та сприяє масштабуванню виробництва.

У роботі детально проаналізовано переваги хроматографічного методу для визначення компонентного складу біометану. Зокрема, метод дозволяє точно оцінювати фізико-хімічні показники, що забезпечує надійність і достовірність отриманих результатів.

Результати експериментальних досліджень показали, що досліджений методом хроматографії виготовлений виробниками України біометан за своїми фізико-хімічними характеристиками відповідає нормативно-правовим актам, що регулюють питання якості природного газу в Україні. Найкращі результати щодо дотримання значень вищої теплоти згоряння на рівні 36,20 МДж/м³ досягається за концентрації метану на рівні 97,6 % мол. і вище. Окремо описано методи підвищення теплоти згоряння біометану, що дозволяють оптимізувати його енергетичні властивості для ефективного використання в енергетичному секторі.

Проаналізовано основні джерела утворення біогазу, запропоновано класифікацію та охарактеризовано різновиди сировини, яка може ефективно використовуватися для виробництва біометану. Значну увагу приділено праву виробників біометану на отримання доступу до газотранспортних і газорозподільних систем, газосховищ, установки LNG. Наведено основні переваги виробництва і використання біометану як відновлювального джерела енергії. Окреслено економічні, екологічні та стратегічні можливості, які відкриває розвиток цього виду палива, зокрема зменшення енергетичної залежності, стимулювання експорту та декарбонізацію енергетичного сектору.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, біогаз, оновлення біогазу, біометан, фізико-хімічні показники, газова хроматографія, енергетичні показник.

Постановка проблеми. На даний час, основною тенденцією розвитку сучасного енергетичного сектора є поступовий перехід до відновлюваних джерел енергії, серед яких важливе місце посідає біометан – екологічно чистий газоподібний енергоносіє, отриманий шляхом оновлення біогазу до складу, подібного за характеристиками до природного газу. Біометан, як і природний газ за своїми фізико-хімічними властивостями має відповідати вимогам чинних нормативно-правових актів для його подачі до газотранспортної або газорозподільної системи [1-2].

Недостатній контроль якості на етапах виробництва та транспортування може призвести до подачі в мережу газу, що не відповідає нормам, створюючи технічні ризики та загрозу аварій.

Якість біометану є критичним фактором, що визначає можливість його безпечного та ефективного використання в енергетичному секторі, транспортній галузі та у системах газорозподілу. Незважаючи на значний потенціал цього енергоносія, процес його виробництва пов'язаний із низкою технологічних та організаційних викликів,



які впливають на кінцеві фізико-хімічні характеристики продукту.

Однією з ключових проблем є варіативність складу сирого біогазу, яка залежить від типу та походження субстратів, умов анаеробного зброджування, параметрів роботи біореакторів та стабільності мікробіологічних процесів. Ці чинники впливають на концентрацію метану, вміст діоксиду вуглецю, сірководню, аміаку та інших домішок, що потребують ретельного очищення.

Наступним важливим аспектом є недосконалість або недостатня ефективність технологій апгрейдингу, спрямованих на вилучення домішок та доведення біометану до стандартів природного газу. Високий рівень залишкового CO_2 , H_2S , водяної пари чи силосанів може зумовлювати корозійні процеси, пошкодження газового обладнання, зниження теплоти згоряння та загальну нестабільність роботи газотранспортних систем.

Не менш суттєвою є проблема недостатності стандартизації та контролю якості в деяких країнах чи регіонах. Невідповідність нормативам, зокрема щодо теплоти згоряння, тиску пари, вмісту кисню та механічних домішок, створює ризики для інтеграції біометану в існуючі інфраструктури. Такі розбіжності можуть призвести до технологічних збоїв, зниження енергоефективності системи та загроз екологічній безпеці.

Актуальність визначення компонентного складу та фізико-хімічних показників біометану зростає в умовах глобальної енергетичної трансформації та розвитку відновлюваних джерел енергії в Україні. Біометан є перспективним альтернативним газовим ресурсом, здатним частково замінювати традиційний природний газ у промислових, комунальних та енергетичних системах, сприяючи зниженню викидів парникових газів та підвищенню енергетичної безпеки країни. Його ефективне використання можливе лише за умови точного визначення компонентного складу та фізико-хімічних характеристик, що впливають на енергетичні показники, такі як вища теплота згоряння, склад газових домішок, а також безпеку експлуатації обладнання.

Хроматографічний метод дослідження газових сумішей є одним із найнадійніших і точних способів визначення складових компонентів біометану. Він дозволяє контролювати концентрацію основних і допоміжних газів, що входять до складу біометану, а також оцінювати параметри, критичні для його енергетичної ефективності та відповідності нормативним вимогам до природного газу. Надійний контроль фізико-хімічних

показників є необхідною умовою для інтеграції біометану у газотранспортну систему та використання його в енергетичних установках без ризику пошкодження обладнання і зниження ефективності процесів.

Важливим аспектом масштабного впровадження біометану є забезпечення виробників доступом до існуючих газотранспортних мереж. Це дозволяє ефективно транспортувати та змішувати біометан із природним газом, забезпечувати стабільність постачання та дотримання встановлених стандартів якості. У свою чергу, точний аналіз компонентного складу та фізико-хімічних показників газу дозволяє оптимізувати енергетичні властивості біометану, підвищуючи його теплоту згоряння та енергетичну цінність.

Основні проблеми біометану пов'язані з нестабільністю якості газу, яка може варіюватися залежно від складу сировини та ефективності технологій очищення, що ускладнює його інтеграцію у газотранспортні мережі [2-4].

Сукупність зазначених факторів формує комплексну проблему забезпечення стабільної та високої якості біометану. Її вирішення потребує вдосконалення технологічних процесів очищення, підвищення рівня контролю параметрів продукції, гармонізації стандартів та впровадження сучасних систем моніторингу в режимі реального часу.

Таким чином, комплексне вирішення проблеми визначення компонентного складу та фізико-хімічних характеристик біометану є ключовим для розвитку ринку альтернативних газових ресурсів в Україні. Поєднання надійного контролю якості газу з можливістю доступу виробників до газових мереж забезпечує безпечне, ефективне та масштабне використання біометану у промисловому секторі та енергетиці, сприяючи підвищенню енергетичної незалежності та впровадженню стійких технологій відновлюваної енергетики.

Тому комплексні дослідження, спрямовані на визначення показників якості біометану, є вкрай актуальними, оскільки вони забезпечують контроль його фізико-хімічних та енергетичних характеристик, гарантують безпечне використання в газотранспортних системах і енергетичних установках, а також сприяють збільшенню виробництва цього альтернативного енергоресурсу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасна енергетика орієнтована на впровадження відновлюваних джерел енергії, серед яких особливе значення має біометан. Використання біометану забезпечує суттєве скорочення викидів парникових газів завдяки заміщенню викопного

природного газу та запобіганню неконтрольованому розкладу органічних відходів. Переробка біомаси у біометан дозволяє раціонально утилізувати аграрні, харчові та комунальні відходи, перетворюючи їх на високоякісне паливо. Це, у свою чергу, підвищує енергетичну автономність держави, зменшуючи залежність від імпортованих енергоносіїв та зміцнюючи національну енергетичну безпеку[5].

Ключовими перевагами розвитку виробництва біометану є:

- *Енергетична відновлюваність*: біометан отримується з органічних відходів (сільськогосподарських, харчових, побутових), що робить його відновлюваним джерелом енергії.

- *Зниження викидів парникових газів*: використання біометану замість природного газу дозволяє скоротити викиди CO₂, CH₄ та інших шкідливих газів, що сприяє боротьбі з глобальним потеплінням.

- *Екологічна безпека*: переробка органічних відходів у біометан зменшує накопичення відходів, запобігає забрудненню ґрунту й води.

- *Енергетична незалежність*: виробництво біометану на місцевому рівні знижує залежність від імпорту природного газу, що особливо актуально для України.

- *Економічна вигідність*: створення біометанових установок сприяє розвитку місцевого бізнесу та нових робочих місць, а також підвищує ефективність сільськогосподарських відходів.

- *Стабільність і сумісність*: біометан має подібні фізико-хімічні

властивості до природного газу, що дозволяє інтегрувати його у існуючі газотранспортні мережі та використовувати у звичайних газових установках без значних модифікацій.

- *Можливість використання біогазового осаду*: після виробництва біометану залишається біогазовий осад, який можна застосовувати як високоякісне органічне добриво.

Біометан розглядається як паливо майбутнього завдяки своїй відновлюваній природі та екологічній безпеці, однак для його ефективного використання необхідно суворо контролювати технологічні процеси виробництва. Забезпечення стабільної якості газу є критично важливим для безпечного та надійного підключення біометану до газових мереж і підтримки стабільності енергетичної системи [7].

Постановка завдання. Метою даної роботи є комплексне дослідження фізико-хімічних властивостей біометану, а саме: визначення густини,

відносної густини, вищої та нижчої теплоти згоряння, числа Воббе та оцінка відповідності отриманих параметрів чинним нормативно-правовим актам, що регламентують показники якості природного газу для його подачі до газотранспортних і газорозподільних систем. Отримані результати спрямовані на забезпечення безпечного та ефективного використання біометану в енергетичному секторі та науково обґрунтовану інтеграцію цього відновлюваного енергоносія в сучасні газові мережі.

Виклад основного матеріалу. Сучасні дослідження свідчать про активне зростання виробництва біометану в Україні, що зумовлено необхідністю диверсифікації енергоресурсів та зниження викидів парникових газів. Основними напрямками розвитку є пошук та використання ефективної сировини, підвищення якості біогазу до рівня біометану та його інтеграція в існуючі газові мережі.

Водночас інтенсифікація виробництва біометану ставить нові технологічні та експлуатаційні виклики. Зокрема, критичним є забезпечення безперебійного постачання та підготовки сировини з урахуванням її біохімічного складу та енергетичного потенціалу. Значна увага приділяється технологіям очищення та підвищення якості газу, зокрема застосуванню сорбентів, мембранних систем та багатоступеневих фільтраційних процесів для видалення механічних домішок, сірководню та інших небажаних компонентів. Додатково важливо контролювати показники теплоти згоряння, масову концентрацію сірководню та меркаптанової сірки, вміст вологи, точку роси за вологою та вуглеводнями, концентрацію легких вуглеводнів для забезпечення відповідності біометану діючим нормативним та технічним стандартам [7-8].

Для виробництва біометану використовується різноманітна органічна сировина, включно з сільськогосподарськими відходами (гній, силосна маса, стебла та листя рослин), харчовими та промисловими відходами, а також спеціально вирощеними енергетичними культурами. Ключовими критеріями відбору сировини є стабільна доступність та оптимальні показники вологи для ефективного анаеробного бродіння. Використання різних типів сировини дозволяє забезпечити стабільність виробництва біометану. Основні види сировини при виробництві біометану наведено на рисунку 1.

Склад та характеристики сировини безпосередньо впливають на якість отриманого біометану. Різні типи органічної сировини визначають

співвідношення метану та вуглекислого газу, вміст сірководню та інших домішок, а також рівень вологи, що, у свою чергу, впливає на ефективність очищення та стабільність теплоти згоряння. Тому важливо забезпечити контроль фізико-хімічних параметрів біометану.

Продуктами біогазової технології є газова фаза, представлена біогазом, що складається переважно з метану та вуглекислого газу, та очищений біометан, придатний для використання як паливо або подачі в газові мережі (рис. 2). Рідко-тверді відходи процесу включають дигестат, бага-

тий на поживні речовини, який використовується як органічне добриво, та його рідку і тверду фази, що можуть застосовуватися для удобрення ґрунтів або виробництва біоматеріалів.

В Україні біогаз активно використовується для виробництва електроенергії на біогазових установках, що сприяє локалізованому енергозабезпеченню та зменшенню викидів парникових газів. Окрім прямого спалювання, частина біогазу після очищення перетворюється на біометан, який може закачуватися в газові мережі для подальшого використання у комунальній та промисловій енер-



Рис. 1. Сировина для виробництва біогазу

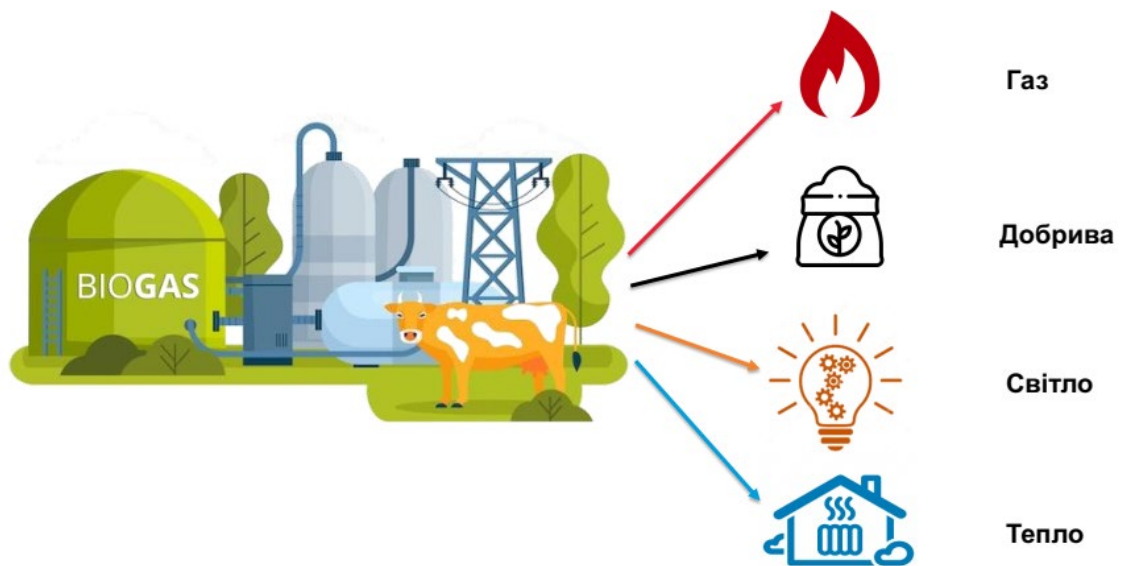


Рис.2. Продукти біогазової технології

гетиці (рис. 3). Такий підхід забезпечує гнучкість енергетичної системи та інтеграцію відновлюваних джерел енергії у національну інфраструктуру.

Основним документом, що регламентує вимоги до якості та фізико-хімічних показників біометану в Україні, є Кодекс газотранспортної системи.

Цей Кодекс розроблено відповідно до Законів України «Про ринок природного газу», «Про метрологію та метрологічну діяльність», «Про трубопровідний транспорт», «Про нафту і газ», «Про природні монополії» та інших нормативно-правових актів. Кодекс є регламентом функціонування газотранспортної системи України та визначає правові, технічні, організаційні та економічні засади функціонування газотранспортної системи України [1, 8].

Дія цього Кодексу поширюється на всіх суб'єктів ринку природного газу України: операторів суміжних систем, газовидобувні підприємства, у тому числі виробників біометану, замовників, споживачів та постачальників природного газу незалежно від підпорядкування та форми власності, а також операторів торгових платформ. Він встановлює параметри газу, які мають бути дотримані для його приймання та транспортування у ГТС. Саме відповідність цим нормам дозволяє закачувати біометан до магістральної газової мережі. В ньому наведено визначення терміну *біометан* – це біогаз, що за своїми фізико-хімічними характеристиками відповідає вимогам нормативно-правових актів до природного газу для подачі до газотранспортної або газорозподільної системи.

Кодекс газотранспортної системи регламентує:

- вимоги до якості газу, що подається до ГТС;
- фізико-хімічні показники, яким повинен відповідати газ (у тому числі біометан) для закачування у магістральну газотранспортну мережу;
- правила доступу та взаємодії учасників ринку газу з оператором ГТС;
- процедури вимірювання, контролю та перевірки параметрів газу.

У контексті біометану, саме Кодекс ГТС визначає, до яких стандартів цей газ має бути доведений після очищення, щоб стати еквівалентом природного газу та мати можливість бути прийнятим оператором у систему.

Згідно Кодексу ГТС, для точок входу і точок виходу визначаються такі значення фізико-хімічних показників (ФХП):

- компонентний склад;
- нижча та вища теплота згоряння;
- густина газу;
- вміст сірководню та меркаптанової сірки;
- вміст механічних домішок;
- число Воббе;
- температура точки роси за вологою;
- температура точки роси за вуглеводнями.

Слід зазначити, що виробники біометану або інших видів газу з альтернативних джерел мають право на отримання доступу до газотранспортних і газорозподільних систем, газосховищ, установки LNG та на приєднання до газотранспортних та газорозподільних систем за умови дотримання технічних норм та стандартів безпеки



Рис. 3. Використання біогазу в Україні

відповідно до законодавства та за умови, що біометан або інші види газу з альтернативних джерел за своїми фізико-хімічними характеристиками відповідають нормативно-правовим актам, що регулюють питання якості природного газу.

Відповідно до умов Кодексу ГТС, природний газ, що подається в газотранспортну систему, повинен відповідати таким вимогам:

Якщо біометан не відповідатиме встановленим Кодексом показникам якості, його подача до газових мереж буде заборонена. Саме тому питання точного та комплексного контролю якості кінцевого продукту набуває особливої важливості [1-10].

Виклад основного матеріалу. Вивчення фізико-хімічних показників біометану є надзвичайно важливим для забезпечення його ефективного та безпечно використання у газотранспортних та газорозподільних системах. Хроматографічний метод аналізу у цьому контексті є найбільш доцільним, оскільки забезпечує високу точність, чутливість та відтворюваність результатів при визначенні складу складних газових сумішей. Завдяки хроматографії можливо окремо ідентифікувати основні та слідові компоненти біометану, що дозволяє не лише оцінювати його загальні фізико-хімічні властивості, але

й прогнозувати поведінку газу при спалюванні та транспортуванні.

Особливу увагу слід приділяти контролю теплоти згоряння біометану. Цей показник є ключовим для визначення енергетичної цінності газу, його ефективності у промислових і енергетичних установках та безпечності експлуатації. Високоточне визначення теплоти згоряння дозволяє уникнути недо- або перевитрати енергії, забезпечує стабільність роботи котлів і турбін та запобігає аварійним ситуаціям, пов'язаним із неконтрольованим горінням.

Значення теплоти згоряння ідеального газу, обчислене на основі значень об'ємної частки компонентів, для температури згоряння t_1 суміші відомого складу, вимірених за температури t_2 і тиску p_2 , обчислюють за рівнянням:

$$\hat{H}_0 = H \times \frac{p_2}{R \times T_2}, \text{ (МДж/м}^3\text{)},$$

де H – значення ідеальної об'ємної теплоти згоряння суміші;

$R = 8,314510$ (Дж/моль \times К) – універсальна газова стала; $p_2 = 101,325$ кПа;

$T_2 = (t_2 + 273,15)$ – абсолютна температура.

При переході від ідеального до реального газу розрахунок об'ємної теплоти згоряння

вміст метану (C ₁), мол. %	мінімум	90
вміст етану (C ₂), мол. %	максимум	7
вміст пропану (C ₃), мол. %	максимум	3
вміст бутану (C ₄), мол. %	максимум	2
вміст пентану та інших більш важких вуглеводнів (C ₅ +), мол. %	максимум	1
вміст азоту (N ₂), мол. %	максимум	5
вміст вуглецю (CO ₂), мол. %	максимум	2
вміст кисню (O ₂), мол. %	максимум	0,2
вища теплота згоряння (25 °C/20 °C)		
	мінімум	36,20 МДж/м ³ (10,06 кВт·год/м ³)
	максимум	38,30 МДж/м ³ (10,64 кВт·год/м ³)
вища теплота згоряння (25 °C/0 °C)		
	мінімум	38,85 МДж/м ³ (10,80 кВт·год/м ³)
	максимум	41,10 МДж/м ³ (11,42 кВт·год/м ³)
нижча теплота згоряння (25 °C/20 °C)		
	мінімум	32,66 МДж/м ³ (09,07 кВт·год/м ³)
	максимум	34,54 МДж/м ³ (09,59 кВт·год/м ³)
температура точки роси за вологою °C при абсолютному тиску газу 3,92	МПа	не перевищує мінус 8 (-8)
температура точки роси за вуглеводнями при температурі газу не нижче 0 °C		не перевищує 0°C
вміст механічних домішок:		відсутні
вміст сірководню, г/м ³		максимум 0,006
вміст меркаптанової сірки, г/м ³		максимум 0,2

$\tilde{H} [t_1, V(t_2, p_2)]$ проводять за ДСТУ ISO 6976 :

$$\tilde{H} [t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\hat{H}_0}{Z_{mix}(t_2, p_2)}, \text{ (МДж/м}^3\text{)},$$

де \hat{H}_0 – значення ідеальної об'ємної теплоти згоряння суміші;

$Z_{mix}(t_2, p_2)$ – фактор стисливості газової суміші розраховується за рівнянням :

$$Z_{mix}(t_2, p_2) = 1 - \left[\sum_{j=1}^N X_j \times \sqrt{b_j} \right]^2,$$

де b_j – коефіцієнт підсумовування.

Крім теплоти згоряння, хроматографічний аналіз дає можливість точно оцінювати густину, відносну густину та число Воббе, що безпосередньо впливають на сумісність біометану з існуючими газотранспортними системами та визначають його придатність для подачі у споживчі мережі. Контроль цих параметрів забезпечує відповідність газу нормативно-правовим вимогам щодо якості природного газу та дозволяє прогнозувати його поведінку при змішуванні з природним газом або іншими видами біогазу.

Порівняно з іншими методами аналізу, хроматографія вирізняється комплексністю та точністю, що робить її оптимальним інструментом для оцінки фізико-хімічних властивостей біометану. Вона дозволяє одночасно визначати велику кількість компонентів, що значно підвищує достовірність даних у порівнянні з простими фізико-хімічними методами, які можуть лише оцінювати окремі параметри газу.

Таким чином, застосування хроматографічного методу для комплексного дослідження фізико-хімічних показників біометану є обґрунтованим і необхідним для:

- забезпечення високої точності та відтворюваності результатів;
- контролю енергетичної цінності газу через визначення теплоти згоряння;
- оцінки придатності газу для транспортування та подачі у газотранспортні та газорозподільні системи;
- підтвердження відповідності нормативно-правовим актам щодо якості природного газу;
- підвищення безпеки та ефективності його використання у промислових і енергетичних процесах [11-13].

З огляду на вищезазначене, хроматографічне дослідження фізико-хімічних показників біометану є ключовим етапом у забезпеченні стабільного, безпечного та ефективного використання відновлюваних газових ресурсів.

Для визначення компонентного складу відібраних проб біометану використовували газові хроматографи Agilent (рис. 4).

Газовий хроматограф Agilent розділяє компоненти суміші завдяки їхній різній взаємодії з колонкою при заданому температурному режимі. Детектор фіксує вихід кожної речовини, а система обробки даних формує хроматограму та обчислює кількість кожного компонента. Метод розділення заснований на різній адсорбції компонентів аналізованої суміші на межі розділу двох незмішуваних фаз. Причому одна фаза рухома – газ, інша нерухома – сорбційний матеріал.

Основними етапами проведення визначення фізико-хімічних показників

відібраних проб біометану були:

- введення зразка проби;
- перенесення газом-носієм;
- розділення в колонці;

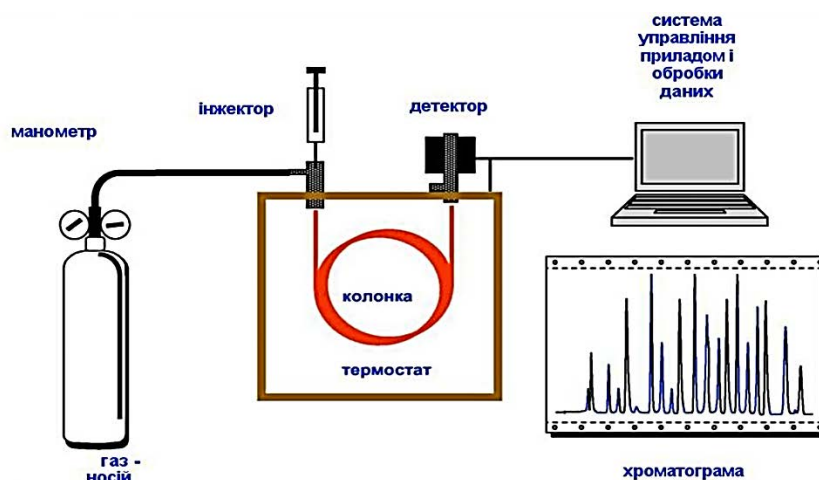


Рис.4. Принцип роботи газового хроматографа Agilent

- детектування;
- аналіз результатів.

Визначення компонентного складу відбувалося згідно з вимогами стандарту ДСТУ ISO 6974 «Природний газ. Визначення компонентного складу із заданою невизначеністю методом газової хроматографії», розрахунок фізико-хімічних показників – згідно вимог вимогам стандартів ДСТУ ISO 6976 «Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини та числа Воббе на основі компонентного складу».

Результати визначення фізико-хімічних показників відібраної проби №1, та №2 біометану наведено в Протоколі аналізування газу – таблиця 1.

Аналіз отриманих результатів показав, що проба біометану №1 та проба біометану №2 за фізико - хімічними показниками відповідає вимо-

гам Кодексу газотранспортної системи та може транспортуватися газовими мережами України – таблиця 2.

За результатами визначення фізико-хімічних показників встановлено, що отриманий біометан повністю відповідає вимогам Кодексу ГТС щодо якісних параметрів.

Детальний аналіз підтверджує, що його компонентний склад знаходиться в межах нормативно допустимих значень і не містить відхилень від регламентованих показників.

Крім того, визначена вища теплота згоряння свідчить про відповідність біометану енергетичним критеріям, необхідним для подачі в газотранспортну систему.

Висновки. Розвиток виробництва біометану в Україні є стратегічно важливим напрямом для

Таблиця 1

Протокол аналізування газу №1 та №2

1 Компонентний склад газу, визначений хроматографічним методом за ДСТУ ISO 6974				
№	Компонент	Формула	Проба №1 вміст, % мол.	Проба №2 вміст, % мол.
1	Метан	CH ₄	97,7388	99,3524
2	Етан	C ₂ H ₄	0,000	0,000
3	Пропан	C ₃ H ₈	0,000	0,000
4	н -Бутан	н-C ₄ H ₁₀	0,000	0,000
5	ізо -Бутан	і-C ₄ H ₁₀	0,000	0,000
6	н -Пентан	нео-C ₅ H ₁₂	0,000	0,000
7	ізо -Пентан	і-C ₅ H ₁₂	0,000	0,000
8	нео -Пентан	п-C ₅ H ₁₂	0,000	0,000
9	Гексан	C ₆ H ₁₄	0,000	0,000
10	Азот	N ₂	1,3232	0,5715
11	Кисень	O ₂	0,0760	0,0457
12	Діоксид вуглецю	CO ₂	0,8619	0,0303
2 Фізико-хімічні показники, розраховані за ДСТУ ISO 6976				
	Фізико-хімічний показник газу (при 20 °C та 101,325 кПа)	Значення		
	Густина відносна		0,5690	0,5577
	Густина абсолютна, кг,м ³		0,6854	0,6717
			МДж/м ³	МДж/м ³
	Теплота згоряння нижча		32,68	33,21
	Теплота згоряння вища		36,26	36,86
	Число Воббе вище		48,07	49,35

Таблиця 2

Відповідність фізико-хімічних показників біометану вимогам Кодексу газотранспортної системи

Показник	Проба №1	Проба №2	Вимоги Кодексу ГТС	Результат відповідає/не відповідає
Метан, % мол.	97,7388	99,3524	мінімум 90	відповідає
Азот, % мол.	1,3232	0,5715	максимум 5	відповідає
Кисень, % мол.	0,0760	0,0457	максимум 0,2	відповідає
Діоксид вуглецю, % мол.	0,8619	0,0303	максимум 2	відповідає
Теплота згоряння вища, МДж/м ³	36,26	36,86	мінімум 36,20	відповідає

підвищення енергетичної незалежності держави, зменшення залежності від імпорту енергоресурсів та формування стійкої низьковуглецевої економіки. Біометан, як відновлюваний газовий енергоносіє, має значний потенціал для інтеграції в національну газотранспортну систему, забезпечуючи стабільне та екологічно чисте джерело енергії.

Ключовим елементом розвитку цієї галузі є систематичний контроль фізико-хімічних показників біометану. Висока точність і регулярність таких вимірювань гарантують безпечну експлуатацію інфраструктури, оптимальну роботу обладнання та відповідність продукції вимогам сучасного ринку енергоносіїв.

Забезпечення відповідності біометану нормативам Кодексу ГТС України є необхідною умовою його подачі до газотранспортної системи, оскільки саме ці стандарти регламентують якість газу. Результати визначення фізико-хімічних параметрів відібраних проб підтвердили високу якість виробленого біометану підприємствами України.

Таким чином, розвиток біометанового сектору в Україні має не лише економічне та екологічне значення, але й вимагає створення ефективної системи контролю якості продукції. Дотримання фізико-хімічних стандартів і забезпечення відповідності Кодексу ГТС є фундаментальною умовою інтеграції біометану у національну газову інфраструктуру та подальшого масштабування його виробництва

Список літератури:

1. Кодекс газотранспортної системи України (ГТСУ). Наказ НКРЕКП № 2490 від 18.12.2015. 210 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text> (дата звернення: 03.03.2026).
2. Братичак М. М. Хімія нафти та газу: навч. посіб. / М. М. Братичак, В. М. Гунька. *Національний університет «Львів. політехніка»*, 2017. 448 с.
3. Pavlůci's, J., Novak Mavar, K.; Brki'c V., Simon, K. Biogas and Biomethane Production and Usage: Technology Development, Advantages and Challenges in Europe. *Energies* 2022, 15, 2940. <https://doi.org/10.3390/en15082940>
4. Георгій Гелетуша, Юрій Матвеев, Петро Кучерук, Семен Драгнев, Володимир Крамар. Виробництво передового біометану з лігноцелюлозної сировини: Аналітична записка №2. Київ: Біоенергетична асоціація України (UABIO), 2025. URL: <https://uabio.org/materials/18274/> (дата звернення 01.03.2026).
5. Gustafsson M., Anderberg S. Biogas policies and production development in Europe: A comparative analysis of eight countries. *Biofuels*. 2022. Т. 13. №. 8. С. 931-944. <https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2034380>
6. Shen Y., Linville J. L., Urgun-Demirtas M., Mintz M. M. & Snyder S. W. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (2021 update). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 146. P. 111099. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111099.
7. Wang Y., Zhang Y., Wang J. & Meng L. Effects of volatile fatty acid concentrations on methane yield and methanogenic bacteria. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 168. P. 330–339. DOI: 10.1016/j.renene.2020.12.067.
8. Calise F., Cappiello F. L., Dentice d'Accadia M. & Vicidomini M. Biogas upgrading technologies and biomethane utilization: A review. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 1378. DOI: 10.3390/en15041378.
9. Mao C., Feng Y., Wang X. & Ren G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Fuel*. 2022. Vol. 324. P. 124457. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124457.
10. Khoshnevisan B., Duan N., Tsapekos P., Awasthi M. K. & Angelidaki I. A critical review on livestock manure biorefinery technologies: Sustainability and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 169. P. 112930. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112930.
11. Thrän D., Billig E., Persson T. & Svensson M. Biomethane status and potential in Europe: A review of data, technologies and policies. *Energy, Sustainability and Society*. 2023. Vol. 13. P. 1–20. DOI: 10.1186/s13705-023-00377-5.
12. Yang Z., Zhang Y., Li J. & Zhang X. Advances in biogas upgrading technologies: Membrane separation, adsorption and biological methods. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 430. P. 139625. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139625.
13. Singh A., Rathore D., Pant D. & Tyagi V. K. Recent developments in biogas upgrading to biomethane: A review of purification technologies and applications. *Bioresource Technology*. 2024. Vol. 389. P. 129746. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.129746.

Yefimenko O.V. DETERMINATION OF THE COMPONENT COMPOSITION AND PHYSICO-CHEMICAL INDICATORS OF BIOMETHANE BY CHROMATOGRAPHIC METHOD

The article is devoted to the prospects for the development of biomethane production in Ukraine and methods for assessing its quality characteristics. The requirements of regulatory documents regarding the composition, physicochemical, and energy parameters of biomethane are considered. It is emphasized that for

safe integration into the gas transmission system and efficient use in energy installations, accurate determination of these parameters is necessary, ensuring reliable equipment operation and facilitating production scaling.

The paper provides a detailed analysis of the advantages of the chromatographic method for determining the component composition of biomethane. In particular, this method allows for precise evaluation of physicochemical parameters, ensuring the reliability and accuracy of the obtained results.

The results of experimental studies showed that biomethane produced by Ukrainian manufacturers and analyzed using chromatography meets the regulatory requirements governing natural gas quality in Ukraine in terms of its physicochemical characteristics. The best results in maintaining the higher heating value at the level of 36.20 MJ/m³ are achieved at a methane concentration of 97.6 mol% and above. Methods for increasing the calorific value of biomethane are also described, allowing optimization of its energy properties for efficient use in the energy sector.

The main sources of biogas formation are analyzed, a classification is proposed, and types of feedstock that can be effectively used for biomethane production are characterized. Considerable attention is given to the right of biomethane producers to access gas transmission and distribution systems, gas storage facilities, and LNG installations. The main advantages of biomethane production and use as a renewable energy source are outlined. Economic, environmental, and strategic opportunities arising from the development of this type of fuel are highlighted, including reducing energy dependence, stimulating exports, and decarbonizing the energy sector.

Keywords: *renewable energy sources, biogas, biogas upgrading, biomethane, physicochemical parameters, gas chromatography, energy indicators.*

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026